



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Percepción remota de eventos de surgencia en el observatorio
costero de Mazatlán, Sinaloa (Pacífico noreste)**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciada en Ciencias de la Tierra

P R E S E N T A:

Andrea Rebeca Lara Cera



**DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Joan Albert Sánchez Cabeza**

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Hoja de datos del jurado

1. Datos del alumno

Andrea Rebeca Lara Cera
Licenciatura en ciencias de la Tierra
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México
312106568

2. Datos del tutor

Dr. Joan Albert Sánchez Cabeza
Laboratorio Cambio Global y Climático
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México

3. Datos del sinodal 1

Dra. María Luisa Machain Castillo
Laboratorio de Micropaleontología y Paleoceanografía
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México

4. Datos del sinodal 2

Dr. Frank Raúl Gío Argáez
Laboratorio de Micropaleontología Ambiental
Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México

5. Datos del sinodal 3

Dra. Elsa Arellano Torres
Departamento de Ecología y Recursos Naturales
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México

6. Datos del sinodal 4

M. en C. Xinantecatl Antonio Nava Fernández
Facultad de Ciencias
Universidad Nacional Autónoma de México

Datos del trabajo escrito

Percepción remota de eventos de surgencias en el observatorio costero de Mazatlán, Sinaloa
(Pacífico Noreste)

30 pp.

2021

Agradecimientos académicos

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, la Facultad de Ciencias, el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología y a mis profesores por brindarme una formación académica de calidad, además de proporcionarme un espacio en sus instalaciones las cuales considero como un segundo hogar.

Al Dr. Joan Albert Sánchez Cabeza por permitirme trabajar en el proyecto de Observatorios del Cambio Global, por compartir su tiempo y conocimiento conmigo, resolver mis dudas y brindarme un espacio para trabajar.

Al M. en C. León Felipe Álvarez Sánchez por el apoyo y asesoría para la obtención de los datos satelitales y de reanálisis utilizados en este proyecto.

Al Lic. en Ciencias de la Tierra Carlos Alberto Herrera Becerril por compartirme su conocimiento en R y asesorarme cuando me surgían dudas respecto a este proyecto.

A los miembros del jurado conformado por la Dra. María Luisa Machain Castillo, el Dr. Frank Raúl Gío Argáez, la Dra. Elsa Arellano Torres y al M en C. Xinantecatl Antonio Nava Fernández por sus críticas, retroalimentación y tiempo para revisar este trabajo. Ha sido un placer poder trabajar con ustedes.

Al Dr. Frank Raúl Gío Argáez por mostrarme las maravillas que uno se puede encontrar al estudiar Ciencias acuáticas y por darme un espacio en su laboratorio.

A la Dra. Carolina Ruíz Fernández por permitirme conocer el Laboratorio de Geoquímica Isotópica y Geocronología y su grupo de trabajo.

Este trabajo fue realizado con el apoyo de los siguientes proyectos:

Observatorio del Cambio Global en la zona costera de Mazatlán, Programa de Apoyos a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) IB201612-2. Renovación: IB201612-RR281612.

Impactos del Cambio Climático y Global en zonas costeras de México, 2014-2016, CONACYT PDCPN2013-01/214349.

Supporting a Global Ocean Acidification Observing Network - towards Increased Involvement of Developing States, Proyecto de Cooperación Técnica del Organismo Internacional de la Energía Atómica (Naciones Unidas) INT7019.

Observatorios costeros y registros ambientales de la acidificación de los mares mexicanos, CONACYT SEMARNAT-2016-01-278634, 2017-2019.

Hipoxia en los observatorios costeros del cambio global. Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica, Universidad Nacional Autónoma de México (PAPIIT IN110518).

Modelos ecológicos: evaluación de impactos y riesgos en zonas costeras de México, DGTIC-UNAM, LANCAD-UNAM-DGTIC-273.

Agradecimientos personales

Agradezco a mi mamá Beatriz por estar día y noche pendiente de mi educación, salud y bienestar. Por proporcionarme las herramientas necesarias para poder cumplir mis metas y sueños. Y aunque han existido limitantes en nuestras vidas, siempre hace el mayor esfuerzo por sacarnos adelante.

A mis hermanas Ana, Alexa y Alili por su compartir momentos muy divertidos y por ser mis cómplices en muchas cosas, las amo.

A mis compañeros de laboratorio Carlos, Ricardo, Brenda, Ernesto, Serguei, Julián, Mariana y Eduardo por su ayuda, consejos y pláticas durante la elaboración de esta tesis.

A mis amigos y familiares que me han apoyado con sus consejos, aprendizajes que me han dado y palabras de aliento para continuar esforzándome.

A Joseph Arellano por darme grandes consejos salomónicos y lecciones de vida por todo el apoyo que me proporcionaste para lograr algunas de las metas que he tenido. Y por acompañarme en un pedacito de mi vida, te llevo en mi corazón.

“If today were the last day of my life, would I want to do what I'm about to do today?”

Steve Jobs

Índice

1.	Introducción	1
1.1.	Surgencias	1
1.2.	Percepción remota	3
1.3.	Temperatura superficial del mar.....	4
1.4.	Observatorios costeros de cambio global.....	4
1.5.	Objetivos	5
1.5.1.	Objetivo general	5
1.5.2.	Objetivos particulares.....	5
2.	Área de estudio.....	5
2.1.	Boca del Golfo de California	5
2.2.	Observatorio Costero Mazatlán.....	6
3.	Metodología	7
3.1.	Fuentes de datos	7
3.1.1.	Datos satelitales.....	7
3.1.2.	Datos de reanálisis.....	8
3.1.3.	Datos <i>in situ</i>	8
3.2.	Regresiones lineales	9
3.3.	Creación de las series de tiempo	10
3.4.	Identificación cualitativa.....	11
3.5.	Polígono de estudio en Mazatlán y línea de costa.....	11
3.6.	Matriz de distancias.....	12
3.7.	Gradiente de temperaturas.....	12
4.	Resultados	13
4.1.	Calidad de las series SST	13
4.2.	Series de tiempo	14
4.2.1.	Videos a escala regional	14
4.2.2.	Escala local.....	16
4.3.	Fenómenos de mesoescala y eventos costeros fríos y cálidos.....	18
4.4.	Ejemplos serie de tiempo con eventos costeros fríos	19
5.	Discusión.....	21
5.1.	Gradiente de temperatura	21

5.2. Índice de surgencias con SST.....	21
6. Conclusiones	25
6.1. Limitaciones y perspectivas	26
7. Bibliografía	27
8. Anexo 1	30

Índice de Figuras

1.1. Surgencia costera, y Espiral de Ekman	1
1.2. Áreas principales de surgencias a lo largo de las costas del mundo	2
1.3. Áreas de surgencias y afloramientos en México	2
1.4. Remolinos (o giros) ciclónicos, anticiclónicos.....	3
2.1. Golfo de California, circulación oceánica superficial	6
2.2. Zona de estudio..	7
3.1. Sonda autónoma HOBO Dissolved Oxygen Logger – U26-001.....	9
3.2. Gráficos de regresión lineal de SST MODIS, Copernicus y OSTIA, todas vs SST Boya de recalada.	9
3.3. Imágenes de SST en la entrada del Golfo de Baja California a escala regional.....	10
3.4. Imágenes de SST en Mazatlán a escala “local” con paleta de colores ajustada.....	11
3.5. Polígono de estudio perpendicular a la línea de costa.....	12
3.6. Gráficos de SST respecto a la distancia a la costa	13
3.7. Regresión lineal de distancia vs temperatura en el polígono de interés	13
4.1. OSTIA. Imágenes de SST en la entrada del Golfo de Baja California a escala regional.....	15
4.2. MODIS. Imágenes de SST en la entrada del Golfo de Baja California a escala regional.....	16
4.3. OSTIA. Imágenes de SST en Mazatlán a escala “local”	17
4.4. MODIS. Imágenes de SST en Mazatlán a escala “local”	17
4.5. Copernicus. Imágenes de SST en Mazatlán a escala “local”.	18
4.6. Remolinos y surgencias (análisis cualitativo) en las series de tiempo OSTIA y MODIS.....	19
4.7. OSTIA. Ejemplos de eventos costeros fríos en Mazatlán a escala local.....	20
4.8. MODIS. Ejemplos de eventos costeros fríos en Mazatlán a escala “local”	20
5.1. Gradiente de temperatura en Mazatlán con datos satelitales (MODIS).	22
5.2. Gradiente de temperatura en Mazatlán con datos de reanálisis (Copernicus).....	22
5.3. Climatología estacional del viento superficial.	23
5.4. Gradientes fríos y cálidos en Mazatlán (Copernicus), y índice multivariado de ENOS (MEI) 24	

Índice de Tablas

3.1. Resumen de datos para las regresiones lineales contra la serie <i>in situ</i> Boya recalada	9
3.2. Descripción de series de tiempo utilizadas en este trabajo.....	10
4.1. Resumen estadístico de las regresiones lineales de los productos SST vs la serie <i>in situ</i> Boya de Recalada	14
5.1. Pendientes obtenidas a partir de las regresiones lineales entre distancia y temperatura	24

Resumen

Las surgencias son movimientos ascendentes de agua subsuperficial y fría a la superficie. Estos fenómenos ocurren principalmente cuando los vientos empujan el agua de la superficie en dirección paralela a la línea de costa. El agua de las surgencias se caracteriza por ser rica en nutrientes y habitualmente pobre en oxígeno. Una de las zonas importantes de surgencias costeras se encuentra en el océano Pacífico, frente a costas mexicanas (zona del golfo de California).

El monitoreo de la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) es indispensable para el estudio del clima y el cambio global. Existen diferentes estrategias para el monitoreo de la SST: medidas *in situ*, imágenes satelitales y productos de reanálisis.

El objetivo de este trabajo es analizar el campo de temperaturas con datos satelitales y de reanálisis para identificar eventos de surgencia en el Observatorio Costero Mazatlán, Sinaloa, México en el periodo de 2014-2016. Los resultados de este trabajo contribuyen al estudio de la variabilidad de los niveles de oxígeno disuelto, abordados en otro estudio del observatorio.

En este trabajo se construyeron series de tiempo de imágenes a escala regional (entrada del Golfo de California) y local (observatorio) para observar la evolución de la SST. Se identificaron fenómenos de mesoescala (giros ciclónicos y anticiclónicos) y eventos costeros (fríos y cálidos). Para cuantificar la importancia de los eventos observados se calcularon los gradientes de temperatura ($^{\circ}\text{C km}^{-1}$) en los primeros 30 km de las series MODIS (satelital) y Copernicus (reanálisis). Los gradientes costeros fríos, posibles indicadores de surgencias, se observaron de noviembre a mayo. Durante los periodos fríos se observaron dos máximos en los meses de enero y abril, muy probablemente relacionados con surgencias inducidas por el viento.

1. Introducción

1.1. Surgencias

Las surgencias (*upwelling* en inglés) son movimientos ascendentes de agua subsuperficial de baja temperatura y rica en nutrientes en la superficie (Kämpf y Chapman, 2016; Pisoni *et al.*, 2014). Este fenómeno normalmente se mantiene durante un período de días a semanas y propicia el ascenso de masas de agua de una profundidad de ~100 m o más (Kämpf y Chapman, 2016). Los eventos de surgencia ocurren principalmente cuando los vientos que fluyen paralelos a la costa empujan el agua de la superficie hacia mar abierto. En combinación con la rotación de la tierra y el transporte de Ekman, el agua subsuperficial asciende y reemplaza el agua que se ha alejado (Figura 1.1; NOAA, 2018; Lara-Lara *et al.*, 2008), provocando una disminución de la temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés). El agua de las surgencias normalmente se caracteriza por ser rica en nutrientes, lo que generalmente conduce a una alta productividad biológica (Pisoni *et al.*, 2014). De hecho, la productividad primaria de los sistemas costeros relacionados con las surgencias sostiene grandes pesquerías globales, un importante recurso económico (Benazzouz *et al.*, 2014). El agua de las surgencias que asciende desde la sub-superficie puede ser pobre en oxígeno, ya que en algunos casos están asociadas a zonas de hipoxia, que limita o impide el desarrollo de vida aeróbica (Millero, 2013).

Los sistemas de surgencias más grandes del mundo se encuentran en Perú – Chile, California, el noroeste y el sudoeste de África (Figura 1.2; Kämpf y Chapman, 2016). Las mejores zonas de pesca generalmente se encuentran donde las surgencias costeras duran casi todo el año, como las costas de África y de Sudamérica. En el caso de América del norte se observan afloramientos estacionales. Los vientos que soplan de norte a sur provocan surgencias a lo largo de la corriente de California (Kämpf y Chapman, 2016).

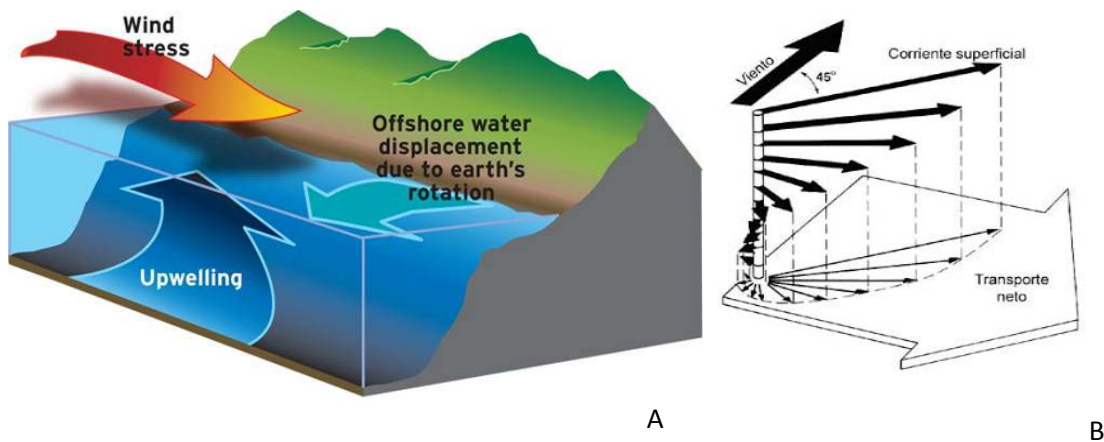


Figura 1.1. a) Surgencia costera (NOAA FISHERIES, 2020), b) Espiral de Ekman (Divulgación Plocan, 2017)

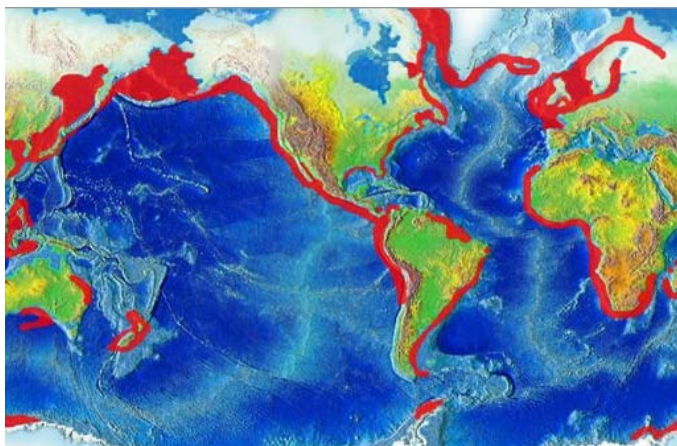


Figura 1.2. Áreas principales de surgencias a lo largo de las costas del mundo (en color rojo) (Divulgación Plocan, 2017).

En el Océano Pacífico se encuentran importantes zonas de surgencias costeras, asociadas a dos importantes centros de alta presión atmosférica: (1) frente a las costas de Oregón, California (EUA) y Baja California (México); y (2) frente a las costas de Chile y Perú (Lara-Lara *et al.*, 2008). En México se observan surgencias y afloramientos en las costas de Baja California, el golfo de California, en cabo Corrientes, el golfo de Tehuantepec y la península de Yucatán (Figura 1.3), causadas por mecanismos diferentes.



Figura 1.3. Áreas de surgencias y afloramientos en México (Lara-Lara *et al.*, 2008).

Existen diferentes tipos de afloramientos: costeros, topográficos, por remolinos e impulsados por los vientos a gran escala. La surgencia eólica costera es una de las más estudiadas y ocurre cuando fuertes vientos desplazan masas de agua de la costa hacia mar abierto. El forzamiento del viento afecta una capa superficial del orden de decenas de metros, denominada capa de Ekman. Debido a la rotación de la Tierra (fuerza de Coriolis) la columna de agua en movimiento experimenta en promedio una rotación de 90° a la derecha, en el hemisferio norte, con relación a la dirección del viento. A este efecto se le denomina transporte de Ekman (Figura 1.1; Lara-Lara *et al.*, 2008; Kämpf y Chapman, 2016; Cushman-Roisin y Beckers, 2011). La llamada *surgencia ecuatorial* no está influenciada por la fuerza de Coriolis, sino por los vientos alisios que soplan hacia el oeste e inducen el movimiento de las aguas superficiales que a su vez son remplazada por agua subsuperficiales. El afloramiento por los vientos a gran escala ubicado en la Antártida es impulsado

por los vientos del oeste, causando que el agua profunda ascienda hacia la superficie. También existen afloramientos con movimientos verticales del flujo asociados a cambios en la batimetría de la zona, como sucede en la península de Yucatán (Lara-Lara *et al.*, 2008). Por otra parte, los remolinos son procesos físicos de mesoescala con patrones de flujo circular (giros ciclónicos/anticiclónicos; Figura 1.4), generados por la inestabilidad de las corrientes y que tienen diámetros horizontales de 100 km en mar abierto y de 5-20 km en la costa (Kämpf y Chapman, 2016). Los giros anticiclónicos son zonas de convergencia, tienen una altura ligeramente superior al agua que los rodea y tienen centros cálidos. Los giros ciclónicos son zonas de divergencia con centros fríos, resultado de surgencia, y que tienen una altura ligeramente inferior a las aguas de su entorno (Gómez *et al.*, 2008).

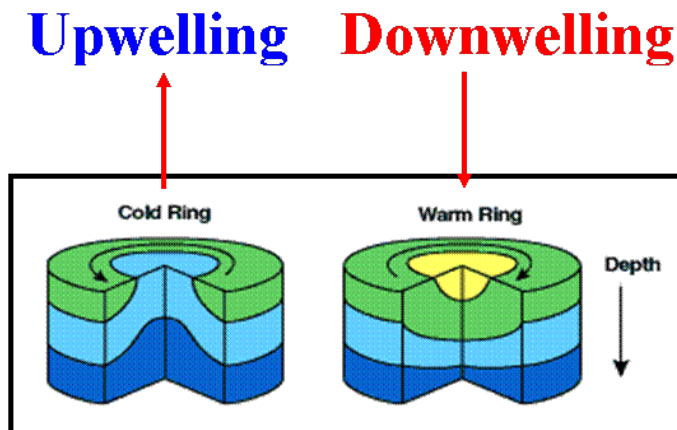


Figura 1.4. Remolinos (o giros) ciclónicos, anticiclónicos. Figura tomada de: Eddies in the ocean. (2020).

1.2. Percepción remota

La percepción remota es una excelente herramienta para monitorear la superficie de los océanos. Esta técnica permite recolectar, procesar e interpretar información de un objeto, un proceso o fenómeno en la superficie terrestre, mediante un instrumento que no está en contacto físico con los objetos (Khorram *et al.* 2016). La percepción remota mide y registra la energía electromagnética reflejada o emitida por la superficie de la Tierra. En el caso de la teledetección satelital, se dispone de una cobertura global y periódica, lo que ayuda a reducir los costos y el tiempo para obtener la información de grandes superficies del planeta.

Existe una gran variedad de sistemas de detección para muy diversas aplicaciones. En el ámbito científico, la percepción remota es utilizada, entre muchas aplicaciones, para investigación meteorológica y oceanográfica, que sirven por ejemplo para estudiar y comprender las interacciones entre el aire y el mar (Miller *et al.*, 2005). A partir de los diferentes sensores se puede obtener información de SST, concentración de clorofila, corrientes oceánicas y sedimento suspendido (Miller *et al.*, 2005).

1.3. Temperatura superficial del mar

La temperatura del agua es una de las variables físicas más importantes del medio marino, pues influye en aspectos físicos, químicos y biológicos (Lalli y Parson, 1997). Por ejemplo, la temperatura del agua influye en la concentración de gases disueltos en el agua de los océanos, como el oxígeno y el dióxido de carbono, que están relacionados con numerosos procesos biológicos. Además, el monitoreo de la SST es indispensable para el estudio del clima y el actual cambio global (MacKenzie y Schiedek, 2007). Los mares se calientan principalmente por la radiación infrarroja de origen solar, que es transformada en calor por absorción. El calentamiento por la luz solar se limita a la superficie inmediata del océano porque el 98% del espectro infrarrojo se absorbe en los primeros metros de la columna de agua (Lalli y Parson, 1997).

Existen diferentes estrategias para el monitoreo de la SST. En el monitoreo *in situ* se miden propiedades del agua del mar con sensores autónomos fijos o mediante embarcaciones con sondas. Este tipo de monitoreo permite obtener información precisa de la SST, pero requiere una cantidad elevada de recursos humanos y económicos (Sánchez-Cabeza *et al.*, 2019). Por otro lado, las imágenes satelitales son una poderosa herramienta en el estudio de procesos oceánicos superficiales, pues la información está uniformemente distribuida en el espacio y el tiempo, excepto por la interferencia de las nubes, que alteran los valores de brillo y limitan la utilidad de la información. La SST satelital permite estudiar los procesos dinámicos de la superficie, como por ejemplo la presencia de agua fría en la costa o variaciones del calentamiento superficial (Soto-Mardones *et al.*, 1999).

La SST satelital puede presentar errores durante la medida, por interferencia de condiciones atmosféricas, o durante la calibración y procesamiento de los datos. También se dispone de datos semi-empíricos a través del re-análisis. Los datos *in situ* procedentes de boyas, cruceros oceanográficos y satelitales son utilizados en modelos numéricos, que proporcionan productos con estimaciones de múltiples variables del sistema oceánico y atmosférico. Los datos de reanálisis permiten desarrollar un registro continuo y completo del clima. Este tipo de análisis es utilizado en la investigación y en servicios climáticos, y permite monitorear y comparar condiciones climáticas actuales con las del pasado (Bengtsson *et al.*, 2004).

1.4. Observatorios costeros de cambio global

Los observatorios costeros de la UNAM son sistemas de monitoreo que integran datos de medidas *in situ*, satelitales y de reanálisis de diversas variables ambientales, atmosféricas y oceánicas. Los observatorios tienen como objetivo generar datos e información a largo plazo para estudiar y determinar tendencias del cambio global y climático en las zonas costeras de México. De entre las variables estudiadas, la SST es indispensable para el estudio del cambio climático y sus impactos. La UNAM cuenta con 3 observatorios en costas mexicanas, ubicados en Mazatlán, Sinaloa; Puerto Morelos, Quintana Roo; y Ciudad del Carmen, Campeche (Sánchez-Cabeza *et al.*, 2019). El laboratorio Cambio Global y Climático del ICML-UNAM, es responsable de los observatorios costeros a través de diferentes proyectos: “Observatorios costeros y registros ambientales de la acidificación de los mares mexicanos”, CONACYT SEMARNAT-2016-01-278634; Hipoxia en los

observatorios costeros del cambio global, Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica, Universidad Nacional Autónoma de México (PAPIIT IN110518).

En la actualidad, en el observatorio costero de Mazatlán se estudia la manifestación de importantes eventos de hipoxia y su posible relación con surgencias costeras. La hipoxia es la disminución de la concentración de oxígeno en la columna de agua (2 mg L^{-1}), que en algunas regiones está asociada a sistemas de surgencia y a la ventilación de las masas de agua subsuperficiales (Millero, 2013). De hecho, la zona de estudio se encuentra próxima a una de las mayores zonas de oxígeno mínimo del mundo (Stramma *et al.*, 2010). El estudio de la presencia de surgencias en la zona de estudio permitirá comprender mejor la variabilidad de los niveles de oxígeno disuelto, abordado en otros trabajos, y complementar las series de tiempo generadas en el observatorio.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

El objetivo de este proyecto es identificar eventos de surgencia cercanos al observatorio costero de Mazatlán durante el periodo 2014-2016 a través del análisis de la temperatura superficial del mar con imágenes satelitales y datos de reanálisis.

1.5.2. Objetivos particulares

- I. Crear una serie de tiempo de imágenes satelitales y de reanálisis de SST durante el periodo 2014-2016 a la entrada del golfo de California.
- II. Identificar la presencia de surgencias a partir de las variaciones de SST a nivel regional y local (Mazatlán).
- III. Establecer los periodos de influencia de las surgencias observadas frente a Mazatlán y comparar los registros de SST *in situ*, satelitales y de reanálisis.

2. Área de estudio

2.1. Boca del Golfo de California

El golfo de California (GC) es un mar marginal que tiene comunicación al sur con el océano Pacífico a través de una boca de 222 km de ancho. Tiene una longitud aproximada de 1,203 km y una anchura media de 92 km (Roden y Emilsson, 1979). La boca del GC se encuentra en una zona transición tropical-subtropical, lo que genera un ambiente atmosférico y oceanográfico complejo que influye en la distribución de sus propiedades fisicoquímicas (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1978).

La estructura termohalina del agua y la circulación general en la proximidad de la boca indican la presencia de cuatro masas de agua (Álvarez-Sánchez *et al.*, 1978): el Agua Tropical Superficial (TSW, por sus sigla en inglés) con salinidad (S) > 35 y temperatura (T) $\geq 18^\circ\text{C}$ se ubica en la parte central de la boca entre 0-150 m; el Agua del Golfo de California (GCW, por sus siglas en inglés), con $S \geq 35$ y $T > 12^\circ\text{C}$, en el margen este entre 0-100 m; el Agua de la Corriente de California (CCW, por sus sigla en inglés) con $S \geq 34.5$ y $12 \leq T < 18^\circ\text{C}$, en el margen oeste entre 0-150m; por debajo de estas tres masa de agua se encuentra el Agua Subtropical Subsuperficial (StSsW por sus siglas en inglés) con $34.5 < S < 35.9$ y $9 \leq T < 18^\circ\text{C}$, a una profundidad de 150- 500 m (Torres-Orozco, 1993; Lavín y Marinone, 2003; Portela *et al.*, 2016). El intervalo de SST en el GC durante

invierno es entre 14°C y 21°C y en verano entre 28°C y 31°C (Roden, 1964). El GC se caracteriza por vientos débiles del sureste (SE) durante verano y vientos fuertes del Noreste (NE) en invierno. Los vientos y las mareas generan en primavera - verano una circulación ciclónica con un flujo entrante de calor, y en otoño – invierno la circulación es anticiclónica con un flujo saliente de calor (Figura 2.1; Lavín *et al.*, 2014).

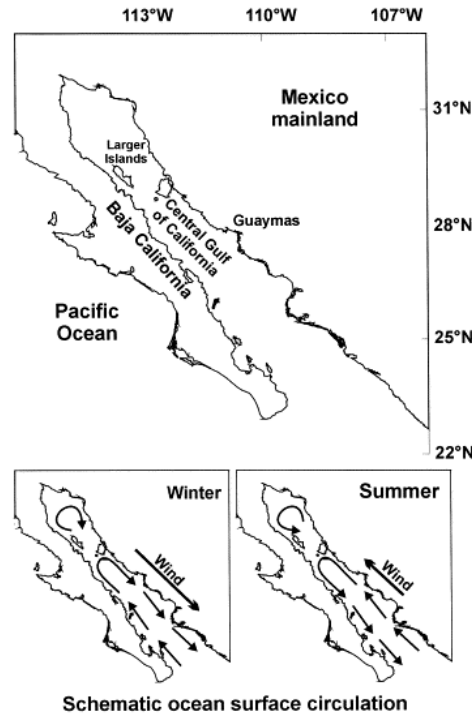


Figura 2.1. Golfo de California, circulación oceánica superficial. Figura tomada de Lluch-Cota, 1999.

2.2. Observatorio Costero Mazatlán

Al sureste de la boca del GC se encuentra la ciudad de Mazatlán, Sinaloa (23.24°, -106.40°; Figura 2.2). En la región se presenta una intensa actividad pesquera, turística, comercial, acuícola y agrícola. El observatorio de Mazatlán cuenta con diversas estaciones de monitoreo permanente, desde la bahía de Mazatlán hacia el interior de la laguna costera Estero de Urías, donde se miden variables como temperatura, salinidad y oxígeno disuelto (Sánchez-Cabeza *et al.*, 2019) con el objetivo de disponer de series largas de tiempo que permitan cuantificar los impactos locales del cambio global.

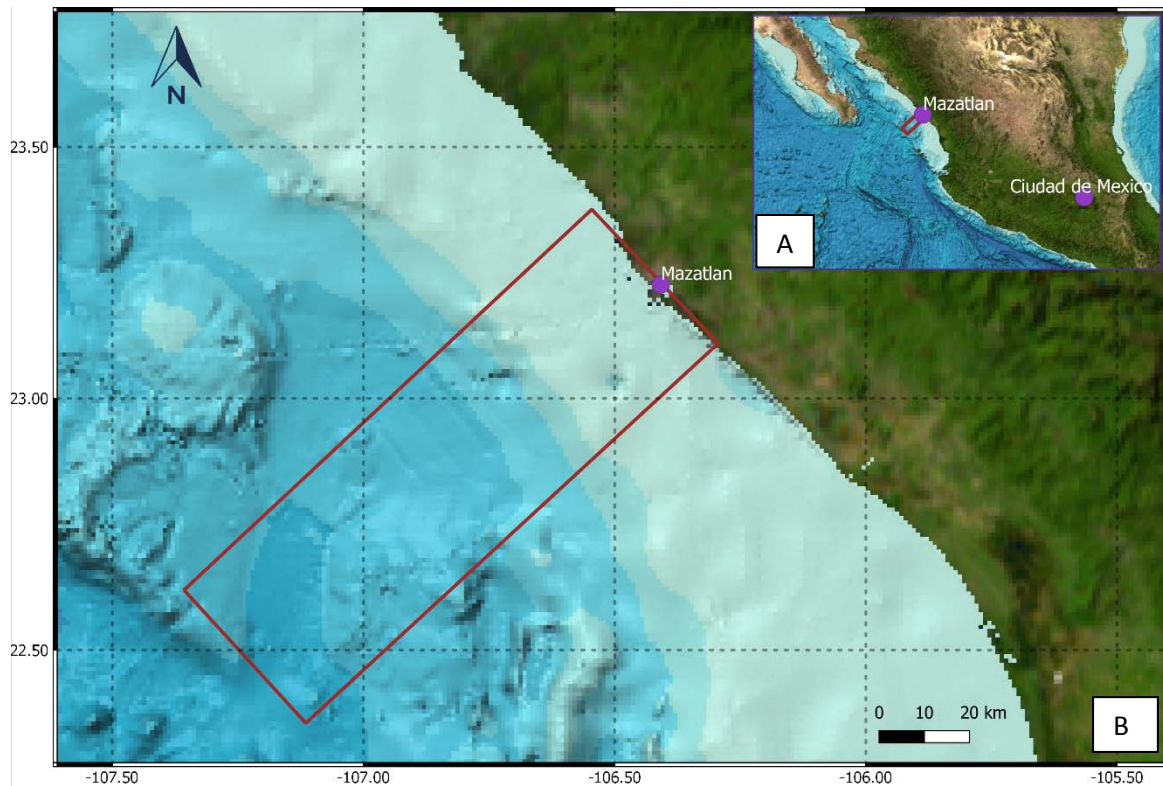


Figura 2.2. Zona de estudio. A) Mazatlán, Sinaloa, en la entrada del Golfo de California. B) Zona de estudio próxima al Observatorio Costero de Mazatlán.

3. Metodología

3.1. Fuentes de datos

Para la realización de este estudio se compilaron series de tiempo de SST en el Observatorio costero de Mazatlán. Los datos se obtuvieron de mediciones *in situ*, datos satelitales y datos de reanálisis. El periodo de tiempo para este estudio se fijó de 2014 a 2017. La longitud temporal y resolución espacial de cada serie son diferentes.

3.1.1. Datos satelitales

Los datos satelitales se obtuvieron del sensor remoto MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) a bordo del satélite Aqua (EOS PM) de la National Aeronautics and Space Administration (NASA, por sus siglas en inglés). El satélite transita una órbita subpolar con una periodicidad de un día y las imágenes satelitales son diarias con una resolución espacial de 4 km. Los datos proporcionados por el satélite cubren el periodo desde 2002-07-04 hasta la actualidad (NASA, 2018). La información satelital es procesada y filtrada con el software SeaDAS por la Unidad de Informática Marina (UNINMAR) del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL). Los datos se obtuvieron con una extensión espacial global.

3.1.2. Datos de reanálisis

En esta investigación se utilizaron productos de reanálisis obtenidos del Copernicus Marine (Copernicus, 2019), un programa europeo para la observación y el monitoreo de la Tierra. El reanálisis combina observaciones históricas, como observaciones satelitales e *in situ*, con modelos computacionales para generar series temporales de muchas variables, como la SST. Por lo tanto, el reanálisis proporciona una descripción completa de los cambios en el océano con el tiempo. Para este trabajo se obtuvieron también los productos de Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA; Donlon *et al.*, 2012). Ambos productos tienen un enfoque oceánico y una extensión espacial global.

3.1.2.1 OSTIA

OSTIA proporciona diariamente mapas globales de SST con una resolución espacial de 1 km. Para su elaboración, OSTIA utiliza datos *in situ* y datos satelitales de infrarrojo y microondas proporcionados por el Group for High-Resolution Sea Surface Temperature (GHRSST; Donlon *et al.*, 2012). Se obtuvieron imágenes diarias en formato TIF con latitud 20.5° - 25.5° y longitud -110° a -106°, de marzo de 2015 a diciembre de 2016.

3.1.2.2 Copernicus

Se utilizó la variable de SST del producto Global Reanalysis PHY 001 030 de Copernicus. El modelo proporciona promedios diarios de temperatura con una escala espacial global, tiene una resolución de 1/12 de grado y cuenta con 50 niveles de profundidad (Copernicus, 2019). Se utilizó el nivel 1, ya que es el nivel más cercano a la superficie con una profundidad de 0.5 metros.

3.1.3. Datos *in situ*

Los datos *in situ* se colectaron por el Observatorio Costero del Cambio Global en Mazatlán, en la estación de monitoreo Est003 Boya de Recalada (23.15°, -106.43°). Esta estación cuenta con sondas de bajo costo que miden variables físicas y químicas en agua superficial con una frecuencia de registro de 30 minutos (Figura 2.2; Sánchez-Cabeza *et al.*, 2019).

Se utilizó la serie de tiempo de SST de la sonda HOBO Dissolved Oxygen Logger – U26-001 (Figura 3.1) que mide oxígeno disuelto y temperatura. Su rango de medición de temperatura es -5 a 40 °C, con una resolución de 0.02°C y una exactitud de 0.2°. El proceso de validación de datos consistió en la aplicación de tres filtros: con el primer filtro se eliminaron valores fuera del intervalo de medición de los instrumentos; con el segundo filtro se consideraron dudosos los datos fuera del intervalo mensual media $\pm 3\sigma$; y con el tercer filtro se identificaron saltos en los registros mediante el cálculo del intervalo media $\pm 3\sigma$ del promedio de diferencias de cada dato respecto al anterior, y

se consideraron dudosos los datos fuera del intervalo. Por último, los datos fueron inspeccionados visualmente con el fin de discriminar o validar los datos dudosos.

Figura 3.1. Sonda autónoma HOBO Dissolved Oxygen Logger – U26-001

3.2. Regresiones lineales

El modelo de regresión lineal permite explorar la linealidad de la relación entre dos variables. Con esta técnica se comparó la SST *in situ* con los datos satelitales y de reanálisis. Para ello se utilizaron los píxeles de los datos MODIS (23.145°, -106.437°), OSTIA (23.14°, -106.43°) y Copernicus (23.14°, -106.43°) más próximos a la Boya Recalada (Tabla 3.1). Dado que la resolución temporal de los datos satelitales y de reanálisis era diaria, los datos de la serie de la Boya de Recalada fueron promediados diariamente con la función *round_date* del software R (R Core Team, 2018). Los datos fueron combinados en una base de datos única con los de MODIS y OSTIA y se procedió a realizar regresiones lineales con la función *lm()* de R que proporciona la ecuación de la recta, las incertidumbres de los parámetros, el p-value (significancia estadística) y R² (coeficiente de determinación) (Figura 3.2).

Tabla 3.1. Resumen de datos para las regresiones lineales contra la serie *in situ* Boya recalada.

Serie	Número de datos	Fecha inicial	Fecha final
MODIS	305	2014-01-30	2016-09-21
Copernicus	757	2014-01-30	2016-09-24
OSTIA	256	2016-01-01	2016-07-04

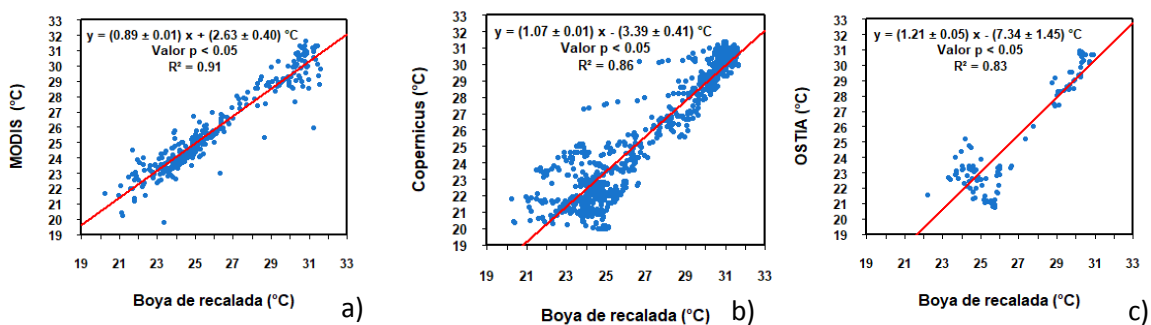


Figura 3.2. Gráficos de regresión lineal de SST a) MODIS, b) Copernicus y c) OSTIA, todas vs SST Boya de recalada.

3.3. Creación de las series de tiempo

Para la identificación visual de eventos de surgencia, se generó un vídeo para observar la evolución de las SST en la zona seleccionada. Mediante la función *colorRampPalette* de R y la librería *RColorBrewer*, se creó una paleta de colores que define una escala secuencial azul-verde-amarillo-naranja-rojo, con un intervalo de 1°C desde los 14°C hasta los 37°C, donde los azules representan las temperaturas más bajas y los rojos las temperaturas más altas. Se leyeron los archivos diarios de las series MODIS y OSTIA de los que se extrajeron las temperaturas. Los datos en formato *NetCDF* y *tiff* se transformaron a formato *raster* con la función *raster* de R. Cada imagen (Tabla 3.2) fue recortada según las coordenadas de latitud 20.5° - 25.5° y longitud -110° y -106°. Los resultados se guardaron en formato *jpg*, que permite guardar imágenes grandes en espacios de almacenamiento pequeños. Algunos ejemplos se presentan en la figura 3.3.

Tabla 3.2. Descripción de series de tiempo utilizadas en este trabajo.

Serie	Tipo	Fecha inicio	Fecha final	# de imágenes	Resolución espacial	Formato
MODIS	Satelital	2014-01-01	2016-12-31	1096	4 km	NetCDF
OSTIA	Reanálisis	2015-03-12	2016-12-31	256	1 km	Tiff
Copernicus	Reanálisis	2014-01-01	2016-12-31	1096	1/12 °	NetCDF
Boya recalada	<i>In situ</i>	2014-01-30	2016-09-24			RDS

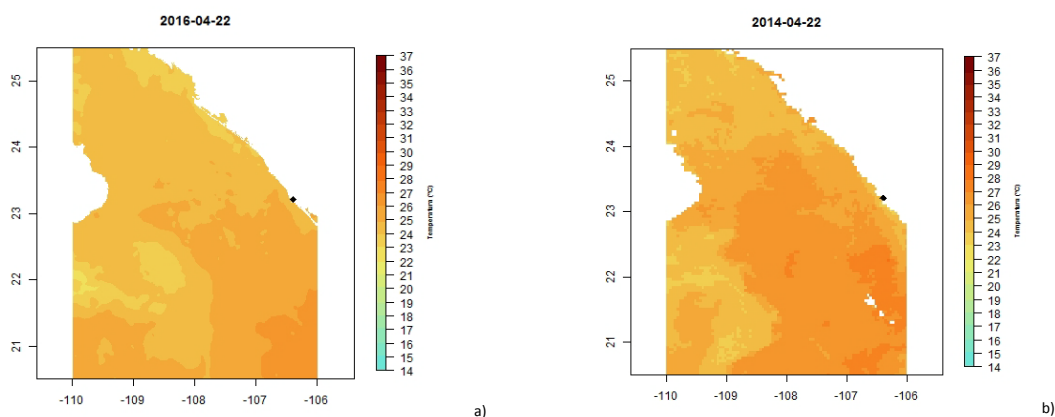


Figura 3.3. Imágenes de SST en la entrada del Golfo de Baja California a escala regional: a) OSTIA, b) MODIS

Para crear el video se utilizó el software Adobe Premier Pro (Adobe, 2019). Después de importar las imágenes, se seleccionó una velocidad de transición de 25 segundos, y se creó la secuencia que se exportó en formato *mp4*. Para visualizar mejor las temperaturas en la costa de Mazatlán, se eligió una escala espacial menor, entre las coordenadas 22° a 24° de latitud y -108° a -106° de longitud. Posteriormente, para observar mejor la presencia de aguas frías en la zona costera, se realizaron

vídeos con una paleta de colores ajustada al intervalo 16° - 30°C, con un intervalo de temperatura de 0.25°C (Figura 3.4).

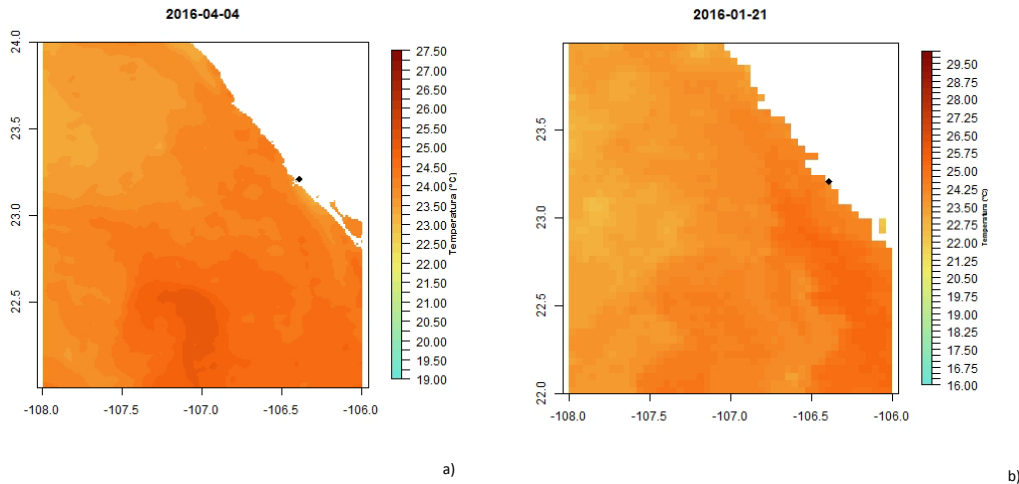


Figura 3.4. Imágenes de SST en Mazatlán a escala “local” con paleta de colores ajustada: a) OSTIA, b) MODIS.

3.4. Identificación cualitativa

A partir los videos de OSTIA y MODIS a escala regional, se identificaron visualmente eventos de presencia de agua fría en la costa durante el periodo de diciembre de 2015 a mayo de 2016. Se registró la presencia de eventos de mesoescala (giros ciclónicos o anticiclónicos; Figura 3.5) y eventos costeros (fríos o cálidos) cercanos a Mazatlán. A partir de este punto se decidió descartar la serie de OSTIA en los posteriores análisis, ya que es una serie incompleta para nuestro periodo de interés en esta zona.

3.5. Polígono de estudio en Mazatlán y línea de costa

Una vez que se observó de forma cualitativa la presencia de eventos fríos costeros y de mesoescala, se continuó con un análisis cuantitativo, para lo que definimos una línea de costa y un polígono de interés cercano a Mazatlán. Empleando un sistema de información geográfica libre (QGIS, 2019), se definió la línea de costa a partir de dos puntos P1 = (22.83°, -106.03°) y P2 = (22.83°, -106.80°) y sus perpendiculares para definir un polígono de interés de 120 km x 120 km. El sistema de referencia de coordenadas (SRC) utilizado para crear el polígono fue el WGS84. El polígono se exportó como una capa *shape*. En R se cargó la capa *shape* y las imágenes en formato *raster*, que fueron cortadas con la función *mask*. En la figura 3.5 se muestra el polígono con datos de MODIS. Al observarse que, en una misma imagen se podían presentar simultáneamente fenómenos de ausencia y presencia de surgencias cercanas a la costa (Figura 3.5.a), se creó un segundo polígono más pequeño de 30 km x 120 km frente a la costa de Mazatlán (Figura 3.5.b).

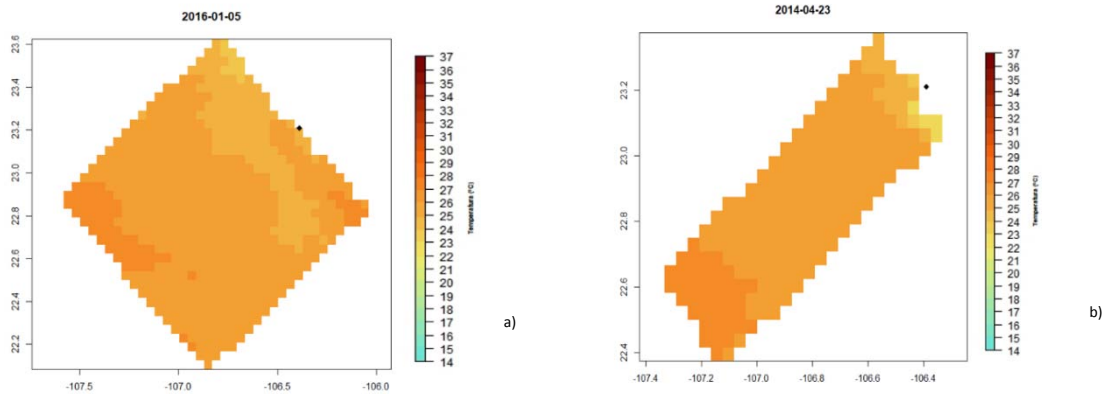


Figura 3.5. Polígono de estudio perpendicular a la línea de costa a) (120 km x 120 km), b) (30 km x 120 km)

3.6. Matriz de distancias

Con el objetivo de cuantificar el gradiente de temperaturas perpendicular a la costa, se creó una matriz de distancias para cada píxel de la imagen. Para ello se utilizó la máscara de 30 km x 120 km (Figura 3.5b) y para cada imagen se creó una tabla con los valores de temperatura y coordenadas, de donde se descartaron los datos sin información y SST > 45°C, valores erróneos por encima de los valores máximos de SST en la zona. En el caso de las imágenes MODIS, se eliminaron las imágenes con menos de 40 píxeles de información, debido a la presencia de nubes. La matriz de distancias se generó con la función *dist2Line* de la librería *geosphere*, que calcula la distancia más corta de los puntos dentro del polígono a la línea de costa.

3.7. Gradiente de temperaturas

Para cada imagen se representó la nube de puntos de SST en función de la distancia a la costa. Para visualizar la tendencia de la nube de puntos se aplicó una suavización con la función *loess*, un ajuste no paramétrico con regresiones locales (Cohen, 1999). La constante de suavizado (*span*) indica la proporción de observaciones a considerar por ventana y en este caso se utilizó un *span* = 0.75. Una inspección visual de las gráficas permitió estimar que los eventos de enfriamiento de las aguas costeras alcanzan unos 30 km de distancia a la costa, que fue utilizado como punto de corte para determinar los gradientes de temperatura (Figura 3.6).

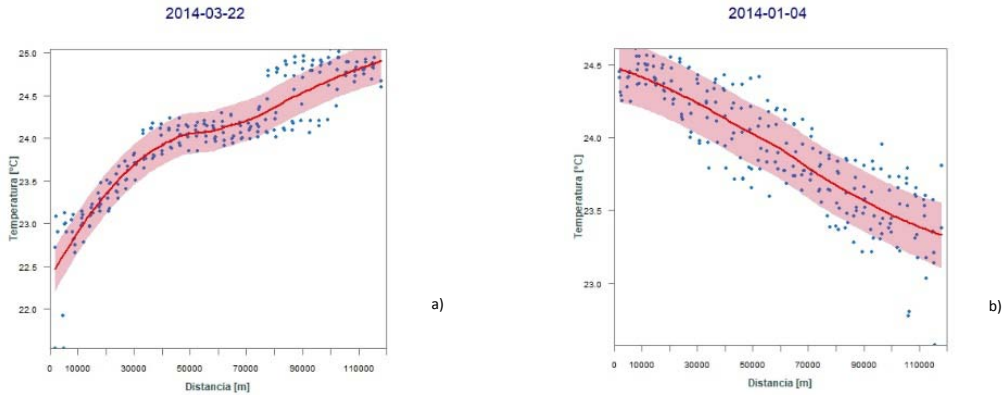


Figura 3.6. Gráficos de SST respecto a la distancia a la costa: a) tendencia positiva, b) tendencia negativa.

Para cuantificar los gradientes espaciales de temperatura se realizaron regresiones lineales para los casos en que se disponía de al menos 15 puntos en los primeros 30 km (Figura 3.7). Posteriormente se realizó la regresión lineal con la función *lm* entre distancia y temperatura, con lo que se obtuvo la pendiente (gradiente de temperatura), incertidumbre y significancia estadística (*p-value*) de cada matriz diaria.

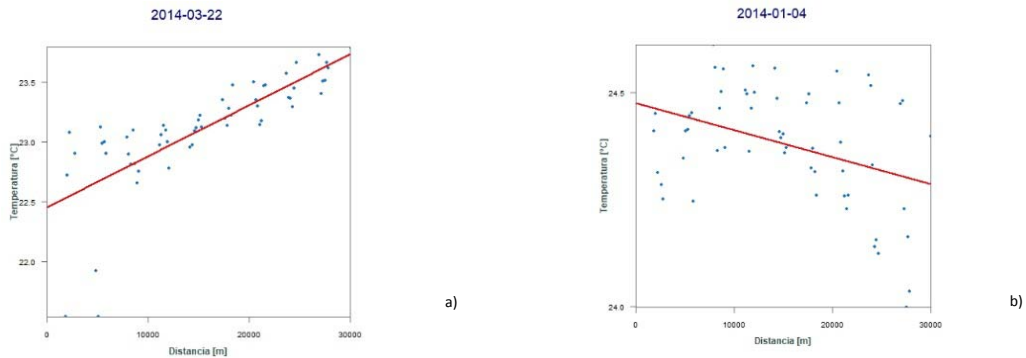


Figura 3.7. Regresión lineal de distancia vs temperatura en el polígono de interés: a) regresión positiva (aguas costeras frías), b) regresión negativa (aguas costeras calientes).

4. Resultados

4.1. Calidad de las series SST

Para evaluar la calidad de la información de los diferentes productos de SST utilizados, se estudió la relación lineal entre la SST *in situ* de la Boya recalada con los datos satelitales de MODIS, y de reanálisis de OSTIA y Copernicus (Tabla 4.1). Todas las regresiones son significativas y el menor coeficiente de determinación es de 0.83, por lo que los tres productos permiten reproducir satisfactoriamente la SST en el observatorio de Mazatlán. Su fiabilidad respecto a la SST *in situ* es MODIS > Copernicus > OSTIA.

Tabla 4.1. Resumen estadístico de las regresiones lineales de los productos SST vs la serie *in situ* Boya de Recalada.

Series	p_value	R ²
MODIS	< 0.05	0.91
Copernicus	< 0.05	0.86
OSTIA	< 0.05	0.83

4.2. Series de tiempo

Para realizar una evaluación cualitativa de la información se generaron videos de las imágenes diarias de SST de 2014 a 2016: dos videos a escala regional de las series OSTIA y MODIS, y tres videos a escala local de las series OSTIA, MODIS y Copernicus (ver Anexo 1). En los videos de MODIS y Copernicus a escala local se observan periodos cálidos y fríos estacionales (verano–invierno) frente a las costas de Mazatlán. En los videos de MODIS a escala regional y local se observan fenómenos de mesoescala (remolinos ciclónicos y anticiclónicos) que van desde la Península de Baja California a Mazatlán y recorren la boca al GC. Finalmente, en los videos de OSTIA y MODIS a escala regional se observan eventos costeros fríos que viajan del norte al sur del lado Este (E) del GC en invierno, y eventos costeros cálidos del sur hacia el norte del GC durante verano.

4.2.1. Videos a escala regional

OSTIA

Durante el verano de 2015 la SST varía de 27°C a 35°C (Figura 4.1a), mientras que en invierno varía de 20°C a 27°C (Figura 4.1b). El año 2015 se observan eventos costeros fríos en los meses de marzo y abril, pero no se tienen imágenes de mayo a septiembre. De septiembre a noviembre la SST va varía entre 27°C y 35°C y en el mes de diciembre la temperatura comienza a disminuir.

No se tienen suficientes imágenes para los meses de enero y principios de febrero del año 2016. En febrero y marzo se observan eventos costeros cálidos. En el mes de febrero se observa un remolino anticiclónico y agua cálida en la costa (Figura 4.1c), y a inicios de marzo se observa un remolino ciclónico frente a Mazatlán (Figura 4.1d). El mes de abril se observan eventos fríos durante varios días consecutivos (Figura 4.1e), y en mayo se presentan ocasionalmente. En los meses de junio y julio la SST aumenta (Figura 4.1f). No se tienen imágenes de principios de julio a octubre. En el mes de octubre, la SST se mantiene entre 28°C y 32°C. A finales de noviembre se observa agua un poco más fría que viaja del norte del GC hacia el sur. En diciembre la SST disminuye y se observa agua fría con valores entre 22°C y 24°C en la costa cercana a Mazatlán.

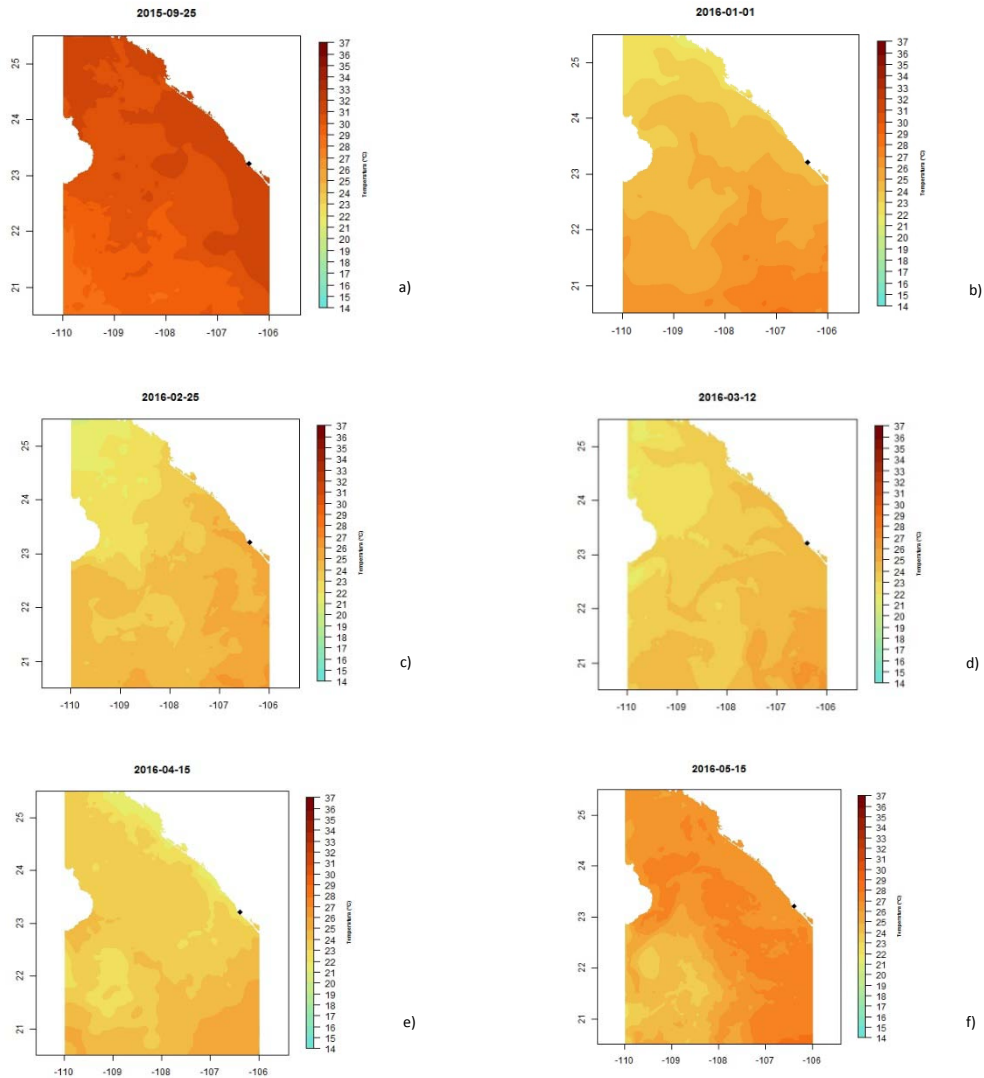


Figura 4.1. OSTIA. Imágenes de SST en la entrada del Golfo de Baja California a escala regional: a) invierno, b) verano, c) remolino anticiclónico, d) remolino ciclónico, e) evento costero frío, f) evento costero cálido.

MODIS

En el video de MODIS se muestran todas las imágenes diarias de los años 2014, 2015 y 2016. Sin embargo, hay imágenes sin información de SST debido a la presencia de nubes. Para todos los años, la SST en los meses de enero está entre 18°C y 26°C. Durante enero y febrero se observan eventos costeros fríos, y en el mes de febrero del año 2016 se observa un remolino anticiclónico (Figura 4.2a). La SST comienza a aumentar en marzo, se siguen presentando eventos costeros fríos y se observa en el año 2016 un remolino ciclónico (Figura 4.2b). En abril se observan eventos fríos costeros con una duración de 3 – 5 días (Figura 4.2c). En el mes de mayo aún se observan eventos costeros fríos, aunque su frecuencia disminuye. A partir de junio las nubes impiden la identificación de eventos (Figura 4.2d). En octubre la densidad de nubes disminuye, y en el año 2014 se observan

algunos eventos costeros fríos. La SST comienza a disminuir en noviembre, y a finales de diciembre se observa que agua más fría viaja desde el norte el Golfo hacia el sur, llegando a las costas de Mazatlán.

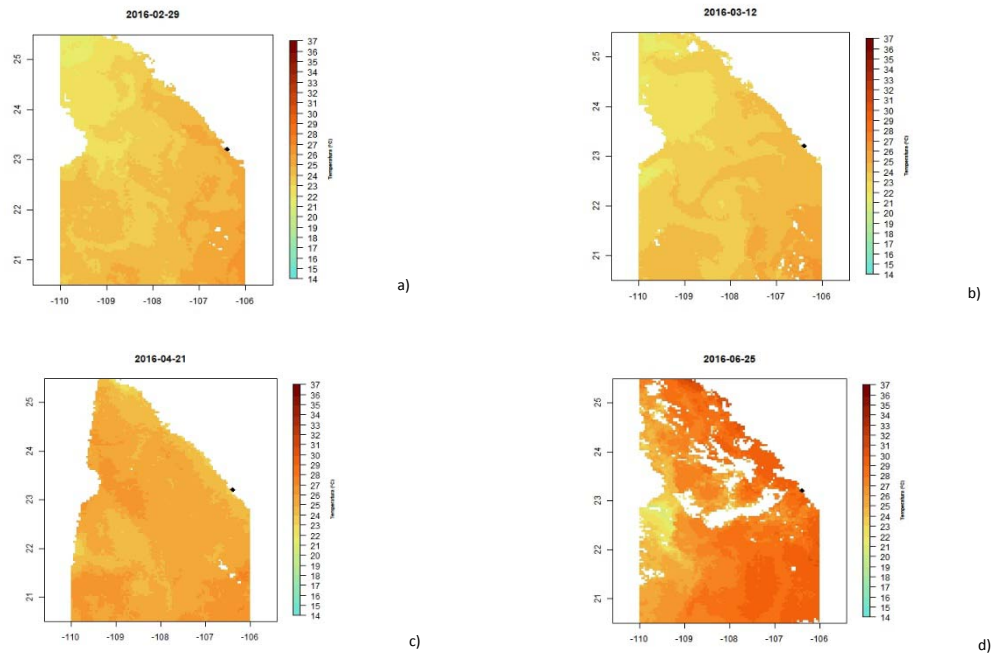


Figura 4.2. MODIS. Imágenes de SST en la entrada del Golfo de Baja California a escala regional: a) remolino anticiclónico, b) remolino ciclónico, c) evento costero frío, d) evento costero cálido.

4.2.2. Escala local

OSTIA

En el video de OSTIA a escala local se visualizan mejor los eventos costeros fríos. En el año 2015 se observan estos eventos durante los meses marzo y abril (Figura 4.3a), y de finales de noviembre a diciembre. En febrero y marzo de 2016 se observan eventos costeros cálidos (Figura 4.3b). En el mes de abril se observa un gradiente de temperatura frío en la costa de Mazatlán que dura todo el mes, que ya no se observa en mayo, cuando incrementa la SST. A mediados de noviembre se observa un cambio en la SST y el gradiente cálido (Figura 4.3c) pasa a ser un gradiente frío en la costa. En diciembre se observa que agua más fría viaja del norte hacia el sur de Mazatlán (Figura 4.3d).

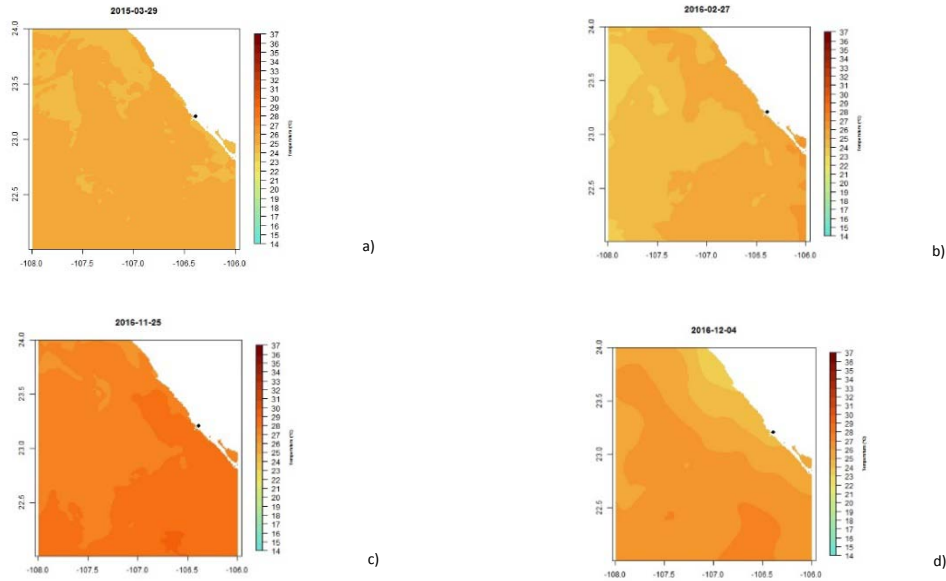


Figura 4.3. OSTIA. Imágenes de SST en Mazatlán a escala “local”: a) evento costero frío, b) evento costero cálido, c) gradiente cálido, d) gradiente frío.

MODIS

El video de MODIS está afectado por la presencia de nubes. En los meses de enero se observa agua caliente en la costa (Figura 4.4a) y no se ven eventos costeros fríos debido a la presencia de nubes. En febrero se observan gradientes de temperatura fríos hacia la costa. El mes de marzo se ven eventos costeros cálidos (Figura 4.4b) y fríos (Figura 4.4c). Desde marzo a mayo los eventos costeros fríos tienen una duración de 3 a 10 días. En junio y julio aumenta la SST, pero la presencia de nubes dificulta ver detalles costeros. En noviembre la cobertura de nubes disminuye y se empieza a ver gradientes costeros fríos (Figura 4.4d). En diciembre se observa que agua fría viaja desde el norte hacia el sur.

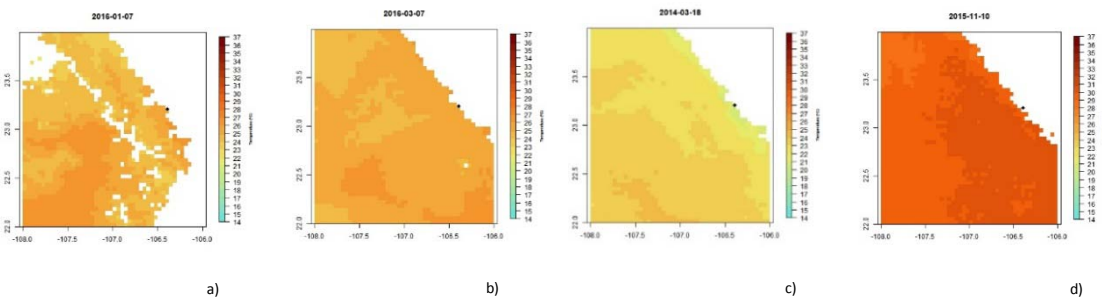


Figura 4.4. MODIS. Imágenes de SST en Mazatlán a escala “local”: a) evento costero cálido, b) evento costero cálido, c) evento costero frío y d) evento costero frío.

Copernicus

El video de *Copernicus* está completo y no presenta nubes. Aunque tiene una menor resolución espacial en comparación a los videos de OSTIA y MODIS, permite visualizar los fenómenos durante los tres años. En los meses de enero la temperatura varía entre 18°C y 25°C y se presentan eventos costeros fríos (Figura 4.5a), que continúan en febrero con un aumento de temperatura de 1°C a 2°C. En marzo se observan eventos costeros fríos con una duración de 2 a 3 días, y en abril y mayo duran entre 5 y 15 días (Figura 4.5b). La SST aumenta en los meses de junio y julio (Figura 4.5c). En agosto y septiembre se observan eventos costeros cálidos, y las SST van de 27°C a 35°C. En noviembre se observa agua fría en la costa que viaja desde el norte al sur (Figura 4.5d). A partir de diciembre la temperatura comienza a disminuir y se observan de nuevo eventos costeros fríos.

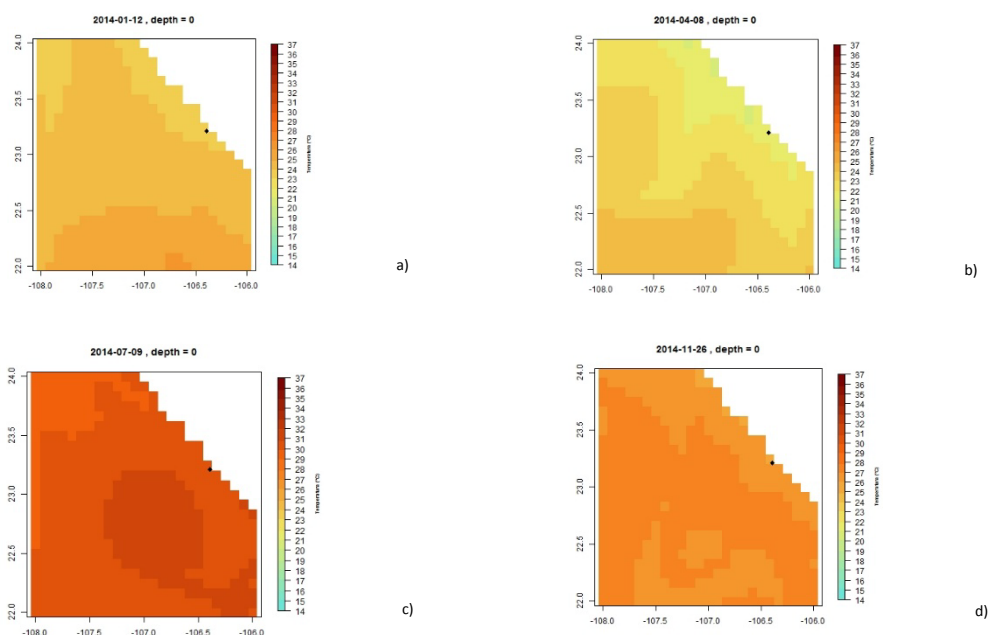


Figura 4.5. Copernicus. Imágenes de SST en Mazatlán a escala “local”. a) Evento costero frío, b) evento costero frío, c) Evento costero cálido, d) Gradiente de SST frío.

4.3. Fenómenos de mesoescala y eventos costeros fríos y cálidos

Con los videos regionales de OSTIA y MODIS, se seleccionó de diciembre de 2015 a mayo de 2016 para identificar eventos de mesoescala (remolinos ciclónicos y anticiclónicos) y eventos costeros (fríos y cálidos; Figura 4.6). En la serie de OSTIA se observaron fenómenos costeros cálidos en febrero y marzo, mientras que los eventos costeros fríos se presentaron en diciembre y abril. En la serie MODIS predominaron los eventos costeros fríos en diciembre, enero, abril y mayo, mientras que los eventos costeros cálidos se observaron en febrero y marzo. En ambas series los remolinos anticiclónicos coinciden con eventos costeros cálidos y los remolinos ciclónicos con eventos costeros fríos (Figura 4.6). En ambas series faltan datos: la serie de OSTIA está incompleta en los meses de enero y febrero, y la serie de MODIS presenta días con nubes, lo cual no permite tener una visualización continua de los eventos de mesoescala y costeros. En la figura 4.6 se pudo

observar de forma cualitativa la presencia de distintos fenómenos cercanos a las costas de Mazatlán como agua fría y remolinos, lo que permitió continuar con un análisis cuantitativo para la identificación de surgencias.

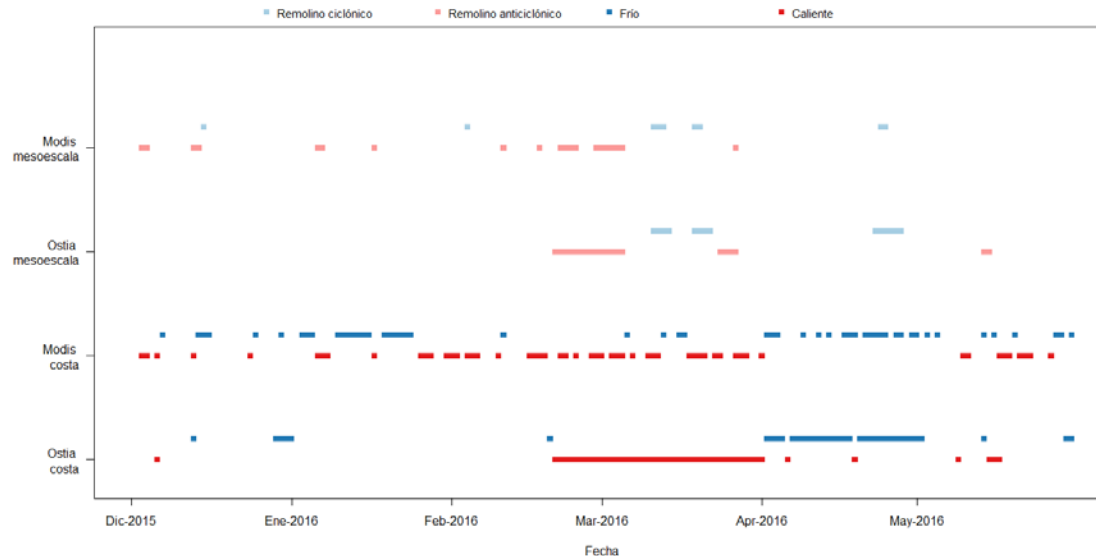


Figura 4.6. Remolinos y surgencias (análisis cualitativo) en las series de tiempo OSTIA y MODIS.

4.4. Ejemplos serie de tiempo con eventos costeros fríos

Una vez identificados los eventos costeros fríos, se inspeccionaron algunos ejemplos a una escala local, de diciembre de 2015 hasta abril del 2016. La paleta de colores con mayor resolución permitió visualizar mejor el gradiente de temperatura, así como confirmar la presencia de la surgencia.

OSTIA

En la serie OSTIA se observa que la SST en el mes de diciembre muestra una SST no-homogénea, que varía de 24°C a 27°C (Figura 4.7a). Durante todo el mes de abril se observan eventos costeros fríos (figuras 4.7 b, c y d), con temperaturas de hasta 20.5°C (Figura 4.7c). Aunque las imágenes de OSTIA tienen una resolución que permiten observar con detalle eventos costeros fríos, se optó descartar esta serie de tiempo debido a la falta de información durante largos periodos de tiempo.

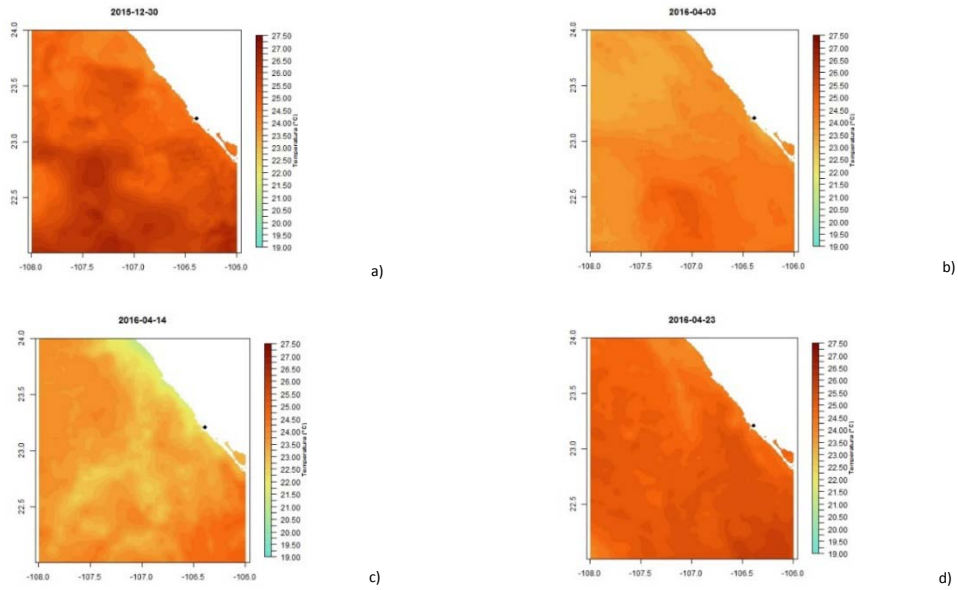


Figura 4.7. OSTIA. Ejemplos de eventos costeros fríos en Mazatlán a escala local, de diciembre 2015 a abril 2016.

MODIS

La serie de MODIS incluye imágenes sólo de enero y abril. En enero se muestra una SST mayor a abril (figuras 4.8a y 4.8b). En abril el intervalo de temperatura es de 20.5°C a 25.5°C, y se observó que el agua fría que llega a la costa tiene una SST entre 20.5°C a 22.5°C (figuras 4.8c y 4.8d).

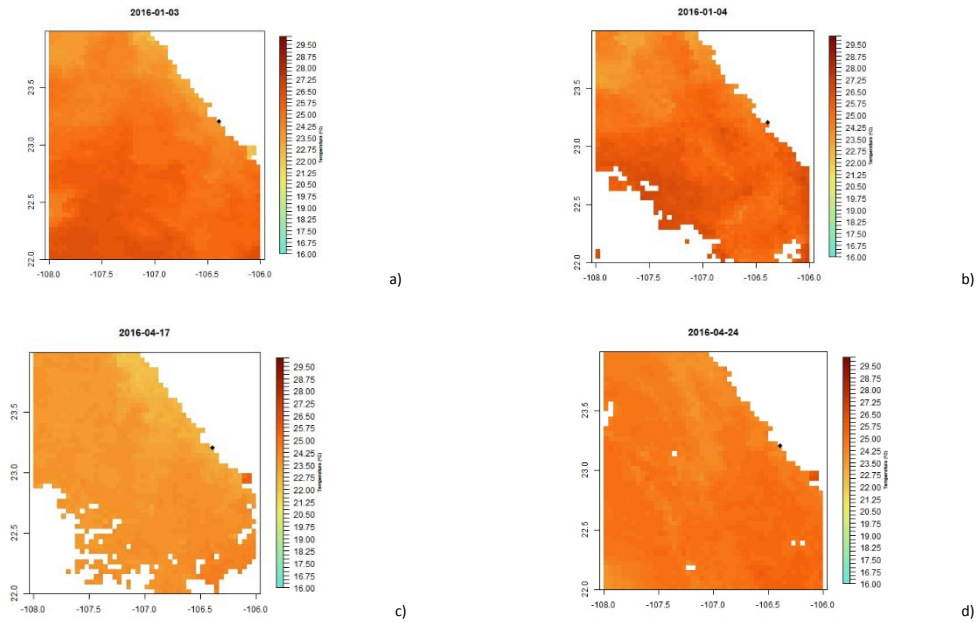


Figura 4.8. MODIS. Ejemplos de eventos costeros fríos en Mazatlán a escala “local” en el periodo de diciembre 2015 a abril 2016.

5. Discusión

Los videos de la SST en Mazatlán mostraron eventos costeros fríos durante el periodo de noviembre a mayo, los cuales presentaron una duración de días a semanas, y los eventos más largos se observan en el mes de abril. De las diferentes fuentes de información (satelital y reanálisis) se descartó la serie de OSTIA por la falta de información durante períodos largos. En las imágenes de SST de MODIS hay presencia de nubes, lo que no permitió disponer de una serie completa de eventos costeros fríos. Si bien la serie de Copernicus tiene una resolución espacial más baja, no presenta huecos espaciales ni temporales.

5.1. Gradiente de temperatura

Para identificar eventos costeros fríos y cálidos se estudió la pendiente de la temperatura con la distancia a la costa hasta 30 km (gradiente, $^{\circ}\text{C km}^{-1}$). Una pendiente positiva indica la presencia de aguas más frías cerca de la costa (Figura 3.7a), y una pendiente negativa indica la presencia de aguas más cálidas (Figura 3.7b). Las series de pendientes significativas fueron graficadas, junto con una curva suavizada (*loess* con $\text{span} = 0.1$; Figura 3.6).

5.2. Índice de surgencias con SST

Se obtuvieron dos series de tiempo del gradiente de temperatura: MODIS (satelital) y Copernicus (reanálisis). Debido a la presencia de nubes, la serie MODIS permitió calcular 494 valores de las 1096 imágenes, de las que 378 valores son significativos, con una predominancia de gradientes positivos (eventos costeros fríos). En los meses de enero a abril se observaron diversos eventos fríos. En mayo los gradientes positivos (fríos) disminuyeron, pero sin mostrar pendientes negativas. Los meses con gradientes cálidos ocurrieron en julio de 2015, y marzo y septiembre de 2016. Las bandas de confianza (95%) son más amplias cuando se tienen menos puntos, como se observa de julio a octubre.

En la serie de Copernicus se obtuvieron todas las pendientes de las 1096 imágenes, de las que 780 fueron significativas (Tabla 5.1; Figura 5.2). Esta serie ofrece información más completa que la serie de MODIS. En enero se observaron gradientes positivos (eventos costeros fríos), que disminuyó en febrero y marzo, y volvió a ser positivo en abril mayo. De junio a octubre se observaron gradientes negativos poco visibles en la serie MODIS debido a la cobertura de nubes. Las bandas de confianza de la serie Copernicus son menores que para la serie MODIS. Dado que la completitud y fiabilidad de la serie Copernicus es mayor, el resto de la discusión se basó en su estudio.

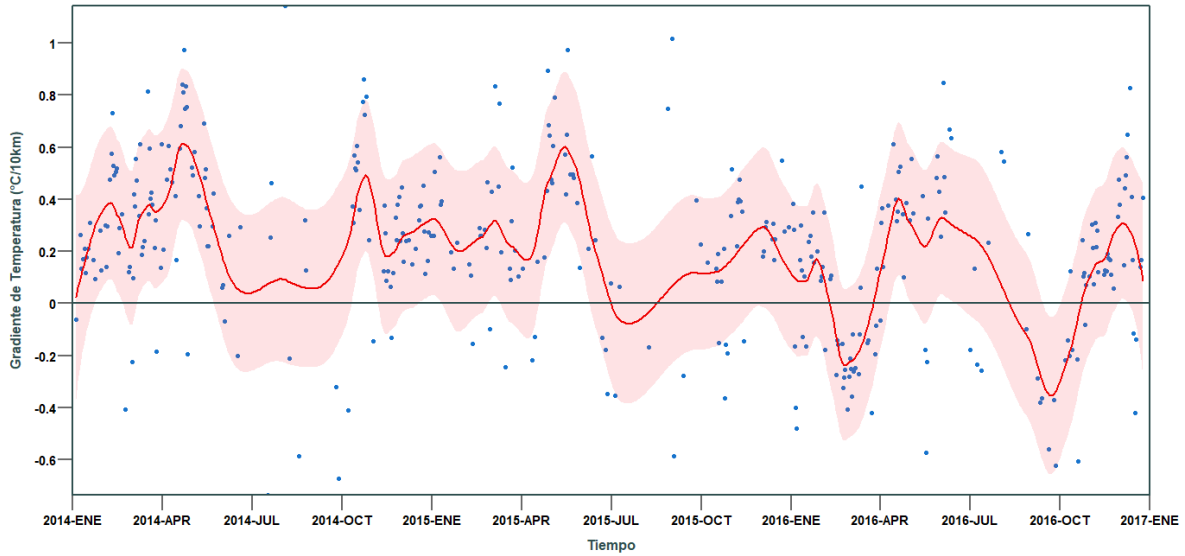


Figura 5.1. Gradiente de temperatura en Mazatlán con datos satelitales (MODIS).

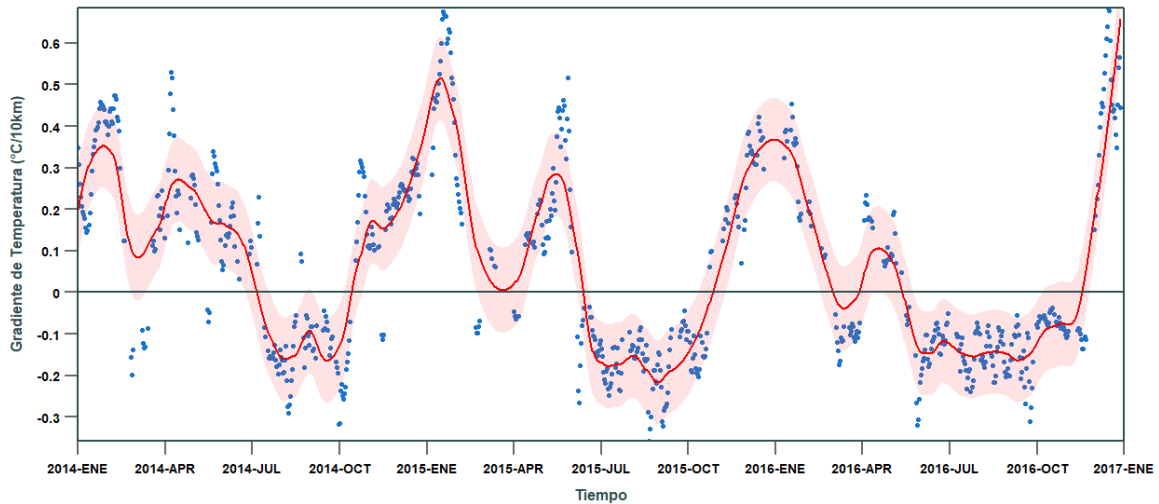


Figura 5.2. Gradiente de temperatura en Mazatlán con datos de reanálisis (Copernicus).

En la serie Copernicus predominaron ligeramente eventos cálidos (36%, Tabla 5.1) sobre los eventos fríos (34%, Tabla 5.1), aunque el valor absoluto de SSTGrad es mayor durante los eventos fríos. Los eventos fríos se presentaron de noviembre a mayo y los eventos cálidos se presentaron de junio a octubre. Este comportamiento podría estar asociado a la circulación atmosférica en el GC, ya que el viento es uno de los principales forzantes de la circulación oceánica. La circulación atmosférica en el GC tiene principalmente dos estaciones: los vientos soplan del norte durante el invierno, y del sur en verano (Figura 2.1; Herrera-Cervantes *et al.*, 2007; Lluch-Cota, 1999; Parés-Sierra *et al.*, 2003). Además, la topografía juega un papel importante en la dirección de los vientos:

al tratarse de una cuenca semicerrada con elevaciones de 700m y 1000m sobre el continente, se canaliza el flujo del viento a lo largo de todo el golfo (Parés-Sierra *et al.*, 2003).

Es probable que el viento produzca afloramientos costeros en el GC durante todo el año: cuando el viento sopla del norte en invierno se generan surgencias costeras del lado continental y cuando sopla del sur durante el verano las surgencias costeras se observan del lado de la península (Lluch-Cota *et al.*, 2001; Parés-Sierra *et al.*, 2003). Por esta razón, durante el verano no se observan eventos costeros fríos en las costas de Mazatlán. Además, las surgencias durante el verano son ausentes o menos efectivas debido a que se tienen una termoclina más profunda y vientos más débiles que en invierno (Lluch-Cota, 1999).

La climatología del viento en el GC (Parés-Sierra *et al.*, 2003) indica que los vientos más fuertes del noroeste (NO) se producen en invierno (diciembre – enero – febrero; Figura 5.3), consistente con nuestra observación de eventos costeros fríos especialmente intensos en enero (Figura 5.4). Durante marzo-abril-mayo la intensidad disminuye, pero la dirección principal parece ser más paralela a la costa en Mazatlán, lo que sigue favoreciendo la aparición de surgencias. Efectivamente, en nuestra serie de tiempo aparece otro máximo de eventos costeros fríos en abril. Durante el verano, el viento procede del este y su intensidad disminuye, por lo que no se observa la presencia de eventos fríos causados por el viento. Por último, de septiembre a noviembre los vientos soplan nuevamente del NO (Figura 5.3d), pero aún observamos eventos costeros cálidos. Esta observación indica que otros procesos pueden influir sobre los eventos costeros observados.

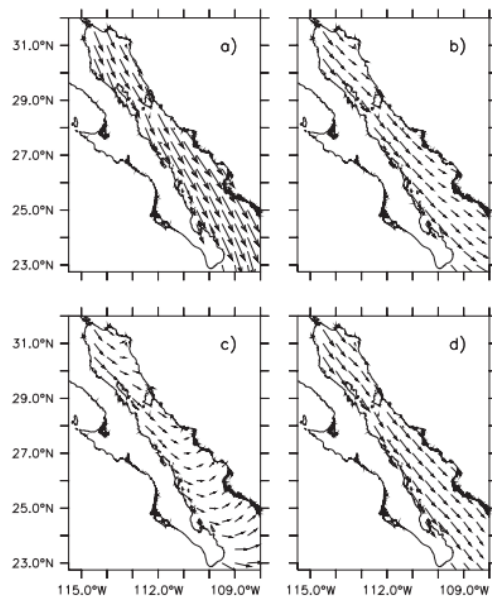


Figura 5.3. Climatología estacional del viento superficial para los periodos a) diciembre - enero – febrero, b) marzo –abril –mayo, c) junio – julio – agosto, d) septiembre – octubre – noviembre.

Figura tomada de Parés-Sierra *et al.*, 2003

Tabla 5.1. Pendientes obtenidas a partir de las regresiones lineales entre distancia y temperatura.

	MODIS	Copernicus
Total pendientes	494	1096
Pendientes significativas	378 (77%)	770 (70%)
Pendientes (+) Total	294 (60%)	374 (34%)
Pendientes (+) 2014	125 (34%)	179 (47%)
Pendientes (+) 2015	81 (22%)	120 (33%)
Pendientes (+) 2016	88 (24%)	75 (20%)
Pendientes (-) Total	84 (17%)	396 (36%)
Pendientes (-) 2014	15 (4%)	86 (22%)
Pendientes (-) 2015	17 (5%)	127 (32%)
Pendientes (-) 2016	52 (14%)	183 (46%)

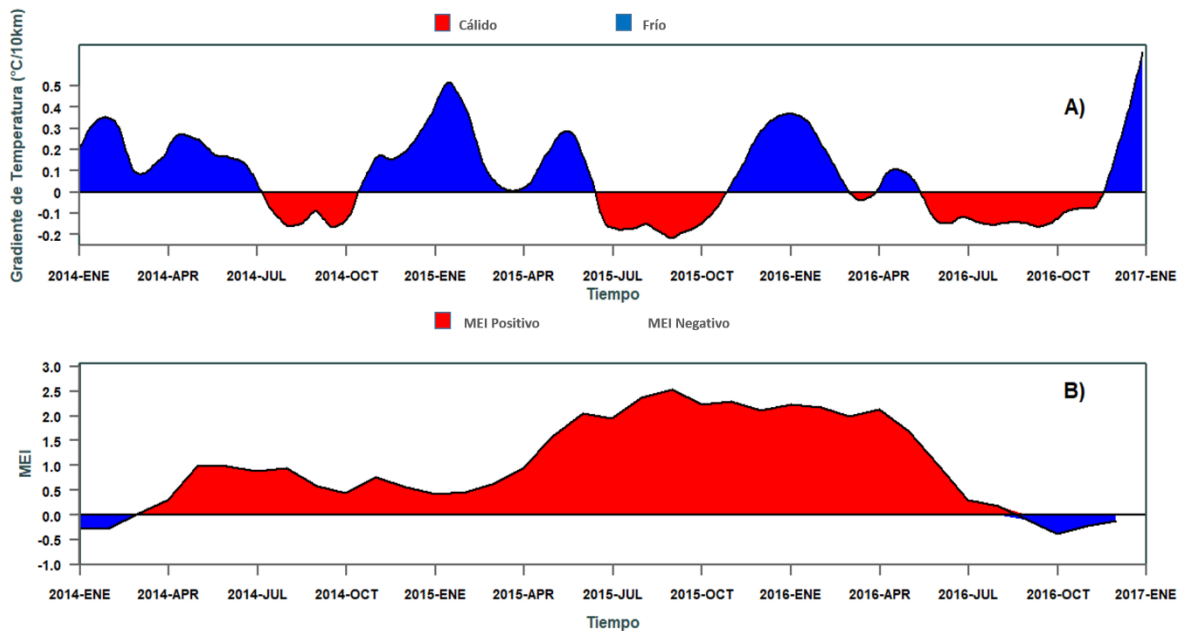


Figura 5.4. a) Gradientes fríos y cálidos en Mazatlán (Copernicus), y b) índice multivariado de ENOS (MEI).

El análisis realizado en este trabajo permite estimar la magnitud de los eventos costeros identificados, pero no discernir de forma unívoca la causa. Existen otros fenómenos que podrían ser responsables de su presencia y/o magnitud. A escalas de tiempo cortas, estos eventos podrían ser influidos por ondas internas, pero su duración es corta en relación con nuestras observaciones (de horas a días; Gerkema y Zimmerman, 2008).

Los remolinos también son responsables del transporte vertical de masas de agua. En el caso de remolinos (o giros) ciclónicos, agua subsuperficial, fría, pobre en oxígeno y rica en nutrientes es transportada a la superficie (Pond y Pickard, 2013). En nuestro caso, identificamos visualmente la presencia de algunos remolinos ciclónicos (Figura 4.6), lo que confirma su contribución a la

formación de eventos costeros fríos. Sin embargo, un análisis detallado escapa de los objetivos de este trabajo.

A nivel regional, y a escalas de tiempo más largas, también podrían influir la oscilación del Pacífico Norte (PDO, por sus siglas en inglés) y El Niño / Oscilación del Sur (ENOS). La PDO tiene una duración de 20 – 30 años y presenta fases frías y cálidas. Por otra parte, el ENOS es un complejo fenómeno acoplado océano – atmósfera, responsable de una fuerte variabilidad climática en la región a escala de pocos años, y se caracteriza por la llegada de aguas cálidas del Pacífico central ecuatorial a las costas mexicanas y cambios en los patrones de los vientos. Tanto PDO como ENOS modulan la profundidad de la termoclina, y por lo tanto la intensidad y los efectos de las surgencias (Lluch-Cota et al., 2001, Herrera-Cervantes et al., 2007). En las fases cálidas la termoclina se hunde, por lo que las surgencias no ocurren o son de menor intensidad. En las fases frías, la termoclina es más superficial, por lo que las surgencias están favorecidas (Herrera-Cervantes et al., 2007).

Uno de los índices utilizados para cuantificar la intensidad de ENOS es el índice multivariado (MEI, por sus siglas en inglés): los valores positivos indican la ocurrencia de condiciones de El Niño, mientras que los valores de MEI negativos indican la ocurrencia de condiciones de La Niña. En nuestro caso, el índice MEI fue negativo (condiciones Niña) tan sólo al principio y final de la serie de tiempo (Figura 5). A partir de febrero de 2014, su valor se hizo algo positivo (condiciones Niño débiles), y su valor llegó a valores máximos históricos desde junio de 2015 hasta abril de 2016, manifestando la presencia del conocido como “Godzilla Niño” (Coria-Monter *et al.*, 2018). Este evento aumentó de forma significativa las temperaturas de invierno en el observatorio de Mazatlán (Herrera-Becerril, 2018), pero no parecería haber afectado de forma notable la presencia (quizás algo la intensidad) de los eventos costeros fríos identificados en este trabajo. Si bien en otros eventos Niño fuertes, como el de 1997-1998, hundieron de forma significativa la termoclina, este efecto durante el Niño 2015-2016 fue mucho menor (Paek *et al.*, 2017), permitiendo el afloramiento de aguas frías con las surgencias (Lluch-Cota, 1999).

6. Conclusiones

Las observaciones *in situ* son demasiado escasas para poder determinar gradientes de temperatura hacia la costa, pero permiten validar otro tipo de productos de mayor cobertura espacial. A partir del modelo de regresión lineal se mostró que las series de SST satelitales y de reanálisis son adecuadas para el análisis local de eventos de surgencia, y sus fiabilidades fueron MODIS > Copernicus > OSTIA.

La serie de OSTIA presentó una buena resolución espacial y temporal para observar con detalle los eventos costeros fríos, pero se descartó debido a la falta de información en el periodo de tiempo de estudio. La serie MODIS presentó escasez de información debido a la presencia de nubes en las imágenes satelitales. La serie que permitió obtener gradientes de temperatura de forma continua fue la serie de Copernicus (reanálisis).

Una inspección visual de las distribuciones de temperatura con la distancia a la costa permitió estimar que los eventos de enfriamiento de las aguas costeras alcanzan unos 30 km, que se usó como distancia máxima para determinar el gradiente de temperatura (índice SSTgrad).

En la serie Copernicus predominaron ligeramente eventos cálidos (36%) sobre los eventos fríos (34%) en el periodo 2014-2016. Los eventos costeros fríos ocurrieron de diciembre a mayo, con máximos en enero y abril. Si bien las causas de estas surgencias pueden ser variadas, muy probablemente fueron causadas por los fuertes vientos de norte que dominan en la región durante el invierno. No hubo surgencias durante el verano, cuando los vientos son débiles y predominantemente del sur, y la termoclina es más profunda.

El periodo de estudio coincidió con el “Niño Godzilla” (2016-2017). Si bien las temperaturas mínimas reflejaron su impacto, el efecto sobre la presencia e intensidad de las surgencias fue pequeño, probablemente debido a que el hundimiento de la termoclina fue mucho menor que en otras ocasiones.

La identificación y cuantificación de la intensidad de las surgencias con SSTgrad pueden contribuir a entender mejor los niveles de oxígeno en zonas costeras afectadas por surgencias, y nos invita a estudiar su relación con otros procesos físicos y bioquímicos como el proceso de fotosíntesis, la respiración o degradación de materia orgánica (Kämpf y Chapman, 2016).

6.1. Limitaciones y perspectivas

Si bien se estimó visualmente la distancia a la costa que alcanzan los eventos fríos, sería recomendable realizar un análisis estadístico más elaborado para determinar la distancia hasta la que ocurre cada evento. Esto nos serviría para determinar la intensidad del evento de surgencia o afloramiento y determinar la extensión espacial de estos fenómenos, que a la vez nos ayudarían a identificar las zonas de afloramientos de productividad primaria.

Aunque la observación de gradientes de temperatura positivos indica la presencia de eventos de agua fría en la costa de Mazatlán, la información disponible en estos momentos no permite determinar con exactitud qué fenómenos causan los afloramientos (por ejemplo, surgencias costeras, remolinos ciclónicos o anticiclónicos). El uso del índice SSTgrad permitió deducir que estos eventos están relacionados con las surgencias. Sería conveniente compararlo con otros índices, como el Índice de Surgencia Costera (CUI, por sus siglas en inglés) para la zona de Mazatlán.

Sería interesante estudiar perfiles verticales de temperatura y crear mapas de temperatura a diferentes profundidades para poder observar la presencia de surgencias y estudiar su variabilidad con la profundidad de la termoclina durante invierno-verano.

Para obtener una climatología de los eventos de surgencia es necesario contar con una serie larga (30 años). Sería conveniente aumentar el periodo de estudio y estudiar el efecto de eventos ENSO en la presencia de surgencias.

La metodología utilizada podría ser empleada para la elaboración de modelos que permitan identificar surgencias de forma automatizada.

Es importante estudiar los eventos de surgencia debido a su impacto a los ecosistemas. Las aguas de surgencia son ricas en nutrientes, fundamentales para la cadena trófica marina. A pesar de que las aguas de surgencia son pobres en oxígeno, en la capa mezclada hay suficiente oxígeno para soportar poblaciones de organismos. Las surgencias pueden ayudar a conocer mejor las dinámicas del oxígeno disuelto y del dióxido de carbono. En estos momentos se está desarrollando una tesis de

maestría que estudia la posible influencia de los eventos de surgencia en los niveles de oxígeno disuelto en aguas superficiales. Sería interesante estudiar la relación del oxígeno en la superficie, afectado por las surgencias, y la producción primaria a través de imágenes satelitales de clorofila.

7. Bibliografía

Adobe (2019). Adobe Premier Pro. <https://www.adobe.com>

Álvarez-Sánchez, L.G., Stevenson M.R. & Wyatt, B. (1978). Circulación y masas de agua en la región de la boca del Golfo de California en la primavera de 1970. *Ciencia Marinas* 5(1), 57-69. <https://doi.org/10.7773/cm.v5i1.314>

Benazzouz, A., Mordanea, S., Orbib, A., Chagdalia, M., Hilm, K., Atillahc, A., Pelegríd, J. & Hervé, D. (2014). An improved coastal upwelling index from sea surface temperature using satellite-based approach – The case of the Canary Current upwelling system. *Continental Shelf Research* 81, 38–54.

Bengtsson, L., Hagemann, S., & Hodges, K.I. (2004). Can climate trends be calculated from reanalysis data? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D11).

Cohen, R.A. (1999). An introduction to PROC LOESS for local regression. In *Proceedings of the twenty-fourth annual SAS users group international conference*, Paper (Vol. 273).

Copernicus. (2019). Access to products - Copernicus. [online] Descargado de: http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=com_csw&view=details&product_id=GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_PHY_001_024 Consultado en 18-09-2019.

Coria-Monter, E., Monreal-Gómez, M.A., de León, D.A.S. & Durán-Campos, E. (2018). Impact of the “Godzilla El Niño” Event of 2015–2016 on Sea-Surface Temperature and Chlorophyll-a in the Southern Gulf of California, Mexico, as Evidenced by Satellite and In Situ Data. *Pacific science*, 72(4), 411-422.

Cushman-Roisin, B & Beckers, J. M. (2011). *Introduction to geophysical fluid dynamics: physical and numerical aspects*. Second edition. Academic Press. 101, 875.

Divulgación Plocan (2017). Afloramientos. Recuperado de: <http://divulgacion.plocan.eu/afloramientos/> Consultado en 25-02-2020

Donlon, C.J., Martin, M., Stark, J., Roberts-Jones, J., Fiedler, E. & Wimmer, W. (2012). The Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis (OSTIA) system. *Remote Sensing of Environment*, 116, 140-158.

Eddies in the ocean. (2020). Recuperado de: http://tornado.sfsu.edu/Geosciences/classes/m407_707/Monteverdi/Satellite/Oceanography/eddy.htm Consultado en 27-01-2020.

Gerkema, T. & Zimmerman, J.T.F. (2008). *An introduction to internal waves*. Lecture Notes, Royal NIOZ, Texel, 207.

Gómez, R. C. C., Gómez, M. A. M., & Bulgakov, S. N. (2008). Efectos de los vórtices en sistemas acuáticos y su relación con la química, biología y geología. *Interciencia*, 33(10), 741-746.

Herrera-Becerril, C.A. (2018). Evolución de la temperatura superficial del mar en el Observatorio Costero de Mazatlán (1973-2016). Universidad Nacional Autónoma de México. México, 47.

Kämpf, J. & Chapman, P. (2016). *Upwelling systems of the world*. Springer International Publishing Switzerland, 433.

Khorram, S., Van der Wiele, C.F., Koch, F.H., Nelson, S.A., Potts, M.D. (2016). *Principles of Applied Remote Sensing*. Springer. New York, 307.

Lalli, C. & Parson, T.R. (1997). *Biological Oceanography: An Introduction*, Second Edition. Elsevier. Maarssen, Netherlands, 320.

Lara-Lara, J.R., Arenas-Fuentes, V., Bazán-Guzmán, C., Díaz-Castañeda, V., Escobar-Briones, E., García-Abad, M.C., Gaxiola-Castro, G., Robles-Jarero, G., Sosa-Ávalos, R., Soto-González, L.A., Tapia-García, M., Valdez-Holguín, J.E., Bezaury-Creel, J., Millán-Núñez, R. (2008). Los ecosistemas marinos, en *Capital natural de México*, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Conabio, México, 135-159.

Lavín, M. F., & Marinone, S.G. (2003). An overview of the physical oceanography of the Gulf of California. In *Nonlinear Processes in geophysical fluid dynamics*. Springer, Dordrecht. 173-204.

Lavín, M. F., Castro, R., Beier, E., Cabrera, C., Godínez, V. M. & Amador-Buenrostro, A. (2014). Surface circulation in the Gulf of California in summer from surface drifters and satellite images (2004–2006). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(7), 4278-4290. <https://doi.org/10.1002/2013JC009345>

Lluch-Cota, D.B., Wooster, W. S. & Hare, S. R. (2001) Sea surface temperatura variability in the coastal areas of the northeastern Pacific related to the El Niño-Southern Oscillation and the Pacific Decadal Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 28(10), 2029-2032.

Lluch-Cota, S.E., (1999). Coastal upwelling in the eastern Gulf of California, *Oceanologica Acta*, 23(6), 731-740.

MacKenzie, B.R. & Schiedek, D. (2007). Long-term sea surface temperature baselines—time series, spatial covariation and implications for biological processes. *Journal of Marine Systems*, 68(3-4), 405-420.

Miller, R. L., Del Castillo, C. E., & McKee, B. A. (Eds.). (2005). *Remote sensing of coastal aquatic environments*. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 7, 345.

Millero, F. J. (2013). *Chemical oceanography*. Fourth Edition, CRC Press, New York, USA. 591.

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Sea Surface Temperature Data; 2018 Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA. doi: [10.5067/AQUA/MODIS/L2/SST/2014](https://doi.org/10.5067/AQUA/MODIS/L2/SST/2014) Consultado en 17-09-2019.

NOAA. (2018). What is upwelling? National Ocean Service website, Recuperado de: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/upwelling.html> Consultado en 01-02-2019.

NOAA FISHERIES. (2020). Northwest Fisheries Science Center. Coastal upwelling. Recuperado de: <https://www.nwfsc.noaa.gov/research/divisions/fe/estuarine/oeip/db-coastal-upwelling-index.cfm#CU-01> Consultado en 28-03-2020.

Paek, H., Yu, J. Y. & Qian, C. (2017). Why were the 2015/2016 and 1997/1998 extreme El Niños different?. *Geophysical Research Letters*, 44(4), 1848-1856.

Parés-Sierra, A., Mascarenhas, A., Marinone, S. G., & Castro, R. (2003) Temporal and spatial variation of the surface winds in the Gulf of California. *Geophysical Research Letters*, 30(6), 1312, 451-454. doi:10.1029/2002GL016716

Pisoni, J.P., Rivas, A.L. & Piola, A.R. (2014). Satellite remote sensing reveals coastal upwelling events in the San Matías Gulf—Northern Patagonia. *Remote Sensing of Environment*, 152, 270-278.

Pond, S., & Pickard, G.L. (2013). *Introductory Dynamical Oceanography*, Second Edition. Elsevier, Boston, 349.

Portela, E., Beier, E., Barton, E. D., Castro, R., Godínez, V., Palacios-Hernández, E., Fiedler, P.C., Sánchez-Velasco, L. & Trasviña, A. (2016). Water masses and circulation in the tropical Pacific off central Mexico and surrounding areas. *Journal of Physical Oceanography*, 46(10), 3069-3081.

QGIS Development Team (2019). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>

R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>

Roden, G.I. & Emilson, I. (1979). Physical oceanography of the Gulf of California. In: Ayala-Castañares A., F.B. Phleger, R. Schwartzlose & A. Laguarda (ed.) *A Simposio, El Golfo de California*, Manuscrito no publicado. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, 1-46.

Roden, G.I. (1964) Oceanographic Aspects of Gulf of California. En Van Aridal, T.H. y G. G. Jr. Shor (ed.), *A Symposium, Marine Geology of the Gulf of California*, Sripss Institution of Oceanography, University of California American, Association of Petroleum Geologists, Oklahoma, EUA, 30-58.

Sánchez-Cabeza, J. A., Álvarez Sánchez, L. F., Cardoso-Mohedano, J. G., Escalante Mancera, E., Díaz-Asencio, M., López-Rosas, H., M.L., Merino-Ibarra M., Ruiz-Fernández A.C., Alonso-Rodríguez R., Gómez-Ponce M.A., Ávila-Torres E., Serguei Rico-Esenaro S. & Gómez-Ponce, M. A. (2019). A low-cost long-term model of coastal observatories of global change. *Journal of Operational Oceanography*, 12(1), 34-46. DOI:10.1080/1755876X.2018.1533723

Soto-Mardones, L., Marinone, S. G., & Parés-Sierra, A. (1999). Time and spatial variability of sea Surface temperatura in the Gulf of California. *Ciencias Marinas*, 25(1), 1–30.

Stramma, L., Johnson, G. C., Firing, E., & Schmidtko, S. (2010). Eastern Pacific oxygen minimum zones: Supply paths and multidecadal changes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C9).

8. Anexo 1

Video	URL
Video Modis_SST_G	http://hdl.handle.net/20.500.12201/11213
Video Modis_SST_C	http://hdl.handle.net/20.500.12201/11214
Video Modis_SST_CyG	http://hdl.handle.net/20.500.12201/11215
Video MODIS ejemplos	http://hdl.handle.net/20.500.12201/11216
Video OSTIA_SST_G	http://hdl.handle.net/20.500.12201/11217
Video OSTIA_SST_C	http://hdl.handle.net/20.500.12201/11218
Video OSTIA_SST_CyG	http://hdl.handle.net/20.500.12201/11219
Video OSTIA ejemplos	http://hdl.handle.net/20.500.12201/11220
Video SST_Copernicus	http://hdl.handle.net/20.500.12201/11221