



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA**

Variabilidad temporal de los Florecimientos Algales Nocivos (FAN) en Bahía de Manzanillo y su relación con la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y la clorofila-a (Cl-a) determinadas por percepción remota satelital.

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS

PRESENTA:

**SONIA CAMPOS CERDÁN**

**TUTOR PRINCIPAL:**

DR. RAÚL AGUIRRE GÓMEZ  
(INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM)

**MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:**

DRA. ROSALBA ALONSO RODRÍGUEZ  
(INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM)

DRA. OLIVIA SALMERÓN GARCÍA  
(INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM)

DR. SERGIO CERDEIRA ESTRADA  
(COMISIÓN NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO DE LA BIODIVERSIDAD)

DR. RAMÓN SOSA ÁVALOS  
(CENTRO UNIVERSITARIO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS, UCOL)

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. ABRIL 2024



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.

## Índice

Resumen .....	i
Abstract.....	ii
1. Introducción .....	1
1.1 Antecedentes .....	5
1.2 Justificación .....	8
1.3 Hipótesis y objetivos.....	9
2. Marco teórico .....	10
2.1 FAN: especies y efectos nocivos .....	10
2.2 FAN: condiciones ambientales y procesos oceanográficos relacionados.....	15
2.3 FAN: variabilidad temporal .....	23
2.4 Percepción remota satelital: aspectos teóricos básicos .....	27
2.5 Sensores remotos empleados en el estudio de los océanos.....	33
2.6 Estudio de los FAN mediante percepción remota satelital .....	36
3. Área de estudio.....	46
3.1 Ubicación geográfica y clima .....	46
3.2 Corrientes oceánicas superficiales y vientos dominantes .....	48
3.3 Surgencias costeras eólicas y ENOS en la Bahía de Manzanillo.....	49
4. Materiales y métodos .....	51
4.1 Recolección de datos .....	51
4.2 Preparación de los datos .....	53
4.3 Análisis de los datos mensuales: análisis espectral y análisis de coherencia .....	55
4.4 Análisis de los datos diarios de la TSM y la clorofila- <i>a</i> : diagramas de dispersión y análisis de regresión líneal.....	58
5. Resultados y análisis de resultados .....	61
5.1 Registro de FAN para la década 2003-2013 .....	61
5.2 Variabilidad temporal de los FAN en la mesoescala: datos mensuales.....	68
5.3 Variabilidad temporal de los FAN en la mesoescala: datos diarios.....	75
5.4 Variabilidad temporal de los FAN en la macroescala: datos anuales .....	91
6. Conclusiones .....	103
7. Referencias bibliográficas .....	106
8. Anexo: catálogo de imágenes satelitales de TSM y clorofila- <i>a</i> correspondientes a fechas de reporte de FAN en Bahía de Manzanillo 2003-2013.....	- 1 -

## Agradecimientos

- Al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. Por la oportunidad brindada para continuar con mi formación académica.
- Al CONAHCYT por la beca otorgada para la realización de mis estudios de posgrado.
- Al Dr. Raúl Aguirre Gómez. Por su gran apoyo, paciencia, tiempo y conocimiento brindados, como tutor principal de mi tesis.
- A cada uno de los doctores integrantes del Jurado de Examen de Grado: Dra. Rosalba Alonso Rodríguez, Dra. Olivia Salmerón García, Dr. Sergio Cerdeira Estrada y al Dr. Ramón Sosa Ávalos. Por su tiempo, su conocimiento, su asesoría y su gran ayuda para la realización de este trabajo.
- Al Dr. Alejandro Morales Blake, que proporcionó la base de datos de registros de FAN, la cual fue indispensable para la realización de este trabajo, además de brindar su apoyo, tiempo y conocimiento a lo largo de este trabajo.
- Al Dr. Sergio Cerdeira Estrada, nuevamente, ya que proporcionó las imágenes satelitales mensuales que fueron esenciales para la realización de este trabajo.

## **Agradecimientos personales**

- A Dios, te agradezco por absolutamente todo. Por tu presencia, por tu Palabra, tu sabiduría, por tu consejo, tu disciplina, tu perdón, por tus propósitos, tu amor perfecto, por la vida nueva que solo tú puedes ofrecer...

*Confía en Dios de todo corazón y no te apoyes en tu propia inteligencia.*

Proverbios 3:5 (NVI)

- A mi papá, mi mamá y mi hermanito, por su compañía y su amor...
- A las amistades, por la invaluable compañía y aprendizaje

## Resumen

Los efectos adversos ocasionados por los Florecimientos Algales Nocivos (FAN) han generado una creciente necesidad de monitorear la variabilidad temporal de estos fenómenos. En este sentido, el análisis de series de tiempo de datos satelitales de variables asociadas a la ocurrencia de FAN, tales como la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y la clorofila-*a*, aportan información relevante. En el presente trabajo, para la década 2003-2013, a partir del análisis de series de tiempo de los FAN, la TSM y la clorofila-*a*, se observó que el valor más alto de coherencia entre estas variables ocurrió a los 12 meses, (FAN-clorofila-*a*=0.5; FAN-TSM=0.6), lo que indica la posible influencia de procesos de mesoescala, como la temporada de surgencias eólicas en primavera, sobre la variabilidad temporal de los FAN. Dicha posible influencia también fue observada en los promedios mensuales de las variables de estudio, ya que de marzo a mayo se registraron los valores más bajos de TSM (25 °C), las concentraciones más altas de clorofila-*a* (5.8-8.4 mg/ m<sup>3</sup>) y el mayor número de días de FAN. Además, empleando imágenes satelitales diarias de la TSM, se observó que el 84% de los FAN ocurrieron posiblemente en condiciones de surgencia, ya que presentaron cambios de al menos 1.7 °C en un lapso de uno a diez días previos, posteriores o correspondientes al reporte de FAN. Por otro lado, se registró un valor de coherencia de 0.4 entre los FAN y la TSM a los 2.3 años, indicando la posible influencia de procesos de macroescala como El Niño Oscilación del Sur (ENOS) y de la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) sobre la ocurrencia de los FAN. Asimismo, en 2007 y 2010 se registró el mayor número de días de FAN, coincidiendo con la fase negativa de ENOS y de la ODP. Contrastantemente en 2006 no hubo ningún registro de FAN, coincidiendo con la fase positiva de ENOS y con la fase neutra de la ODP. Se observó que, los datos satelitales con resolución temporal de un mes fueron adecuados para estudiar los FAN en la mesoescala y la macroescala . Mientras que, una de las limitaciones del uso de datos satelitales con resolución temporal de un día, fue la baja disponibilidad de datos debido a la nubosidad, en especial para el caso de la clorofila-*a*. Se recomienda considerar las limitaciones y alcances de los datos satelitales para emplearlos óptimamente y complementar con otros métodos.

**Palabras clave:** FAN, variabilidad temporal, surgencias, ENOS, TSM, clorofila-*a*, percepción remota satelital.

## Abstract

The adverse effects caused by Harmful Algal Blooms (HABs) have generated a growing need to monitor the temporal variability of these phenomena. In this sense, the analysis of time series of satellite data of variables associated with the occurrence of HABs, such as Sea Surface Temperature (SST) and chlorophyll-*a*, provides relevant information. In this work, for the decade 2003-2013, based on the analysis of time series of HABs, SST and chlorophyll-*a*, it was observed that the highest value of coherence between these variables occurred at 12 months, (HABs-chlorophyll-*a*=0.5; HABs-SST=0.6), indicating the possible influence of mesoscale processes, such as the wind upwelling season in spring, on the temporal variability of the HABs. This possible influence was also observed in the monthly averages of the study variables, since from March to May the lowest SST values (25 °C), the highest concentrations of chlorophyll-*a* (5.8-8.4 mg/ m<sup>3</sup>) and the greatest number of days of HABs, were recorded. Furthermore, using daily satellite images of the SST, it was observed that 84% of the HABs possibly occurred under upwelling conditions, since they presented changes of at least 1.7 °C in a period of one to ten days before, after or corresponding to the HAB report. On the other hand, a coherence value of 0.4 was recorded between the HAB and the SST at 2.3 years, indicating the possible influence of macroscale processes such as the El Niño Southern Oscillation (ENSO) and the Pacific Decadal Oscillation (PDO). on the occurrence of HABs. Likewise, in 2007 and 2010 the highest number of HAB days was recorded, coinciding with the negative phase of ENSO and the PDO. In contrast, in 2006 there was no HAB record, coinciding with the positive phase of ENSO and the neutral phase of the PDO. It was observed that satellite data with one-month temporal resolution were suitable for studying HABs at the mesoscale and macroscale. While one of the limitations of the use of satellite data with one-day temporal resolution was the low availability of data due to cloudiness, especially in the case of chlorophyll-*a*. It is recommended to consider the limitations and scope of satellite data to use them optimally and complement them with other methods.

Keywords: HABs, temporal variability, upwelling, ENSO, SST, chlorophyll-*a*, satellite remote sensing.

## 1. Introducción

Se define como Florecimiento Algal Nocivo (FAN) al desarrollo masivo de fitoplancton que ejerce un impacto negativo sobre el ecosistema (Stumpf y Tomlinson, 2005). Los FAN pueden estar conformados por una o más especies, aunque generalmente una especie es dominante (Pettersson y Pozdnyakov, 2013; Anderson *et al.*, 2001). De manera general, se distinguen tres principales tipos de organismos formadores de FAN: 1) los productores de ficotoxinas que pueden afectar al humano, 2) los productores de sustancias ictiotóxicas y 3) los que producen una alta biomasa y que pueden ocasionar hipoxia o anoxia en el ambiente en que ocurren, e incluso pueden ocasionar daños mecánicos, como la obstrucción de branquias de organismos (Pettersson y Pozdnyakov, 2013; Anderson *et al.*, 2001). Cabe mencionar que hay algunos organismos que tienen más de una de estas características (Tabla 1). El amplio rango de efectos adversos que ocasionan los FAN abarca desde daños a la economía y la salud ambiental hasta graves daños en la salud pública.

La necesidad de mitigar los impactos negativos que los FAN ocasionan ha generado un creciente interés por el estudio de estos fenómenos. Inicialmente el estudio de los FAN se enfocaba en un marco espaciotemporal limitado (Pettersson y Pozdnyakov, 2013), que de acuerdo con la clasificación de Orlanski (1975) corresponde a la mesoescala (Figura 1). Sin embargo, esta situación cambió con la implementación de programas interdisciplinarios de monitoreo de FAN iniciados en Norteamérica (Chang y Dickey, 2008). A partir de la información recabada de dichos programas se observó que, los FAN están modulados por la interacción de procesos físicos, químicos y biológicos que oscilan desde la microescala hasta la macroescala espaciotemporal (Pitcher *et al.*, 2010; Chang y Dickey, 2008) (Figura 2). Por ejemplo, se ha observado que procesos de macroescala como el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) (Cortés-Altamirano *et al.* 2019) hasta procesos de microescala como la turbulencia influyen en el desarrollo de los FAN (Chang y Dickey, 2008; Pitcher *et al.*, 2010). En este sentido, el estudio de la variabilidad temporal de los FAN en la Bahía de Manzanillo, en diferentes escalas temporales, es una aproximación útil para una mejor comprensión de estos fenómenos.

En cuanto al estudio de la variabilidad temporal de los FAN, se ha observado que, debido a que esta oscila en un amplio rango, para una mejor comprensión se requiere del análisis de

largas series de tiempo de las diferentes variables asociadas a la ocurrencia de los FAN. Sin embargo, es complicado llevar a cabo registros a largo plazo de las múltiples variables físicas, químicas y biológicas asociadas a la ocurrencia de FAN, en la micro, meso y macroescala espaciotemporal. Por lo cual, gran parte del conocimiento generado sobre los FAN deriva de análisis meticulosos de datos limitados (Cullen, 2008) derivados de muestreos puntuales y programas de investigación a corto plazo (Band-Schmidt *et al.*, 2013).

No obstante, una buena aproximación a la comprensión de la variabilidad temporal de los FAN puede ser generada a partir del análisis de series de tiempo de datos derivados de percepción remota satelital. Las mediciones por sensores a bordo de satélites permiten coleccionar, de manera regular, datos de variables relevantes para el monitoreo y detección de los FAN como son, entre las principales, la estimación de la concentración de clorofila-*a* y la Temperatura Superficial del Mar (TSM) (Pettersson y Pozdnyakov, 2013; Cullen, 2008). Por lo cual, el objetivo del presente trabajo es analizar la variabilidad temporal, de la ocurrencia de los FAN y su relación con la TSM y la clorofila-*a* determinadas por sensores satelitales, en la Bahía de Manzanillo, Colima, durante el periodo 2003-2013. Es importante mencionar que, en el presente trabajo no se incluyó un análisis espacial, ya que los datos de reportes de FAN disponibles provienen de muestreos *in situ* correspondientes únicamente a la Bahía de Manzanillo.

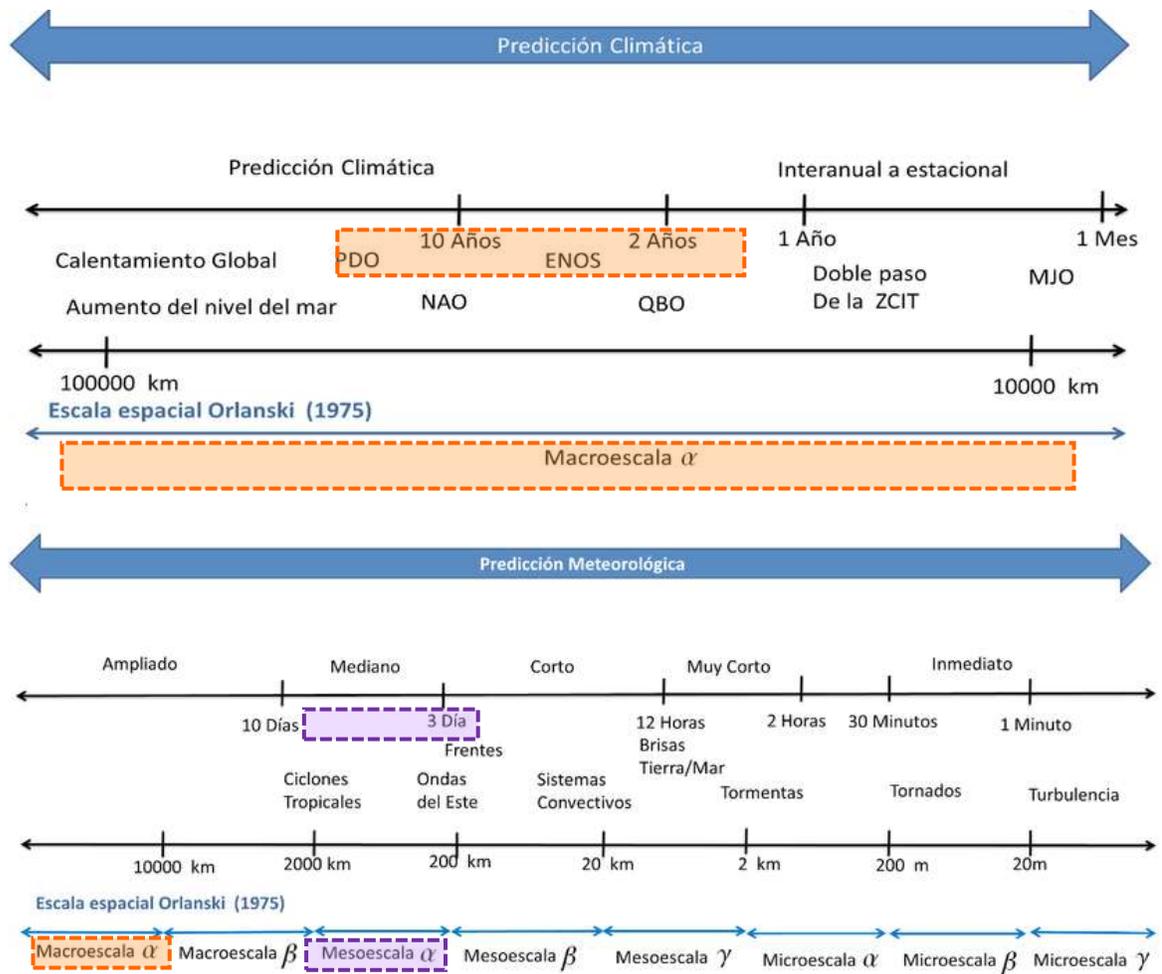


Figura 1. Escalas espaciales y temporales de predicción climática (arriba) y meteorológica (abajo) de acuerdo con la clasificación de Orlanski (1975). Se resaltan con color naranja la macroescala- $\alpha$  y en color morado la mesoescala- $\alpha$  a, ya que, en estas escalas ocurren las surgencias y el fenómeno ENOS asociados a la ocurrencia de FAN en el área de estudio. Modificado de Díaz-Guevara (2017).

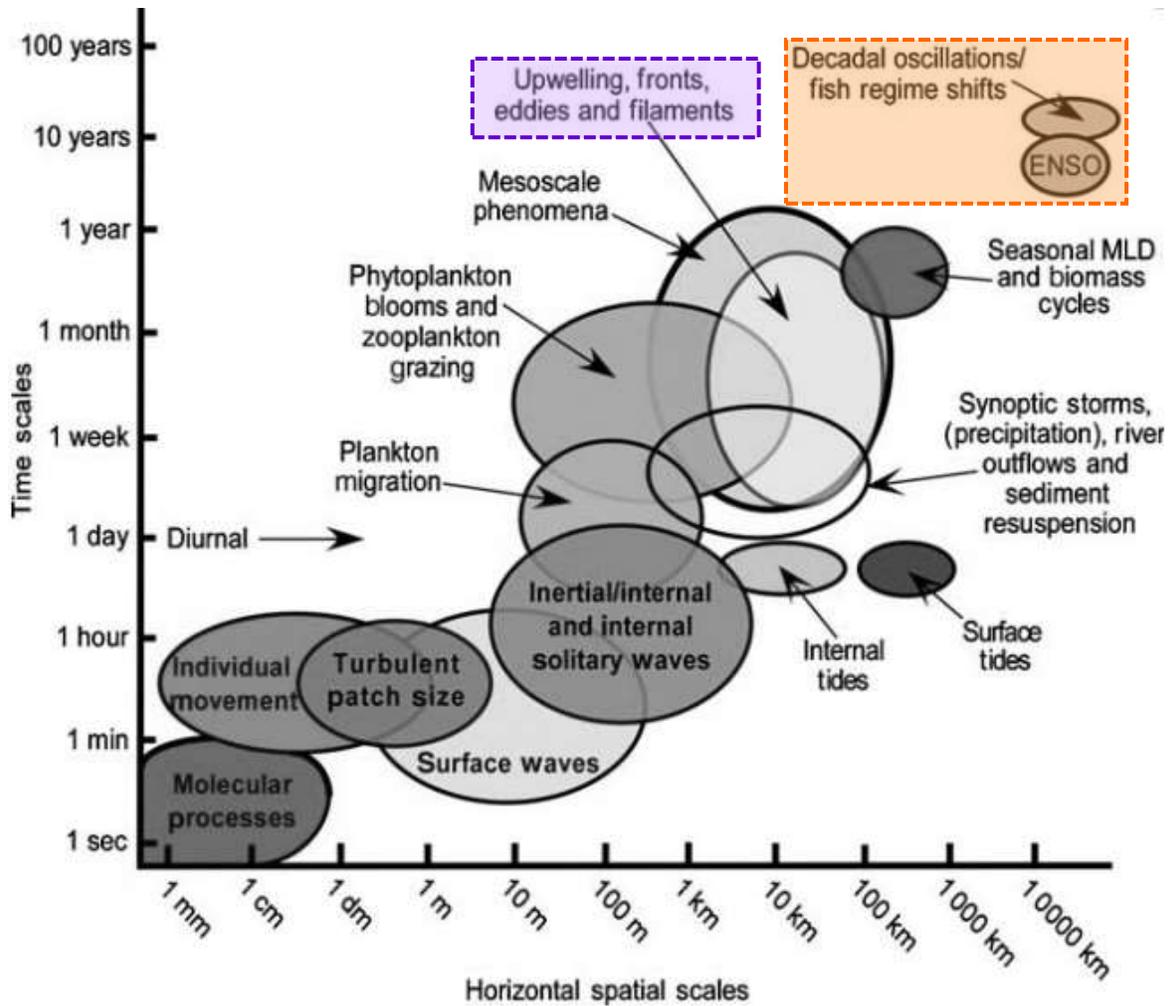


Figura 2. Diagrama de las escalas espaciotemporales de algunos procesos relacionados con el desarrollo de los FAN. Se resaltan con color los procesos oceanográficos-atmosféricos asociados a la ocurrencia de FAN en el área de estudio. Con color morado se señalan los procesos de surgencias, que de acuerdo con la clasificación de Orlanski (1975) ocurren en la mesoescala- $\alpha$ . Y con color naranja se resaltan el fenómeno ENOS y la ODP, que ocurren en la macroescala  $\alpha$  (Orlanski, 1975). Tomado de Chang y Dickey (2008).

## 1.1 Antecedentes

Los primeros registros de FAN en la Bahía de Manzanillo corresponden a inicios de la década de los ochenta (Quijano-Scheggia *et al.*, 2016) y desde 1986 se han realizado monitoreos sistemáticos (Hernández-Becerril *et al.*, 2007). Con base en los registros históricos, se ha observado que los FAN en la Bahía de Manzanillo han afectado principalmente la salud ambiental y algunas actividades económicas. Entre los impactos negativos sobre la salud ambiental se encuentran, la muerte de peces, la generación de coloración y mal olor de parcelas de agua y la contaminación de productos pesqueros con ficotoxinas. A su vez, el daño ambiental ha ocasionado pérdidas económicas como resultado de daños a la estética de paisajes turísticos, implementación de vedas sanitarias, destrucción de producto pesquero contaminado con ficotoxinas (bivalvos), etcétera (COFEPRIS; 2016; Quijano-Scheggia *et al.*, 2016).

Respecto al impacto que los FAN han ocasionado en la salud pública en la Bahía de Manzanillo, aunque no se han registrado intoxicaciones humanas, existe riesgo sanitario asociado a la presencia de ficotoxinas. Si bien en la Bahía de Manzanillo no se realiza el cultivo ni extracción comercial de productos pesqueros que pueda ser contaminado con ficotoxinas, sí se lleva a cabo el almacenamiento temporal de dicho producto en zonas con ocurrencia de FAN, así como la práctica de pesca furtiva, lo cual representan un riesgo para la salud pública (COESPRIS, s.f.). Adicionalmente, es importante considerar que, aunque la principal vía de intoxicación humana es a través del consumo de mariscos contaminados, existen otras vías de intoxicación (Tabla 2) como la intoxicación a través de aerosoles, de agua contaminada, entre otros vectores no tradicionales, por lo que debe prestarse atención al respecto.

La ficotoxina más frecuente que se presenta en la Bahía de Manzanillo es la saxitoxina, la cual puede ocasionar intoxicación paralizante y cuya presencia ha sido atribuida al dinoflagelado *Gymnodinium catenatum*, que es una de las especies más frecuentes en la bahía (Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Quijano-Scheggia *et al.*, 2016). Otra ficotoxina reportada es el ácido okadaico, el cual puede ocasionar intoxicación diarreica y su presencia en la Bahía de Manzanillo se adjudica a dinoflagelados del género *Dinophysis*. Con menor frecuencia se

han reportado diatomeas del género *Pseudo-nitzschia*, asociadas a la producción de ácido domoico, el cual puede generar intoxicación amnésica (COFEPRIS, 2016).

Finalmente, otras especies formadoras de FAN que se presentan con alta frecuencia en la Bahía de Manzanillo son el dinoflagelado *Margalefidinium polykrikoides* (Hernández-Becerril *et al.*, 2007) productor de ictiotoxinas y el ciliado *Mesodinium rubrum* (Quijano-Scheggia *et al.*, 2016), el cual, aunque no produce toxinas puede generar florecimientos de alta biomasa. Si bien, *M. polykrikoides* y *M. rubrum* no producen patologías en humanos, es relevante mencionarlas ya que son de las especies más frecuentes que ocasionan alertas sanitarias en las costas mexicanas (Hernández-Becerril *et al.*, 2007), incluyendo la Bahía de Manzanillo (Quijano-Scheggia *et al.*, 2016; COFEPRIS, 2016). Para el periodo de estudio del presente trabajo, durante florecimientos de *M. rubrum*, ocurridos en los años 2009, 2012 y 2013, se reportaron manchas de color intenso y acumulación de medusas (COFEPRIS, 2016). Por otro lado, en 2012 se reportó la implementación de veda sanitaria como consecuencia de la presencia de un florecimiento formado por *M. polykrikoides* y *G. catenatum*, el cual ocasionó la muerte de peces (COFEPRIS, 2016). Cabe mencionar que, en dicho florecimiento la especie ictiotóxica *M. polykrikoides* fue la más dominante (COFEPRIS, 2016).

En cuanto a la variabilidad temporal de los FAN en la Bahía de Manzanillo, se ha sugerido su asociación a diferentes factores ambientales y antropogénicos (Sierra-Beltrán *et al.*, 2004; Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Morales-Blake *et al.*, 2013; Olivos-Ortiz *et al.*, 2016). En el aspecto ambiental, se ha observado que los FAN presentan cierta relación con cambios de las condiciones oceanográficas en la mesoescala y macroescala. En la mesoescala se ha observado que, los FAN ocurren generalmente en los meses de invierno-primavera, coincidiendo con la presencia de surgencias costeras (Sierra-Beltrán *et al.*, 2004; Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Morales-Blake *et al.*, 2013). Mientras que, en la macroescala, se ha observado que en algunos periodos en los que predominó la fase fría del fenómeno ENOS, ocurrió un incremento en el número de días de FAN (Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Vega-Juárez, 2014). En el aspecto antropogénico, se ha especulado que el aumento de actividades en el puerto de Manzanillo ha ocasionado un incremento en la frecuencia e intensidad de los FAN en la bahía (Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Olivos-Ortiz *et al.*, 2016).

Los principales parámetros empleados en el estudio de la variabilidad temporal de los FAN han sido los que proporcionan información sobre las condiciones oceanográficas (Sierra-Beltrán *et al.*, 2004). En la Bahía de Manzanillo y otras localidades del Pacífico Central Mexicano (PCM) se han empleado principalmente datos de la densidad del agua, concentración de nutrientes (Morales-Blake *et al.*, 2013; Vega-Juárez, 2014), la TSM y de la clorofila-*a* (Sosa-Ávalos *et al.*, 2015; Vega-Juárez, 2014; Morales-Blake *et al.*, 2013). Asimismo, se han utilizado mediciones de variables atmosféricas como la velocidad del viento (Vega-Juárez, 2014). En dichos estudios, se ha sugerido que la ocurrencia de FAN está relacionada con los procesos oceanográficos-atmosféricos que promueven la fertilización de la zona eufótica, tales como las surgencias (Morales-Blake *et al.*, 2013; Vega-Juárez, 2014), la fase fría de ENOS (Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Vega-Juárez, 2014) y la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) (Cortés-Altamirano *et al.*, 2019).

Una de las técnicas empleadas para el estudio de los FAN en la Bahía de Manzanillo y otras regiones del PCM es la percepción remota satelital. Los principales productos satelitales empleados son datos de la concentración de clorofila-*a* y de la TSM (Morales-Blake *et al.*, 2013; Vega-Juárez, 2014; Gómez-Villarreal *et al.*; 2008). En estos trabajos, los datos satelitales han permitido identificar con mayor claridad la influencia de procesos oceanográficos de mesoescala y macroescala relacionados con la evolución de los FAN (Morales-Blake *et al.*, 2013; Vega-Juárez, 2014; Gómez-Villarreal *et al.*; 2008), en comparación con datos de muestreo *in situ*, que se han acotado principalmente a registros puntuales o a corto plazo de FAN observados en la bahía y otras zonas del PCM (Morales-Blake *et al.*, 2013; Vega-Juárez, 2014; Gómez-Villarreal *et al.*; 2008).

## **1.2 Justificación**

Los FAN se presentan de manera recurrente en la Bahía de Manzanillo generando diversos efectos adversos principalmente en actividades económicas y en la salud ambiental. Aunque los registros históricos de la ocurrencia de FAN en la Bahía de Manzanillo han permitido comprender parcialmente su variabilidad temporal, no ha sido posible identificar cuáles son los principales moduladores ambientales de la ocurrencia de los FAN y la escala temporal en la que influyen principalmente dichos moduladores. Una contribución al estudio de la variabilidad temporal de los FAN puede ser realizada empleando técnicas de percepción remota satelital. Los datos derivados de sensores satelitales permiten construir series de tiempo de algunas variables asociadas a la evolución temporal de los FAN, tales como la TSM y la clorofila-*a*, proporcionando información útil para su estudio.

### 1.3 Hipótesis y objetivos

Hipótesis: Los FAN en la Bahía de Manzanillo están modulados por procesos atmosféricos-oceanográficos de mesoescala, como las surgencias eólicas, y de macroescala como ENOS. Por lo tanto, el análisis de series de tiempo de parámetros indicadores de dichos procesos atmosféricos-oceanográficos, como lo son: la TSM y la concentración de clorofila-*a*, mostrarán correlación significativa con los FAN en la mesoescala y la macroescala.

Objetivo general:

- Analizar la variabilidad temporal de la ocurrencia de FAN y su relación con la TSM y la clorofila-*a* determinadas por sensores satelitales, en la Bahía de Manzanillo Colima, durante el periodo 2003-2013.

Objetivos particulares:

- Identificar la influencia de las surgencias costeras sobre la variabilidad temporal de los FAN en la mesoescala, empleando datos satelitales mensuales y diarios de la TSM y de la clorofila-*a* como variables indicadoras de surgencias.
- Evaluar la influencia de ENOS sobre la variabilidad temporal de los FAN en la macroescala, empleando el Índice Multivariado ENOS y datos satelitales mensuales de la TSM y de la clorofila-*a* como variables indicadoras de ENOS.
- Describir los principales alcances y limitaciones del uso de datos satelitales de la TSM y de la clorofila-*a* para el estudio de los FAN en la Bahía de Manzanillo.

## **2. Marco teórico**

### **2.1 FAN: especies y efectos nocivos**

Los FAN son fenómenos diversos y complejos en cuanto a su composición taxonómica y nocividad. La composición de especies de cada evento determina en gran medida el tipo de efecto nocivo generado y la respuesta a las condiciones ambientales. Lo que, a su vez determina la escala espacial y temporal en que ocurren estos eventos (Pettersson y Pozdnyakov, 2013).

En cuanto a la diversidad biológica de los FAN, se conoce que son varios los grupos funcionales del fitoplancton responsables de la formación de estos eventos. Principalmente los FAN son generados por dinoflagelados, pero también hay especies de diatomeas, cianobacterias, prymnesiofíceas y rafidofíceas, que ocasionan este tipo de florecimientos (Tabla 1). De manera general, se distinguen tres principales tipos de organismos formadores de FAN: 1) los productores de ficotoxinas que pueden afectar al humano, 2) los productores de sustancias ictiotóxicas y 3) los que producen una alta biomasa y pueden ocasionar hipoxia o anoxia en el ambiente en que ocurren. Cabe mencionar que hay algunos organismos que tienen más de una de estas características (Pettersson y Pozdnyakov, 2013).

Los efectos adversos provocados por los FAN afectan tres principales rubros: salud pública, actividades económicas y salud ambiental. Por un lado, algunas especies producen ficotoxinas que se transmiten al humano a través de la cadena alimenticia, por aerosoles transportados por el oleaje o por el consumo de agua contaminada, provocando síndromes gastrointestinales, neurológicos y otras afecciones (Tabla 2). Asimismo, tanto las especies que generan patologías en el humano, como las productoras de sustancias ictiotóxicas y las especies productoras de alta biomasa, pueden ocasionar efectos adversos en la salud ambiental y en las actividades económicas. Algunos de los efectos son: mortandad masiva de organismos cultivados y silvestres por daño mecánico, hipoxia o intoxicación, producción de color, espuma y mal olor en el agua; lo que en conjunto afecta al turismo, a la acuicultura, a la pesca y la salud ambiental en general (Tabla 1) (García-Mendoza *et al.*, 2016).

Tabla 1. Efectos producidos por los FAN y algunas especies causantes, en ambientes marinos.

Clasificación general	Descripción efecto nocivo	Ejemplos de organismos causantes
Productores de alta biomasa	En función de las condiciones ambientales algunas especies pueden alcanzar concentraciones celulares muy altas, generando un consumo elevado de oxígeno. Lo cual, puede generar condiciones de hipoxia o anoxia y ocasionar la asfixia de peces e invertebrados	<p><b>Dinoflagelados</b></p> <p><i>Gonyaulax polygramma</i>, <i>Noctiluca acuminata</i>  <i>scintillans</i>, <i>Scrippsiella</i>  <i>(Scrippsiella trochoidea)</i></p> <p><b>Cyanobacterias</b></p> <p><i>Trichodesmium erythraeum</i></p>
	Intoxicación paralizante por consumo de mariscos	<p><b>Dinoflagelados</b></p> <p><i>Alexandrium catenella</i> (<i>Alexandrium acatenella</i>), <i>A. cohorticula</i>, <i>A. fraterculus</i>, <i>A. minutum</i>, <i>A. tamarense</i>, <i>Gymnodinium catenatum</i>, <i>Pyrodinium bahamense</i> var. <i>compressum</i></p>
Productores de toxinas que afectan al humano	Intoxicación diarreica por consumo de mariscos	<p><b>Dinoflagelados</b></p> <p><i>Dinophysis acuta</i>, <i>D. acuminata</i>, <i>D. fortii</i>, <i>D. norvegica</i>, <i>Phalacroma mitra</i> (<i>D. mitra</i>), <i>Phalacroma rotundata</i> (<i>D. rotundata</i>), <i>Prorocentrum lima</i></p>
	Intoxicación amnésica por consumo de mariscos	<p><b>Diatomeas</b></p> <p><i>Pseudo-nitzschia multiseriata</i>, <i>Nitzschia pseudodelicatissima</i> (<i>P. pseudodelicatissima</i>), <i>P. australis</i></p>
	Intoxicación por ciguatera	<p><b>Dinoflagelados</b></p> <p><i>Gambierdiscus</i> spp., <i>Ostreopsis</i> sp., <i>Prorocentrum</i> spp.</p>
	Intoxicación por neurotoxinas	<p><b>Dinoflagelados</b></p> <p><i>Karenia brevis</i>, <i>K. brevisulcata</i></p>

Clasificación general	Descripción efecto nocivo	Ejemplos de organismos causantes
Organismos ictiotóxicos	Intoxicación por azaspirácidos por consumo de mariscos	<b>Dinoflagelados</b> <i>Protooperidinium crassipes</i>
	Intoxicación por cianotoxinas	<b>Cianobacterias</b> <i>Oscillatoria, Aphanizomenon Trichodesmium, Microcystis, Nodularia spumigena</i>
	Algunas especies pueden afectar a peces e invertebrados marinos debido a la producción de sustancias hemolíticas o mucilaginosas. Estas últimas pueden ser ictiotóxicas o generar daños mecánicos por la obstrucción de branquias.	<b>Diatomeas</b> <i>Chaetoceros convolutus</i> <b>Dinoflagelados</b> <i>Karenia mikimotoi, Prorocentrum cordatum</i> <b>Prinnecioficeas</b> <i>Prymnesium polylepis (Chrysochromulina polylepis), Prymnesium parvum, Prymnesium parvum</i> <b>Rafidioficeas</b> <i>Heterosigma akashiwo (Heterosigma carterae), Chattonella antiqua</i>

Adaptado de Pettersson y Pozdnyakov (2013). Con información de Anderson *et al.* (2001).

Tabla 2. Patologías ocasionadas en el humano por ficotoxinas de FAN en ambientes marinos.

Síndrome	Organismo causante	Toxina	Ruta de adquisición	Manifestación clínica
Intoxicación paralizante por consumo de mariscos	<i>Alexandrium catenella</i> , <i>A. cohorticula</i> , <i>A. fundyense</i> , <i>A. fraterculus</i> , <i>A. minutum</i> , <i>A. tamarense</i> , <i>Gymnodinium catenatum</i> , <i>Pyrodinium bahamense var. compressum</i>	Saxitoxinas*	Consumo de mariscos cultivados, o de vida libre, en las áreas afectadas	Parestesia y otras manifestaciones neurológicas, parálisis muscular, problemas respiratorios y muerte
Intoxicación diarreaica por consumo de mariscos	<i>Dinophysis acuta</i> , <i>D. acuminata</i> , <i>D. fortii</i> , <i>D. norvegica</i> , <i>D. mitra</i> , ( <i>Phalacroma rotundatum</i> <i>D. rotundata</i> ), <i>Prorocentrum lima</i>	Ácido okadáico*, dinofisistoxinas	Consumo de mariscos cultivados en áreas afectadas	Gastroenteritis aguda
Intoxicación amnésica	<i>Pseudonitzschia multiseries</i> , <i>P. pseudodelicatissima</i> , <i>P. australis</i>	Ácido domóico* y sus isómeros	Consumo de mariscos cultivados en áreas afectadas	Manifestaciones gastrointestinales, neurológicas, generando amnesia en casos severos, coma, muerte
Intoxicación por ciguatera	<i>Gambierdiscus toxicus</i> , <i>Ostreopsis</i> sp., <i>Prorocentrum</i> sp.	Ciguatoxina	Transferencia a través de la cadena trófica; consumo de peces carnívoros	Gastroenteritis aguda, síntomas neurológicos como parestesias
Intoxicación neurotóxica por consumo de mariscos	<i>Karenia brevis</i> , <i>K. brevisulcata</i> .	Brevetoxinas	Consumo de mariscos cultivados en áreas afectadas; aerosoles de las toxinas por efecto de las olas	Síntomas neurológicos y gastrointestinales, dificultad para en la respiración e irritación de ojos
Intoxicación por azaspirácidos por consumo de mariscos	<i>Protoperdinium crassipes</i>	Azaspirácidos	Consumo de mariscos cultivados en áreas afectadas	Efectos neurotóxicos con severo daño en intestino e hígado

Síndrome	Organismo causante	Toxina	Ruta de adquisición	Manifestación clínica
Intoxicación por cianotoxinas	<i>Oscillatoria, Aphanizomenon Trichodesmium, Microcystis, Nodularia spumigena</i>	Neurotoxinas <sup>1</sup> , hepatotoxinas <sup>2</sup> , citotoxinas <sup>3</sup> dermatotoxinas <sup>4</sup>	Oral por consumo de agua, contacto dérmico de agua contaminada, ingesta de suplementos dietéticos a base de cianobacterias	<sup>1</sup> parálisis muscular, paro respiratorio, muerte. <sup>2</sup> lesiones al hígado que pueden provocar la muerte por hemorragia intrahepática y choque hipo volémico. <sup>3</sup> daños a diversos órganos y sistemas como hígado, corazón, riñones, estómago, sistema vascular y linfático y glándulas adrenales. <sup>4</sup> efectos inflamatorios y potentes promotores de tumores.

Modificado de Morris, 1999. Con información de Anderson *et al.*, 2001; Pettersson y Pozdnyakov, 2013; Cantoral-Uriza *et al.*, 2017; Chorus y Bartram, 1999. \*=toxinas detectadas en la Bahía de Manzanillo

## **2.2 FAN: condiciones ambientales y procesos oceanográficos relacionados**

Referente a las condiciones ambientales en que ocurren los FAN, debido a la complejidad de estos eventos no ha sido posible determinar con certeza cuales son los factores que desencadenan y modulan su desarrollo (Pettersson y Pozdnyakov, 2013). Sin embargo, se sabe que, dentro de los principales factores se encuentran las concentraciones altas de nutrientes, aunque no sólo la concentración es importante sino también la relación estequiométrica (Alonso-Rodríguez *et al.*, 2000), la disponibilidad de radiación solar necesaria para el proceso de fotosíntesis, así como las condiciones hidrográficas y fisicoquímicas, las cuales son diferentes para cada especie (Pettersson y Pozdnyakov, 2013). A su vez, las condiciones ambientales regulan la escala temporal y espacial a la que ocurren los FAN, que varía desde minutos a meses, en la escala temporal, y desde cuencas oceánicas hasta bahías, en la escala espacial (Pettersson y Pozdnyakov, 2013).

Se ha sugerido que, las condiciones favorables para la presencia de FAN son generadas tanto por procesos oceanográficos-atmosféricos como por procesos antropogénicos (Sierra-Beltrán *et al.*, 2004). Por un lado, la eutrofización de los cuerpos de agua por actividades antropogénicas está relacionada directamente con la ocurrencia de FAN (Alonso-Rodríguez, 1998; Olivos-Ortiz *et al.*, 2016; Cortés-Altamirano *et al.*, 2019). Por otra parte, se ha observado que los FAN presentan cierta relación con cambios estacionales e interanuales de las condiciones oceanográficas, ocasionados por procesos de mesoescala y macroescala, como surgencias, frentes, giros y el fenómeno ENOS (Pitcher *et al.*, 2010; Cortés-Altamirano *et al.*, 2019). En general se ha observado que es más clara la relación de los FAN con procesos oceanográficos-atmosféricos, que con actividades antropogénicas (Sierra-Beltrán *et al.*, 2004).

En el área de estudio del presente trabajo, se han descrito tres principales procesos oceanográficos-atmosféricos que pueden ser moduladores de la ocurrencia de FAN: surgencias costeras eólicas (Sierra-Beltrán *et al.*, 2004; Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Morales-Blake *et al.*, 2013;), el fenómeno ENOS (Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Vega-Juárez, 2014) y la Oscilación Decadal del Pacífico (Cortés-Altamirano *et al.*, 2019). Dichos procesos oscilan en diferentes escalas de tiempo y se caracterizan por producir cambios en la

profundidad de la termoclina y de la capa de mezcla, repercutiendo en la fertilización de la zona eufótica y por lo tanto en el desarrollo del fitoplancton inocuo o nocivo.

**Surgencias eólicas:** Uno de los procesos oceanográficos-atmosféricos que influye en la ocurrencia y desarrollo de los FAN son las surgencias (Pitcher *et al.*, 2010). Estos procesos provocan la fertilización de la zona eufótica a través del movimiento ascendente de agua subsuperficial, la cual posee menor temperatura y concentración de oxígeno disuelto y mayor concentración de nutrientes (Monreal-Gómez *et al.*, 1999). Tales nutrientes son aprovechados por el fitoplancton, incluyendo a las especies formadoras de FAN (Pitcher *et al.*, 2010). Las surgencias son ocasionadas por movimientos divergentes en la superficie del mar, los que a su vez pueden ser producidos por diversos mecanismos, como, el esfuerzo eólico, la intensidad de las corrientes de frontera oeste, la topografía, así como la configuración y orientación de la costa entre otros (Pantoja *et al.*, 2017; Monreal-Gómez, 1999; Colling, 2004).

Respecto a las surgencias que son ocasionadas por el esfuerzo eólico, tales como las que ocurren en el área de estudio del presente trabajo, son resultado tanto del esfuerzo del viento sobre la superficie del mar, como de la fuerza de Coriolis, lo que da como resultado el desplazamiento de Ekman (Monreal-Gómez, 1999). El esfuerzo eólico sobre la superficie del mar genera que ésta se mueva en la misma dirección del viento, pero la fuerza de Coriolis desvía este movimiento hacia la derecha (en el hemisferio norte). Esta desviación se propaga hacia abajo por la viscosidad generando un transporte promedio del agua fuera del eje de los vientos de superficie. Dependiendo de la trayectoria del viento, puede haber divergencia o convergencia del agua. En el hemisferio norte los vientos con una componente paralela a la costa que se dirigen hacia el sur pueden ocasionar movimientos divergentes, ya que ocasiona un transporte de Ekman hacia mar adentro. Dicho transporte genera una disminución en la presión geopotencial superficial debido a la ausencia de agua en la costa, lo cual es compensado por el ascenso o surgimiento de aguas subsuperficiales (Figura 3) (Monreal-Gómez, 1999).

En general, las surgencias costeras eólicas se caracterizan por presentarse en franjas a no más de 100 km de la costa, con movimientos verticales de 100 a 200 m. La velocidad de afloramiento puede ser calculada a partir del esfuerzo del viento, la densidad del agua y la

vorticidad planetaria. Mientras que, la extensión de la surgencia está determinada por el radio interno de la deformación de Rossby (Monreal-Gómez *et al.*, 1999). Asimismo, se puede estimar la intensidad de una surgencia eólica de acuerdo con el valor del índice de Bakun, el cual está basado en el esfuerzo del viento en la superficie oceánica y la vorticidad planetaria (Monreal-Gómez *et al.*, 1999). Cabe mencionar que, la extensión e intensidad de una surgencia también es afectada por factores de tipo local, como el relieve marino, la morfología de la costa, el patrón de vientos locales, etcétera. Esto genera una compleja distribución espacial de las zonas de surgencia (Pantoja *et al.*, 2017; López-Sandoval *et al.*, 2009).

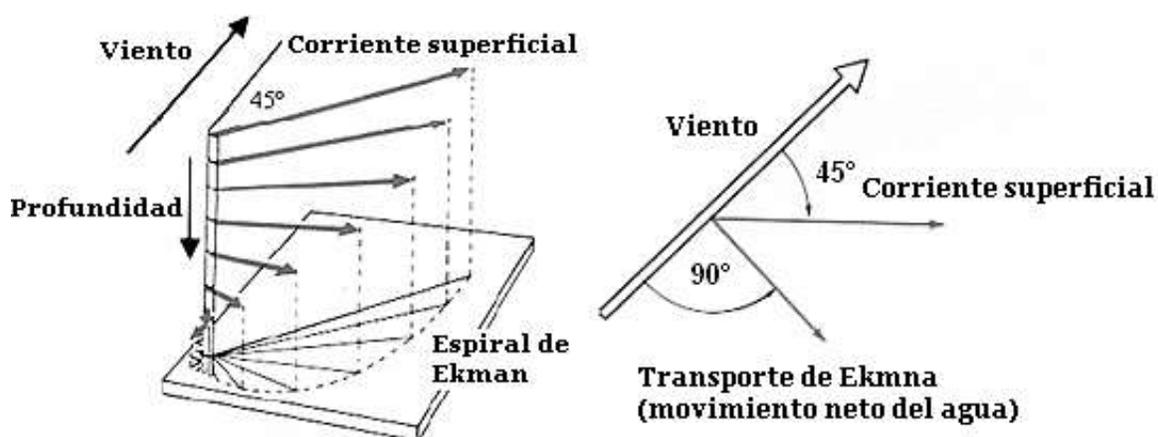


Figura 3. A la izquierda : espiral de Ekman resultado del esfuerzo del viento sobre el agua superficial, la longitud y dirección de las flechas indica la velocidad y dirección de la corriente generada por el viento. A la derecha : El esfuerzo del viento es equilibrado por la fuerza de Coriolis, la cual en el hemisferio Norte es 90° a la derecha. Tomado de: Meléndez-Valencia y Meléndez-Torres (2013)

La variabilidad temporal de las surgencias eólicas está asociada a oscilaciones atmosféricas, principalmente en la mesoescala y macroescala temporal. Por un lado, en la mesoescala, la variabilidad estacional de las surgencias está asociada al desplazamiento de los dipolos de alta y baja presión que generan vientos que favorecen la surgencia o el hundimiento de la termoclina (Monreal-Gómez *et al.*, 1999). También se ha observado que, la intermitencia del

esfuerzo del viento modula el desarrollo de las surgencias en escalas de 3 a 10 días, generando las fases: 1) inicio de surgencia, 2) surgencia intensa y 3) surgencia en relajamiento (Pitcher *et al.*, 2010). Por su parte, en la macroescala, procesos como el fenómeno El Niño Oscilación del Sur y la Oscilación Decadal del Pacífico, los cuales modifican la profundidad de la termoclina, influyen en la intensidad de las surgencias.

**El Niño-Oscilación del Sur (ENOS):** El fenómeno ENOS es un fenómeno producido por condiciones anómalas en el sistema océano-atmósfera en el Pacífico sur y se presenta de forma recurrente en intervalos de 2 a 7 años (Colling, 2004). Dicho sistema oscila entre una fase cálida (El Niño) a condiciones normales, a una fase fría (La Niña). En términos físicos, el ciclo El Niño/La Niña está asociado a dos clases de ondas ecuatoriales: las ondas de Kelvin y las ondas largas de Rossby, las cuáles son ondas gravitacionales derivadas de la rotación de la Tierra y tienen aproximadamente 3000 km de radio. Las ondas de Kelvin se propagan hacia el oriente a lo largo del ecuador y al llegar a la costa se dividen hacia el norte y hacia el sur como ondas Kelvin costeras, o son reflejadas hacia el occidente como ondas Rossby (Castillo, 2003). Cabe mencionar que, hasta ahora no ha sido posible saber si los cambios anómalos que caracterizan a ENOS ocurren primero en la atmósfera o en el océano, pero en este texto se iniciará describiendo lo que ocurre en la atmósfera (Colling, 2004).

En el Pacífico sur los vientos dominantes son los alisios del sureste, los cuales soplan hacia el oeste a lo largo del ecuador (Colling, 2004). La fuerza de estos vientos depende de la diferencia de presión atmosférica entre la región de alta presión subtropical en el Pacífico sur oriental y el sistema de baja presión sobre Indonesia. En condiciones normales los vientos alisios del sureste generan el movimiento de agua superficial cálida desde el Pacífico oriental hacia el Pacífico occidental. A su vez, este transporte genera que en el occidente del Pacífico aumente el nivel del mar y la termoclina sea más profunda como resultado del apilamiento de las aguas superficiales transportadas. Contrastantemente, en el Pacífico oriental el nivel del mar disminuye y la termoclina se vuelve más somera, lo que favorece los procesos de mezcla. Además, en el Pacífico oriental, se presentan condiciones favorables para eventos de surgencias costeras, debido a que el agua que es transportada en dirección opuesta a la costa es remplazada por agua subsuperficial (Figura 4 b) (Colling, 2004).

La fase cálida de ENOS se presenta cuando la diferencia de presión atmosférica entre la región de Indonesia y del Pacífico oriental disminuye de manera anómala (Colling, 2004). Esto ocurre debido a que la presión atmosférica en la zona de Indonesia aumenta de manera inusual, mientras que en el Pacífico oriental la presión atmosférica es atípicamente baja, lo cual ocasiona el debilitamiento de los vientos alisios del sureste. A su vez, estas condiciones atmosféricas anómalas generan cambios en la dirección de la circulación oceánica superficial. En la fase cálida de ENOS hay un transporte de agua superficial cálida, perteneciente a la capa de mezcla, desde el Pacífico occidental hacia el Pacífico oriental (dirección inversa a las condiciones normales). Consecuentemente en el Pacífico oriental aumenta el nivel del mar por el apilamiento de aguas cálidas y la termoclina se vuelve más profunda (Figura 4 c). Asimismo, el afloramiento de aguas subsuperficiales ocasionado por las surgencias costeras cesa, o en caso de presentarse, al ser la termoclina más profunda de lo usual, los procesos de surgencia transportan agua de la capa de mezcla, en donde la concentración de nutrientes es baja (Colling, 2004). Esto ocasiona una disminución en la biomasa fitoplanctónica, incluyendo especies formadoras de FAN (Pitcher *et al.*, 2010).

Por su parte, la fase fría de ENOS tiene lugar cuando hay una diferencia de presión anormalmente grande entre los sistemas de baja y alta presión del Pacífico sur. La presión atmosférica en Pacífico oriental sur aumenta atípicamente, mientras que en la región de Indonesia disminuye, ocasionando que la intensidad de los vientos alisios se incremente. Estas condiciones generan que el esfuerzo del viento transporte un volumen considerable de agua superficial lejos de las costas del Pacífico oriental, lo cual intensifica los procesos de surgencias costeras. Asimismo, durante esta fase hay una disminución anómala en el nivel del mar y un ascenso atípico de la termoclina en el Pacífico oriental (Figura 4a) (Colling, 2004, Monreal-Gómez *et al.*, 1999).

El fenómeno ENOS puede generar importantes cambios en las condiciones ambientales que pueden impactar negativamente a la sociedad, por lo cual este fenómeno es monitoreado de manera regular (Colling, 2004). Uno de los impactos más relevantes de ENOS ha sido sobre las pesquerías, las cuales son sostenidas por la productividad primaria en el océano, que a su vez disminuye de forma importante durante la fase cálida de ENOS.

Referente al monitoreo de ENOS, se han empleado indicadores de este fenómeno, basados en la medición de variables atmosféricas y oceanográficas, uno de estos indicadores es el Índice Multivariado ENOS (MEI por sus siglas en inglés). El MEI presenta datos en periodos bimestrales de una combinación lineal de seis variables atmosféricas y oceanográficas asociadas a la ocurrencia de ENOS: presión atmosférica a nivel del mar, componentes zonal y meridional del viento en superficie, temperatura superficial del mar, temperatura del aire a nivel del mar y la nubosidad (NOAA., s.f.). La intensidad del fenómeno ENOS varía de un evento a otro, por lo que se clasifican como eventos “fuertes”, “moderados”, “débiles” o “muy débiles”, dependiendo de la amplitud de la anomalía de las variables oceanográficas y atmosféricas empleadas en el monitoreo de este fenómeno.

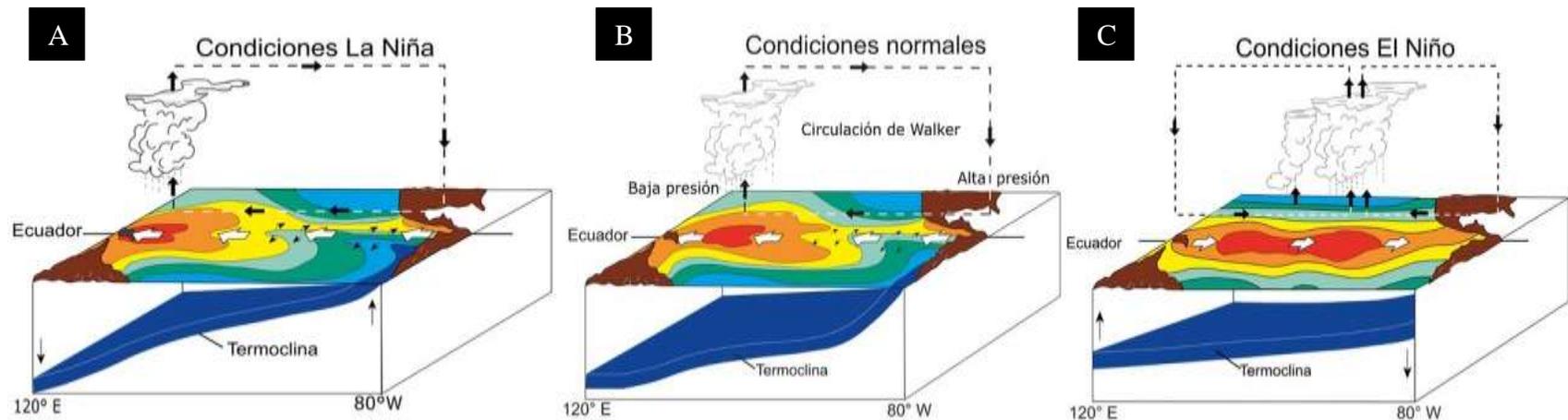


Figura 4. Representación de las fases de ENOS: A) Condiciones La Niña o fase fría , B) Condiciones normales o fase neutra y C) Condiciones El Niño o fase cálida. El lado izquierdo de cada uno de los tres diagramas representa el océano Pacífico occidental, cercano a Asia, y el lado derecho el océano Pacífico oriental, cerca de Sudamérica. Los tonos rojos y naranjas indican TSM relativamente elevada, mientras que los tonos amarillos y verdes indican TSM menor. La banda azul es la termoclina. Las nubes se forman en donde la TSM es mayor. Tomado de: NOAA, (s.f. a)

**La Oscilación Decadal del Pacífico (ODP):** La Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) es un patrón a largo plazo de la variabilidad climática del Pacífico. Y puede presentar dos fases extremas, la fase positiva o cálida y la fase negativa o fría (Figura 5), la transición entre ambas fases ocurre en lapsos de 20 a 30 años aproximadamente (NASA, 2023). La fase positiva o cálida de la ODP se caracteriza por un enfriamiento general del Pacífico subártico central y un calentamiento a lo largo de la costa noreste del Pacífico; mientras que cuando la ODP tiene un valor negativo, los patrones climáticos se invierten, con TSM por encima del promedio en el interior y TSM por debajo del promedio a lo largo de la costa de América del Norte (NASA, 2023) (Figura 5).

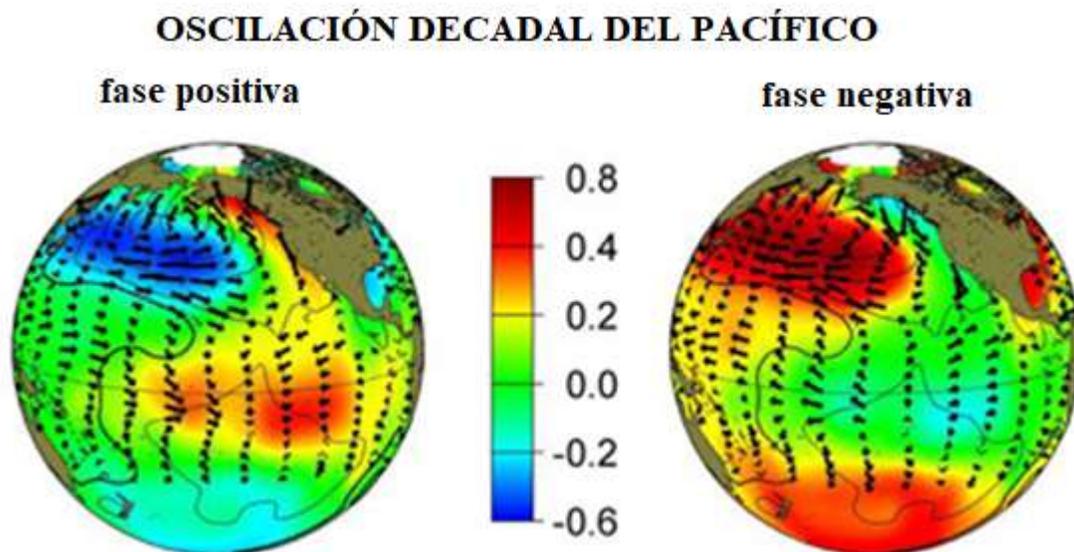


Figura 5. TSM (expresada en °C) del Océano Pacífico. En la fase positiva (izquierda) se observa que la TSM en el Pacífico este es más alta que el promedio; mientras que en la fase negativa (derecha) es más baja. Tomado de NASA (2023)

Una de las herramientas empleada para el monitoreo de la ODP es el índice elaborado por la NOAA, conocido como Índice de la ODP del Centro Nacional para la Información Ambiental (NCEI PDO Index, por sus siglas en inglés). Este índice es elaborado mediante una regresión

lineal del periodo de superposición de las anomalías de la TSM calculadas por la NOAA y del índice de la ODP de Mantua (NOAA, s.f.).

Se ha observado que la ODP afecta los sistemas de surgencia costeras de una manera parecida al fenómeno ENOS, es decir, durante la fase fría de la ODP se generan condiciones favorables para la presencia de surgencias (NASA, s.f.; NOAA, s.f.; Pitcher *et al.*, 2010) y con ello el desarrollo de florecimientos algales, incluyendo los nocivos (Pitcher *et al.*, 2010). Desafortunadamente, son pocos los trabajos en los que se ha documentado la relación entre los FAN y la ODP (Cortés-Altamirano *et al.*, 2019; Pitcher *et al.*, 2010), esto debido principalmente a la falta de registros a largo plazo, que son necesarios para poder estudiar este proceso oceanográfico decadal (Pitcher *et al.*, 2010).

### **2.3 FAN: variabilidad temporal**

Por su parte, aunque la variabilidad temporal de los FAN oscila en un amplio rango de escalas (Pitcher *et al.*, 2010; Chang y Dickey, 2008), se ha observado que, principalmente en ecosistemas donde hay influencia de surgencias eólicas, la distribución temporal de los FAN puede estar determinada por las fluctuaciones de la fuerza del viento en tres escalas principales estacional, del evento e interanual (Pitcher *et al.*, 2010), estas escalas también son denominadas respectivamente como mesoescala y macroescala (Orlanski, 1975).

Variabilidad en la mesoescala: La variabilidad estacional de los FAN, como la del fitoplancton en general, es modulada principalmente por la disponibilidad de luz y nutrientes (Lalli y Parsons, 1997) (Figura 6). Específicamente en ecosistemas con influencia de surgencias eólicas se aprecia un patrón similar al observado en océanos templados (Pitcher *et al.*, 2010; Cortés-Altamirano *et al.* 2019), con los florecimientos de fitoplancton más importantes en primavera (Lalli y Parsons, 1997; Brown *et al.*, 2001). Esto es debido a que en primavera disminuye la estratificación térmica del agua, y también se presentan vientos que generan un transporte de Ekman que favorece el surgimiento de aguas subsuperficiales hacia la superficie, lo que conlleva el afloramiento de nutrientes hacia la zona eufótica y favorece la proliferación del fitoplancton (Pitcher *et al.*, 2010; Brown *et al.*, 2001; Lalli y Parsons, 1997) (Figura 6).

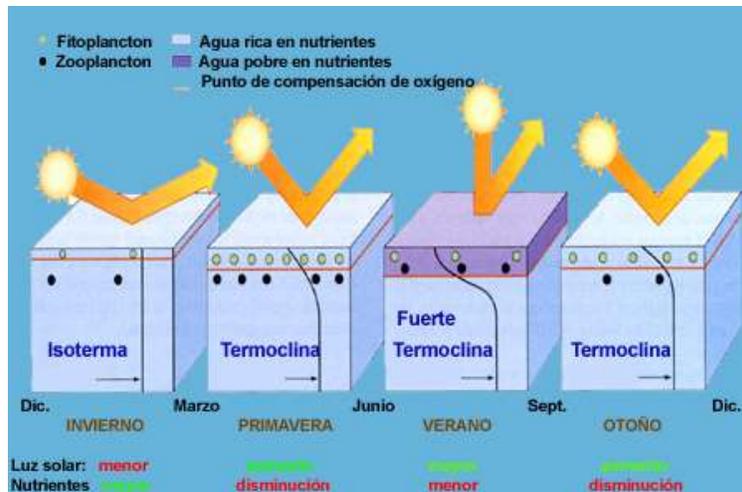


Figura 6. Se observa que, especialmente en primavera disminuye la estratificación de la columna de agua (la termoclina es menos profunda), lo que favorece la circulación vertical y mezcla de las aguas, lo que a su vez conlleva al afloramiento de nutrientes necesarios para la formación de florecimientos algales. Tomado de Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua (CIDTA), (s.f.).

Por otra parte, se ha observado que en los sistemas de surgencia las condiciones estacionales en la columna de agua son frecuentemente revertidas y luego restablecidas por periodos cortos de 3 a 10 días debido a la variación en la fuerza del viento (Pitcher *et al.*, 2010). Estos cambios intermitentes en la dirección y rapidez del viento provocan que la capa de mezcla de la columna de agua oscile de periodos cortos de surgimiento a periodos cortos de hundimiento de la termoclina (Figura 7). Lo anterior, ocasiona que se presenten fluctuaciones de condiciones favorables a condiciones desfavorables para los florecimientos algales, incluyendo los FAN, en intervalos de 3 a 10 días (Pitcher *et al.*, 2010; Morales-Blake *et al.*, 2013).

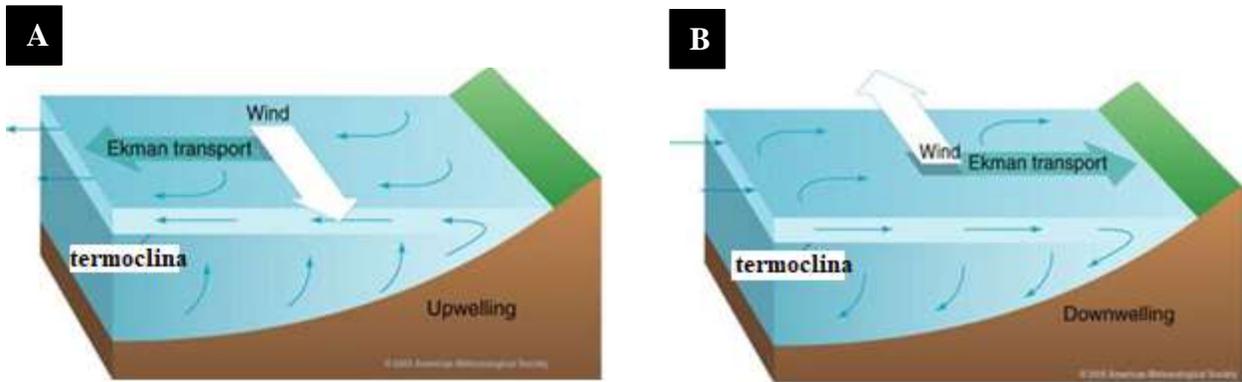


Figura 7. Representación para el hemisferio norte. A) Surgencia: La dirección del viento ocasiona un transporte de Ekman que lleva el agua superficial cerca de la costa hacia mar abierto, el agua superficial es remplazada por agua subsuperficial que asciende. B) Hundimiento: La dirección del viento ocasiona un transporte de Ekman que lleva el agua superficial hacia la costa, el agua se acumula cerca de la costa generando un proceso de hundimiento de la termoclina. Tomado de Lindstrom (s.f).

Variabilidad en la macroescala: Uno de los principales moduladores de las fluctuaciones temporales de los FAN en la macroescala, especialmente en las costas del Pacífico (Gómez-Villarreal *et al.*, 2008; Pitcher *et al.*, 2010; Vega-Juárez, 2014; Cortés-Altamirano *et al.*, 2019; Cortés-Lara *et al.*, 2022), incluyendo la Bahía de Manzanillo (Ortiz-Lira y Jiménez-Quiroz, 2006; Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Quijano-Scheggia *et al.*, 2016) es el fenómeno de ENOS. La transición entre la fase fría y la fase cálida de ENOS disminuye la intensidad de vientos favorables de surgencia durante eventos de fase cálida de ENOS (condiciones El Niño), provocando que la profundidad de la termoclina aumente y con ello haya un menor afloramiento de nutrientes necesarios para los florecimientos algales. En cambio, se ha observado que en la fase fría de ENOS se presentan condiciones favorables para la formación de FAN (condiciones La Niña) (Cortés-Altamirano *et al.*, 2019).

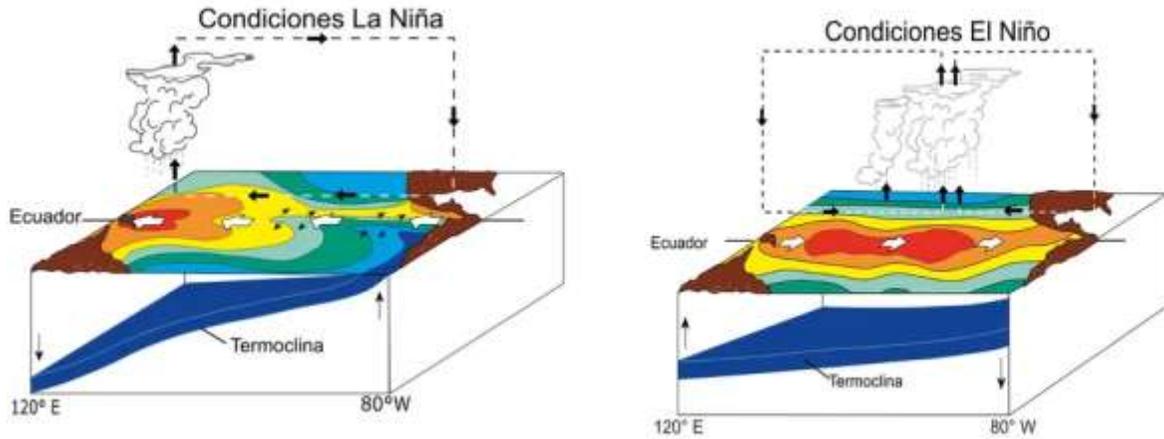


Figura 8. Representación de las condiciones: a) La fase fría de ENOS (La Niña) se observa que la termoclina es menos profunda, lo cual es favorable para la formación de FAN) y b) La fase cálida de ENOS (El Niño) se observa que la termoclina es más profunda, lo cual es desfavorable para la formación de FAN. El lado izquierdo de cada diagrama es el océano Pacífico occidental, cercano a Asia, y el lado derecho el océano Pacífico oriental, cerca de Sudamérica. Los tonos rojos y naranjas indican TSM relativamente elevada, mientras que los tonos amarillos y verdes indican TSM menor. La banda azul es la termoclina. Las nubes se forman en donde la TSM es mayor. Tomado de: NOAA, (s.f. a)

## 2.4 Percepción remota satelital: aspectos teóricos básicos

La percepción remota satelital es una técnica que permite obtener información de los objetos en la superficie terrestre a partir de mediciones de la radiación electromagnética (REM) que dichos objetos emiten o reflejan (Aguirre-Gómez, 2004; Brown *et al.*, 2005). De manera básica, un sistema de percepción remota satelital está formado por cuatro principales componentes (Figura 9): a) una fuente de REM, la principal fuente es el Sol, y los sensores que emplean esta fuente son denominados sensores pasivos; por otra parte, también existen sensores que cuentan con una fuente artificial de REM, estos son denominados sensores activos, b) un objeto de estudio, que puede ser cualquier componente de la superficie terrestre, c) un medio de propagación de la REM, el cual es la atmósfera y d) un sensor que mida la REM emitida o reflejada por el objeto de estudio (Aguirre-Gómez, 2004).

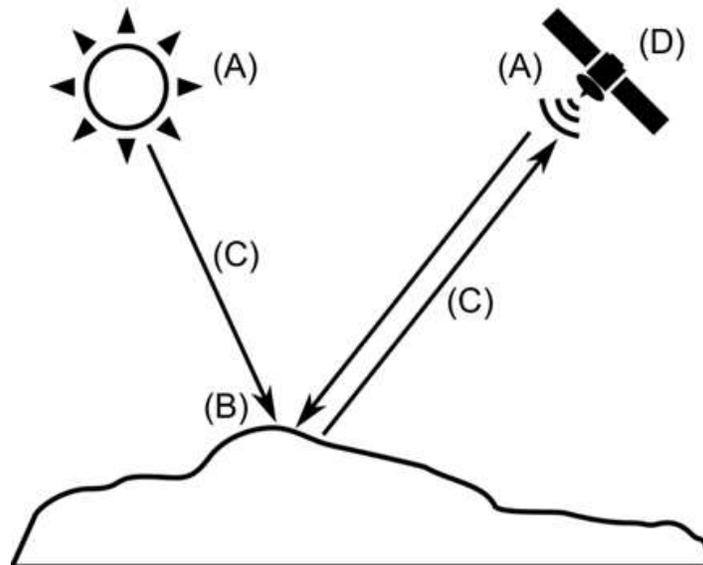


Figura 9. Principales componentes de un sistema de percepción remota satelital: A) fuente de REM, B) objeto de estudio, C) medio de propagación de la REM y D) Sensor que detecte la REM. Tomado de Olaya (2016).

Debido a que la percepción remota satelital se fundamenta en la detección de la REM, para tener una noción básica del funcionamiento de esta técnica es preciso mencionar algunos aspectos teóricos sobre ella. La REM es energía que viaja a la velocidad de la luz en forma de onda (Wright y Colling, 1995; Aguirre-Gómez, 2004). La longitud de onda de la REM oscila en un amplio rango, al que se le denomina espectro electromagnético (EEM). El EEM comprende desde REM con la longitud de onda más corta, como los rayos gamma, hasta REM con la mayor longitud de onda, como las ondas de radio (Figura 10) (Aguirre-Gómez, 2004).

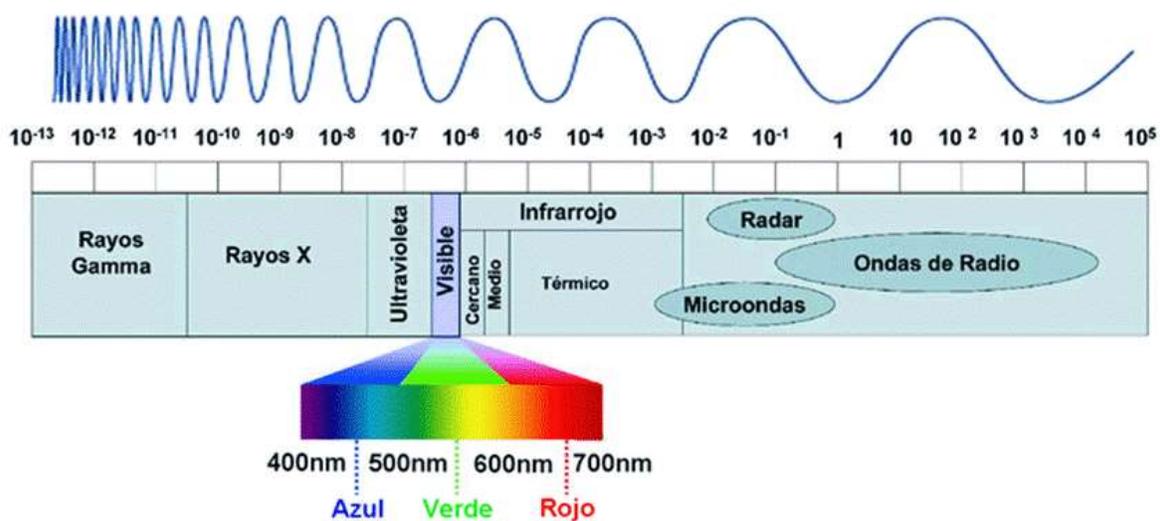


Figura 10. Espectro electromagnético. La longitud de onda está expresada en metros. Tomado de Vivancos *et al* (2005)

La REM es emitida por toda la materia con una temperatura mayor al cero absoluto, y las propiedades y comportamiento de esta emisividad son descritas en la teoría de la radiación del cuerpo negro enunciada por Planck (Aguirre-Gómez, 2004; Brown *et al.*, 2005). De acuerdo con esta teoría, un cuerpo negro es un objeto idealizado que absorbe toda la radiación incidente en su superficie y la reemite a una máxima tasa. Las características espectrales y la potencia de la radiación emitida son determinadas únicamente por la temperatura del cuerpo negro (Figura 11). Por definición la emisividad de un cuerpo negro es la unidad. La potencia radiativa a una frecuencia dada por ángulo sólido por superficie de área, está dada por:

$$B_V = \frac{2hv^3}{c^2} \frac{1}{\exp\left(\frac{hv}{kT}\right) - 1}$$

Donde  $B_V$ : es el brillo espectral del cuerpo negro,  $T$  es la temperatura en grados Kelvin.,  $\nu$  es la frecuencia,  $c$  es la velocidad de la luz,  $h$  es la constante de Planck y  $k$  es la constante de Boltzmann (Brown *et al.*, 2005).

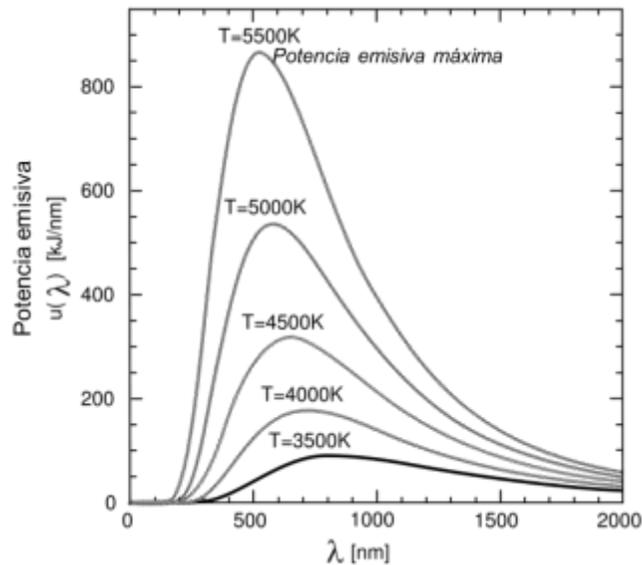


Figura 11. Potencia emisiva *versus* longitud de onda de un cuerpo negro a diferentes temperaturas. Tomado de Vivancos *et al.* (2005)

Como se ha mencionado, las características espectrales y la potencia de la REM que emite un cuerpo negro están determinadas por su temperatura (Brown *et al.*, 2005). La relación entre la temperatura y la emisividad de un cuerpo negro es descrita por la ley de desplazamiento de Wien (Aguirre-Gómez, 2004). De acuerdo con esta ley, para un cuerpo

negro la longitud de onda y la potencia emisiva son inversamente proporcionales a su temperatura absoluta. La ecuación de la ley de Wien es la siguiente:

$$\lambda_m = \frac{B}{T}$$

Donde  $\lambda_m$  es la longitud de onda en la que se tiene la máxima emisión, T es la temperatura del cuerpo negro y B es la constante de Wien.

Un ejemplo de lo enunciado por la ley de Wien se encuentra al observar la emisividad del Sol y la de la Tierra, a pesar de que no son cuerpos negros idealizados (Figura 12). El Sol, cuya temperatura superficial aproximada es de 6000 °K, tiene su máxima potencia emisiva en una longitud de onda de 0.48  $\mu\text{m}$ , lo cual corresponde a la región visible del EEM. Mientras que, la Tierra, en comparación con el Sol, posee una temperatura superficial mucho menor, cercana a los 300 °K, y presenta su máxima potencia emisiva en una longitud de onda mayor (10.3  $\mu\text{m}$ ) ubicada en la región denominada infrarrojo térmico (Aguirre-Gómez, 2004). Este ejemplo permite observar cómo los cuerpos con una mayor temperatura emiten radiación en longitudes de onda más cortas que los cuerpos con una temperatura menor (Aguirre-Gómez, 2004).

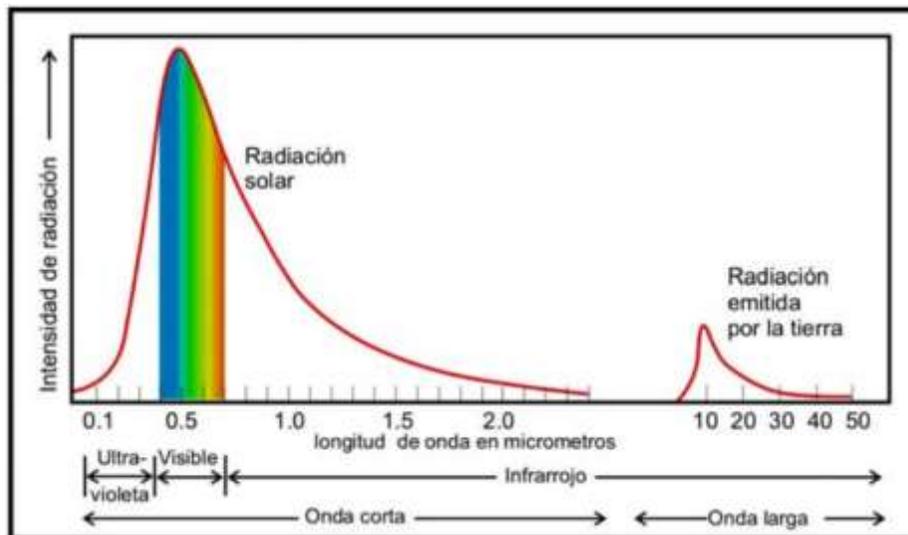


Figura 12. Emisión del Sol (el máximo ocurre en el visible) y de la Tierra (el valor máximo ocurre en el infrarrojo térmico). Tomado de Inzunza (s.f.)

A diferencia del cuerpo negro idealizado, cuya tasa de emisión es igual a 1, los objetos en la naturaleza emiten a una tasa menor (Brown *et al.*, 2005). Cada objeto emite de forma diferente a lo largo del EEM y a esta emisividad particular se le denomina espectro del objeto (Aguirre-Gómez, 2004). A su vez, el espectro del objeto, así como la reflectancia y la absorbancia de un cuerpo, dependen de sus propiedades físicas y químicas particulares. Además de la temperatura, otras propiedades como la rugosidad superficial y la composición química de un cuerpo determinan sus propiedades radiativas, es decir su emisividad, absorbancia y reflectancia. Las propiedades radiativas únicas de cada objeto hacen posible su identificación y estudio de manera remota (Brown *et al.*, 2005).

La REM que es emitida o reflejada por los objetos en la superficie terrestre, se propaga a través de la atmósfera hacia el espacio, donde es detectada por sensores satelitales (Brown *et al.*, 2005, Aguirre-Gómez, 2004). Sin embargo, no toda la REM llega a los sensores, debido a que los componentes atmosféricos impiden su paso, es decir disminuyen la transmisibilidad de la radiación. Tal disminución de la transmisibilidad es resultado de la absorbancia y el esparcimiento de la radiación por parte de los componentes atmosféricos y varía con la longitud de onda. A lo largo del EEM hay desde regiones con transmisibilidad alta, hasta regiones en donde la transmisibilidad es casi nula (Brown *et al.*, 2005, Aguirre-Gómez, 2004).

La diferencia en la transmisibilidad es fundamental para el diseño de los sensores satelitales (Brown *et al.*, 2005). Por ejemplo, pocos sensores están diseñados para operar en regiones del EEM donde la transmisibilidad de la atmósfera es muy baja, como la porción del infrarrojo intermedio y del infrarrojo lejano, ya que por la alta absorción o dispersión atmosférica es difícil detectar la señal original proveniente del objeto de estudio. En contraste, la mayoría de los sensores operan en las regiones con alta transmisibilidad, también denominadas “ventanas atmosféricas”, como la porción del visible, el infrarrojo térmico y las microondas (Figura 13). (Brown *et al.*, 2005).

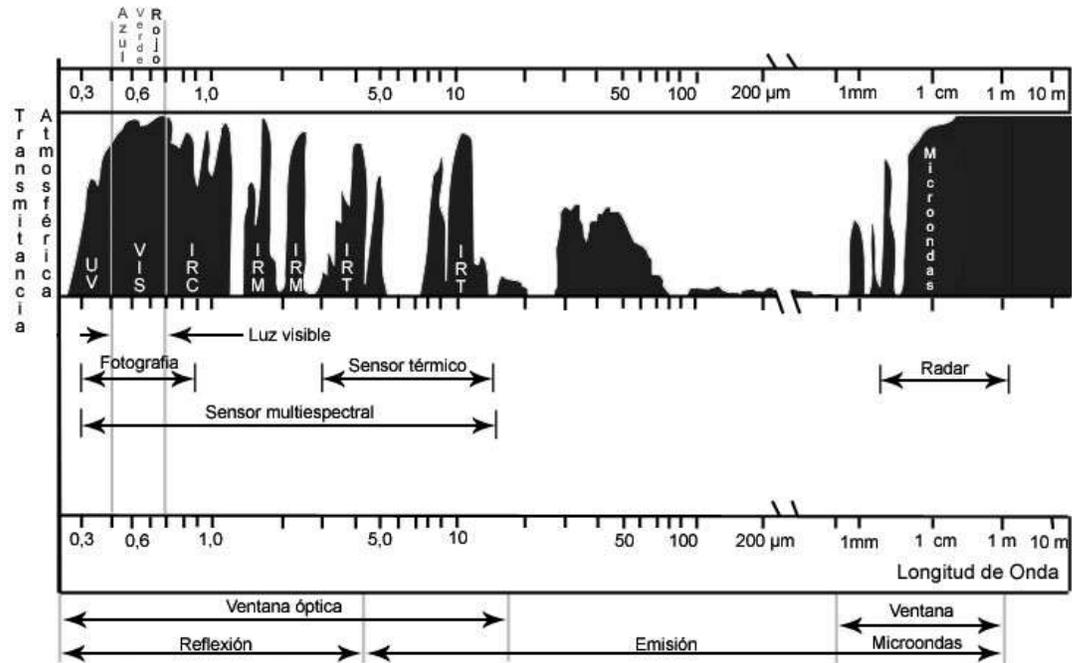


Figura 13. Transmitancia atmosférica en diferentes regiones del espectro electromagnético. Tomado de Vivancos *et al* (2005)

## 2.5 Sensores remotos empleados en el estudio de los océanos

Aunque el diseño de todos los sensores empleados en percepción remota satelital se fundamenta en una serie de principios físicos y técnicas de ingeniería en común, cada sensor cuenta con atributos particulares que determinan el alcance y las características de sus mediciones (Miller *et al.*, 2005). Dentro de los atributos más importantes se encuentran la resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica. La resolución espacial, hace referencia al elemento más pequeño que puede distinguir o registrar un sensor, o el tamaño de píxel de una imagen satelital. Por su parte, la frecuencia en la que el sensor, a bordo de un determinado satélite, pasa por un mismo punto de la superficie terrestre, se le denomina resolución temporal. La resolución espectral consiste en el número de canales espectrales y el ancho de banda que es capaz de captar un sensor. Finalmente, al número de bits en los que es convertida la radiancia detectada por un sensor se le denomina resolución espectral (Miller *et al.*, 2005).

Es importante considerar los atributos de los sensores satelitales para hacer una selección adecuada de los mismos, según los requerimientos específicos de cada usuario (Miller *et al.*, 2005). Asimismo, el conocer los alcances y las limitantes de los sistemas satelitales es relevante cuando se desea emplear de manera complementaria los datos de dos o más sistemas satelitales, a fin de aprovechar las fortalezas de cada uno. Para el caso de los sensores remotos aplicados al estudio de los océanos uno de los atributos que es importante considerar es la resolución espectral. Los sensores con aplicaciones oceanográficas operan en tres principales regiones del EEM: 1) Región del visible e infrarrojo cercano, 2) infrarrojo térmico y 3) microondas (tanto sensores pasivos como activos). A partir de las mediciones realizadas en estas regiones del EEM diversos parámetros son estimados (

Región del EEM	Parámetros identificables	Deficiencia
<b>Visible e infrarrojo cercano</b>	Propiedades bio-ópticas* Identificación de la presencia de clorofila en los centros de bandas de sus zonas de absorción (440 nm	Frecuentemente difícil de obtener series de tiempo libres de nubes. No trabajan bajo condiciones de oscuridad. En aguas caso 2, es

	y 660 nm) y reflexión (550 nm) con alta precisión, ya que el ancho de banda es muy fino, de aproximadamente 20 nm. *	decir, donde las propiedades ópticas están dominadas por el material orgánico disuelto y los sedimentos, es necesario realizar correcciones.
	Batimetría	
	Hielo en la superficie marina	
<b>Infrarrojo térmico</b>	Temperatura Superficial del Mar*	No es posible obtener datos en presencia de nubes
<b>Microondas</b>	Temperatura Superficial del Mar	En caso de los sensores que operan en la región de las microondas, la resolución espacial aproximada de 25 km (en el caso de radiómetros pasivos) puede ser en ocasiones insuficiente para detectar características de 1-5 km de escala de radio Rossby. No tienen alta sensibilidad a la TSM en aguas frías.
▪ Radiómetros de microondas (pasivos)	(solo radiómetros de microondas) Salinidad Superficial del Mar (solo sensores en el microondas)	
▪ Radar de Apertura Sintética	Cobertura de hielo en la superficie marina	
▪ Dispersómetros de microondas	Rugosidad de la superficie del mar, velocidad del viento, corrientes superficiales	
▪ Altimetros	geostróficas ondas y mareas* Altura de la superficie del mar (solo en el caso de los altímetros)	En el caso de los altímetros Las bandas de fuerte convergencia y divergencia pueden ser difíciles de detectar.

Tabla 3) (Miller *et al.*, 2005; Pettersson y Pozdnyacov. 2013).

Una de las diversas aplicaciones de la percepción remota satelital ha sido en el estudio de los FAN, el cual ha sido abordado desde diferentes perspectivas y se explicará con más detalle en la siguiente subsección.

<b>Región del EEM</b>	<b>Parámetros identificables</b>	<b>Deficiencia</b>
-----------------------	----------------------------------	--------------------

<b>Visible e infrarrojo cercano</b>	Propiedades bio-ópticas* Identificación de la presencia de clorofila en los centros de bandas de sus zonas de absorción (440 nm y 660 nm) y reflexión (550 nm) con alta precisión, ya que el ancho de banda es muy fino, de aproximadamente 20 nm. * Batimetría Hielo en la superficie marina	Frecuentemente difícil de obtener series de tiempo libres de nubes. No trabajan bajo condiciones de oscuridad. En aguas caso 2, es decir, donde las propiedades ópticas están dominadas por el material orgánico disuelto y los sedimentos, es necesario realizar correcciones.
<b>Infrarrojo térmico</b>	Temperatura Superficial del Mar*	No es posible obtener datos en presencia de nubes
<b>Microondas</b>	Temperatura Superficial del Mar (solo radiómetros de microondas) Salinidad Superficial del Mar (solo sensores en el microondas) Cobertura de hielo en la superficie marina Rugosidad de la superficie del mar, velocidad del viento, corrientes superficiales geostróficas ondas y mareas* Altura de la superficie del mar (solo en el caso de los altímetros) *	En caso de los sensores que operan en la región de las microondas, la resolución espacial aproximada de 25 km (en el caso de radiómetros pasivos) puede ser en ocasiones insuficiente para detectar características de 1-5 km de escala de radio Rossby. No tienen alta sensibilidad a la TSM en aguas frías. En el caso de los altímetros Las bandas de fuerte convergencia y divergencia pueden ser difíciles de detectar.

Tabla 3. Regiones del espectro electromagnético en las que operan los sensores satelitales empleados en el estudio de la superficie marina.

Elaboración propia, con información de Pettersson y Pozdnyakov (2013) y Miller *et al* (2005). Se señalan con asterisco (\*) los principales parámetros que se han empleado en el estudio de los FAN.

## 2.6 Estudio de los FAN mediante percepción remota satelital

El estudio de los FAN mediante percepción remota satelital ha sido abordado desde diferentes enfoques (Miller *et al.*, 2005). Desde análisis visuales para la obtención de información preliminar, hasta el estudio de propiedades ópticas y la aplicación de algoritmos para estimar algunos parámetros relacionados con la ocurrencia de estos eventos (Tabla 3 y Figura 14). Asimismo, a través de datos de sensores satelitales es posible recabar mediciones regulares de amplia cobertura espacial de algunas variables de interés (biológicas, químicas, físicas, etcétera) para el estudio de los FAN de una forma rentable, que mediante técnicas de muestreo *in situ* es más difícil conseguir (Pettersson y Pozdnyakov, 2013).

No obstante, debido a la complejidad de los FAN, los datos de sensores satelitales presentan limitantes para el estudio de estos eventos (Miller *et al.*, 2005). Dado que los FAN son muy diversos en términos de su ecología, taxonomía, efectos nocivos y escala espacial y temporal, para estudiarlos se requiere de observaciones de numerosas variables con una resolución espacial y temporal adecuada. En este sentido, la resolución de los datos derivados de sensores satelitales no es suficiente para comprender totalmente el desarrollo de los FAN (Pettersson y Pozdnyakov, 2013).

Algunos de los inconvenientes de los datos de percepción remota satelital están relacionadas con la resolución de los sensores (Miller *et al.*, 2005). Por una parte, la resolución espacial de los datos satelitales comúnmente resulta más adecuada para el estudio y monitoreo de FAN de amplia dispersión que para FAN localizados; no obstante, existen algunos sensores con una alta resolución espacial. Por otra parte, debido a que los FAN se desarrollan rápidamente, se requiere una alta resolución temporal para captar dichos cambios, lo cual no siempre es posible, ni aun mediante el análisis de datos satelitales diarios, sin considerar que, la disponibilidad de datos depende de las condiciones atmosféricas para el caso de sensores ópticos. Finalmente, la resolución espectral de los sensores satelitales resulta insuficiente para determinar las características específicas de cada FAN, pues están diseñados para la detección de la clorofila-*a*, presente en todas las especies del fitoplancton, por lo que no es posible discriminar los diferentes grupos taxonómicos formadores de FAN. Adicionalmente, la detección de la clorofila-*a* por percepción remota es afectada por la interferencia de otros

componentes que no son de interés, especialmente en aguas caso 2 que se caracterizan por ser ópticamente complejas (Miller *et al.*, 2005).

Sin embargo, es importante indicar que, debido a la complejidad de los FAN, no existe hasta el momento, ninguna técnica de muestreo o método de estudio que permita explicar estos eventos de forma total (Pettersson y Pozdnyakov, 2013). En este sentido, siempre es conveniente complementar los datos obtenidos mediante diferentes técnicas de muestreo. En el caso de datos de percepción remota, se pueden emplear de manera sinérgica datos de diferentes sensores, de tal forma que las limitaciones de un tipo de datos puedan ser compensadas por los alcances de otro, en términos principalmente de la resolución espacial, temporal y espectral (Shen *et al.*, 2012; Pettersson y Pozdnyakov, 2013) (Figura 14). Asimismo, para hacer una interpretación adecuada de los datos satelitales, estos deben ser integrados y validados con métodos y técnicas de muestreo *in situ* (Aguirre-Gómez, 2004).

Uno de los enfoques del estudio de los FAN mediante percepción remota satelital ha sido el uso de variables bio-ópticas y físicas que indirectamente pueden indicar la ocurrencia de FAN, tales como la clorofila-*a*, la TSM, el patrón de vientos, etcétera (Figura 14). Debido a que en el presente trabajo se emplean la clorofila-*a* y la TSM son los que se describen a continuación

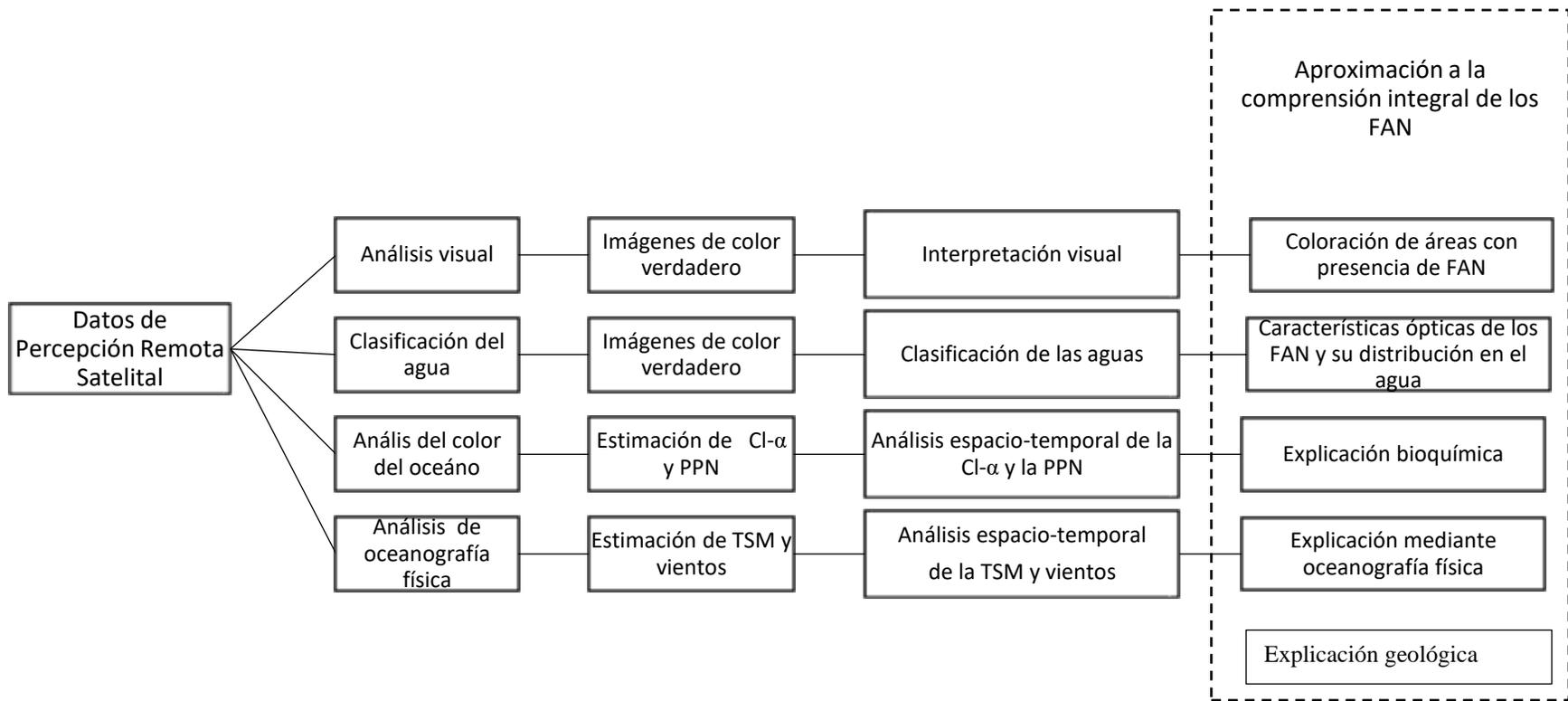


Figura 14. Algunas aplicaciones de datos derivados de percepción remota satelital en el estudio de los FAN. PPN=Productividad Primaria Neta Adaptado de Shen *et al* (2012)

### 2.6.1 *Clorofila-a estimada mediante PRS y su relación con los FAN*

El fitoplancton es comúnmente cuantificado por técnicas de medición convencional mediante la estimación de la clorofila-*a* (Babin, 2008). Aunque existen diferentes pigmentos fotosintéticos (Tabla 4) que absorben en diferentes longitudes de onda en el rango de los 400-700 nm, región a la que se le denomina Radiación Fotosintéticamente Activa (PAR, por sus siglas en inglés), el único pigmento fotosintético presente en todos los organismos fitoplanctónicos es la clorofila-*a*. Por lo tanto, la mayoría de los algoritmos empleados en percepción remota satelital han apuntado hacia la estimación de este pigmento, el cual ha sido la principal fuente de información para el estudio de los FAN mediante percepción remota. Aunque la detección de clorofila-*a per se* en el agua no puede considerarse como un indicador inequívoco de FAN, la concentración de este pigmento frecuentemente proporciona información sobre la probable ocurrencia de un FAN además de proveer información sobre el desarrollo espaciotemporal de este tipo de eventos (Babin, 2008).

La medición de la clorofila-*a* mediante percepción remota satelital se fundamenta en los principios de la detección del color del mar (Babin, 2008). El color del mar es definido como la respuesta espectral del océano a la radiación solar incidente y la contribución de la radiación difusa del cielo (Aguirre-Gómez, 2004). Dicha respuesta espectral está determinada principalmente por la interacción de la luz incidente (REM con longitud de onda de 400-700 nm, correspondiente al espectro visible) y el material disuelto o suspendido en el agua. Las principales interacciones son la absorción y la dispersión de la luz, siendo la materia particulada la principal responsable de la dispersión, mientras que, el fitoplancton y la materia orgánica disuelta son los principales responsables de la absorción. La fracción de luz que después de interactuar con el material disuelto y suspendido en el agua, emerge del océano, así como la contribución de la radiación difusa del cielo, constituyen el color del mar (Aguirre-Gómez, 2004).

Los procesos de absorción y dispersión ocasionan la atenuación de la luz, provocando que la intensidad luminosa disminuya de manera exponencial a lo largo de la columna de agua (Babin, 2008). El proceso de absorción involucra la conversión de la REM en otro tipo de energía. El fitoplancton es uno de los principales responsables de la absorción de luz ya que, a través de pigmentos como la clorofila-*a*, el fitoplancton capta la luz y la convierte en energía

química en el proceso de la fotosíntesis (Aguirre-Gómez, 2004). Por otro lado, el esparcimiento de la REM involucra un cambio en su dirección y es principalmente ocasionada por partículas suspendidas en el agua. Debido a que la luz es atenuada de manera exponencial a lo largo de la columna de agua, los datos del color del mar proporcionan información sólo de pocos metros de profundidad, hasta donde la irradiancia descendente es atenuada al 37%, a lo que se le denomina primera profundidad óptica (Miller *et al.*, 2005; Aguirre-Gómez, 2004).

Cada componente del agua de mar contribuye a determinar las propiedades ópticas de esta (Babin, 2008). Las propiedades ópticas se dividen en dos grupos: inherentes y aparentes (Aguirre-Gómez, 2004). Las propiedades inherentes dependen únicamente de los componentes del medio acuático y no de la estructura geométrica del campo luminoso, estas propiedades son el coeficiente de absorción, el coeficiente de esparcimiento y la función de esparcimiento volumétrico. Contrastantemente, las propiedades aparentes dependen de las características del campo de radiación, las principales propiedades de este tipo son el coeficiente de atenuación difusa y la reflectancia. El conocimiento de las propiedades ópticas es fundamental en la percepción remota del color del océano, ya que a partir de tal conocimiento es posible obtener información acerca de cómo el material disuelto y suspendido en el agua absorbe y dispersa la luz, lo que a su vez permite inferir algunos aspectos de las condiciones del agua de mar (Aguirre-Gómez, 2004).

Según el componente que domine las propiedades ópticas del agua de mar, esta se clasifica en: aguas caso 1 y aguas caso 2. Las propiedades ópticas de las aguas caso 1 están dominadas por el fitoplancton y sus derivados. Ejemplos de este tipo de agua son las aguas oceánicas profundas y las aguas costeras sin influencia terrígena. Por su parte, las propiedades ópticas de las aguas caso 2, están determinadas por el material orgánico disuelto y los sedimentos. La mayoría de las aguas costeras, los estuarios, lagunas, así como los bancos de poca profundidad en los que hay resuspensión de sedimentos y las plataformas continentales extendidas con aportes fluviales, son ejemplos de aguas caso 2 (Aguirre-Gómez, 2004).

Es claro que son diferentes componentes los que contribuyen a la señal del color del mar que es detectada por los sensores remotos (Babin, 2008). Además, conforme la radiación emergente del océano se propaga a través de la atmósfera ocurren diversas interacciones electromagnéticas entre estas dos, lo cual modifica la señal original proveniente del mar. La señal que llega a un sensor remoto está compuesta de una alta contribución atmosférica (85-90%) y una pequeña contribución marina (5-10%). La contribución atmosférica está constituida por la dispersión de Rayleigh, la dispersión por aerosoles y la absorción por el ozono (Aguirre-Gómez, 2004). Mientras que la contribución marina está conformada por la radiancia que emerge del océano. El objetivo de la percepción remota satelital del color del océano es analizar la información correspondiente a la señal emergente del océano, por lo que es necesario corregir los efectos de la interferencia atmosférica (Aguirre-Gómez, 2004).

La corrección de la interferencia atmosférica y la extracción de información sobre algún agente productor de color del mar de interés puede lograrse empleando fundamentos teóricos y matemáticos. Basados en los conocimientos de los atributos ópticos de los constituyentes del agua de mar se han desarrollado algoritmos que permiten estimar algunos parámetros de interés, como la clorofila-*a*. Para la estimación de este pigmento fotosintético se explota el conocimiento de sus propiedades ópticas. La clorofila-*a* absorbe gran parte de la radiación de cada extremo del espectro visible, es decir en la región azul, aproximadamente a los 430 nm, y en el rojo, aproximadamente a los 660 nm. Asimismo, alrededor de los 680 nm se encuentra su pico de emisión o fluorescencia (Babin, 2008) (Figura 15).

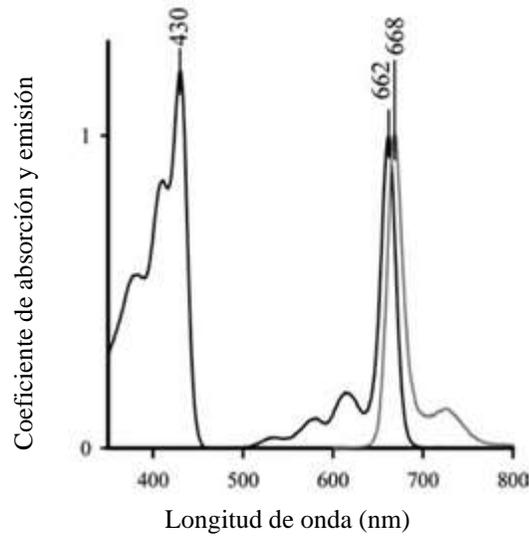


Figura 15. Espectro de absorción (línea negra) y emisión (línea gris) de la clorofila-*a*. pura disuelta en acetona Tomado de Babin (2008)

La cuantificación de la clorofila-*a* mediante percepción remota satelital se ha realizado empleando mediciones en diferentes regiones del espectro visible e infrarrojo cercano (Babin, 2008). Algoritmos basados en cocientes de la reflectancia emergente del agua de mar en la porción azul y verde del EEM, mediciones de la fluorescencia natural de este pigmento, así como algoritmos basados en cocientes en las porciones del rojo e infrarrojo cercano han sido empleados para cuantificar la clorofila-*a* (Babin, 2008). La mayoría de los algoritmos para la determinación de este pigmento derivan de cocientes de la reflectancia en las regiones azul y verde del EEM, los datos de clorofila-*a* empleados en el presente trabajo derivan de la aplicación de un algoritmo de este tipo, y se describe con mayor detalle en la sección de metodología.

Tabla 4. Principales pigmentos de diferentes grupos funcionales del fitoplancton formadores de FAN.

Pigmento		División o clase del fitoplancton				
		Cyanophyta	Dinophyta	Primnesio- phyceae	Bacillario- phyta	Raphido- phyceae
<b>Clorofilas</b>	A	•	•	•	•	•
	c1				•	
	c2		•	•	•	•
	c3			•		
<b>Carotenos</b>	A			+		
	B	+			a	+
<b>Xantofilas</b>	Diadinoxantina		•	•	•	•
	Dinoxantina		+			
	Fucoxantina			•	•	•
	19'-Hexanoyloxy- fucoxantina			•		
	Peridinina		•			
	Zeaxantina	•				
	<b>Biliproteínas</b>	Allophycocianinas	•			
	Phycocianinas	•				
	Phycoeritrinas	•				

Código: • pigmento principal (>10%); += pigmento accesorio (1–10%) del total de clorofilas o carotenoides o biliproteínas. <sup>a</sup> Bacillariophyta contiene pocas cantidades de β-carotenos.

Tomado de: Pettersson y Pozdnyakov (2013)

### 2.6.2 *TSM estimada por PRS y su relación con los FAN*

La TSM tiene aplicaciones relevantes en la detección de procesos oceanográficos asociados a la presencia de FAN (Shen *et al.*, 2012). La identificación espacial y temporal de algunas de las condiciones ambientales en las que ocurren los FAN pueden ser estudiadas a partir del análisis de patrones térmicos mostrados en imágenes satelitales, tales como la identificación de frentes, giros, zonas de surgencia, etcétera, proporcionando, de esta manera, un enfoque ecológico del estudio de los FAN (Shen *et al.*, 2012). Adicionalmente, en el caso de los FAN que no producen alta biomasa, o que la especie nociva no sea la dominante, y que por lo tanto su identificación mediante concentración de clorofila es complicada, la TSM puede proporcionar información para la detección de tales eventos a través de la identificación de procesos oceanográficos relacionados. Finalmente, pero no menos importante, la detección y el estudio de los FAN puede ser más amplia y con mayor detalle si se integran análisis de diferentes parámetros detectados mediante percepción remota satelital (Shen *et al.*, 2012; Babin, 2008; Miller *et al.*, 2005).

La detección de la TSM por percepción remota satelital se fundamenta en la ley de Planck y la ley de Wien (Miller *et al.*, 2005). Por un lado, la ley de Planck establece que existe una relación entre la temperatura y la radiación emitida por un cuerpo, de tal forma que es posible conocer el valor de la temperatura de un cuerpo, si se conoce su emisividad (Miller *et al.*, 2005). Por su parte, la ley de Wien establece la relación que existe entre la temperatura de un cuerpo y la longitud de onda en la cual tiene su máxima emisión, lo cual es de gran relevancia en la selección de la banda espectral a emplear en la determinación de la TSM por sensores remotos (Miller *et al.*, 2005). Debido a que la máxima emisión térmica de la superficie de la Tierra, incluyendo la superficie marina, ocurre en la región infrarroja del EEM, es que esta porción del espectro es empleada para determinar la TSM por sensores satelitales (Aguirre-Gómez, 2004; Miller *et al.*, 2005).

Además de aplicar las leyes de Planck y Wien para la determinación de la TSM, es necesario realizar correcciones atmosféricas para tener registros precisos de este parámetro. Debido a que la radiación emitida por la superficie marina es afectada por la absorción atmosférica, los sensores que determinan este parámetro están diseñados para medir en las ventanas atmosféricas ubicadas en el infrarrojo de onda larga (10-12.3  $\mu\text{m}$ ) y de onda corta (3.7-

4.2 $\mu\text{m}$ ), donde la influencia de la atmósfera es menor. No obstante, aún dentro de tales ventanas existe absorción atmosférica, la cual difiere en cada ventana, tal diferencia es utilizada para corregir los efectos atmosféricos mediante algoritmos (Aguirre-Gómez, 2004; Miller *et al.*, 2005). Para eliminar dicha interferencia, el método más empleado es el conocido como de la doble ventana. En este método se aprovechan dos zonas del espectro electromagnético a través de las cuales la absorción atmosférica es menor (10.5-12.5  $\mu\text{m}$ ). Basándose en la diferencial del vapor de agua, se establece un factor de corrección proporcional a la diferencia entre la radiación medida en ambos canales.

La mayoría de los algoritmos empleados dependen de relaciones empíricas entre la TSM y temperaturas de brillo observadas. Los coeficientes de tales algoritmos son determinados por regresión lineal de mediciones de radiancias determinadas por sensores satelitales contra muestras de datos de entrenamiento (Aguirre-Gómez, 2004; Miller *et al.*, 2005). Existen dos formas de realizar análisis de regresión de entrenamiento: empíricamente, contra mediciones de boyas *in situ* (método estadístico) o sintéticamente de cálculos de modelos de transferencia radiativa (método físico) (Miller *et al.*, 2005). El algoritmo que se emplea en el presente trabajo es el método estadístico y es descrito con más detalle en la sección de metodología.

### **3. Área de estudio**

#### **3.1 Ubicación geográfica y clima**

La Bahía de Manzanillo se encuentra en el municipio de Manzanillo en el estado de Colima, dentro de la región marítima denominada Pacífico Central Mexicano (PCM), entre las latitudes 19°05'27'' y 19°03'01''N y las longitudes y 104°21'01''y 104°17'25''O (Figura 16) Tiene una abertura de boca de aproximadamente 5.4 km en dirección NO-SE, está delimitada por Punta Santiago y Punta Ojo de Agua. La profundidad de la bahía es de 46 m en promedio, con una profundidad mínima de 10 m, cerca de la costa, y una máxima de 60 m, cerca de Punta Santiago (Padilla, 2016).

El clima de la región es tropical subhúmedo con lluvias en verano (Aw (m)( DIGAOHM, s.f ). La temperatura media anual es de 26.4 °C, con oscilaciones mensuales promedio menores a 5 °C. La humedad relativa tiene una media anual de 75%, alcanzado su valor promedio máximo (82% ) durante septiembre. En promedio al año se registran 137 días despejados y 116 nublados (DIGAOHM, s.f.).

La época de lluvia ocurre en los meses de julio a octubre, presentándose diferentes fenómenos meteorológicos. Debido a que la Bahía de Manzanillo se encuentra dentro del trayecto de los huracanes tropicales del SE, es posible que en época de lluvias se registren desde tormentas tropicales hasta huracanes de categoría 1 a 5 (DIGAOHM, s.f.).

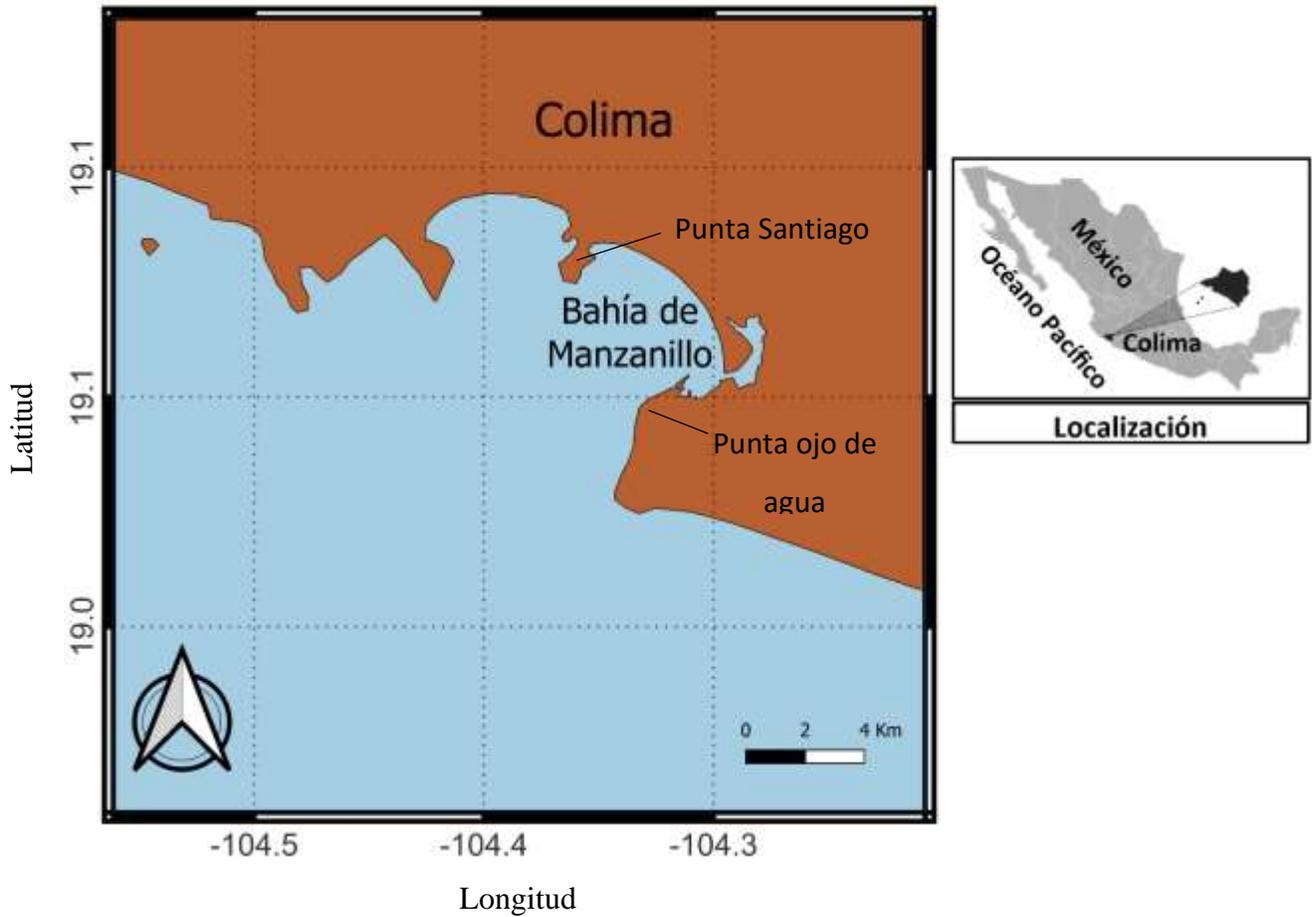


Figura 16. Área de estudio: ubicación de Bahía de Manzanillo, Colima, México. Elaboración propia.

### **3.2 Corrientes oceánicas superficiales y vientos dominantes**

La circulación superficial en el océano adyacente a la Bahía de Manzanillo es afectada por dos principales corrientes presentes en la región del PCM: la Corriente de California y la Contracorriente Norecuatorial (Núñez-Fernández, 2006). La Corriente de California fluye hacia el sur, transportando agua fría y de baja salinidad. Por su parte, la Contracorriente Norecuatorial, es una rama de la Corriente del Pacífico o Ecuatorial, su movimiento es en dirección norte, sus aguas son cálidas y de salinidad intermedia (Aguirre-Gómez, 2004).

Debido a la variabilidad estacional de las corrientes superficiales, la circulación oceánica adyacente a la Bahía de Manzanillo tiene una dirección predominante hacia el sur durante invierno y hacia al norte en verano (Núñez-Fernández, 2006). La intensidad de la Corriente de California y la Contracorriente Norecuatorial varía a lo largo del año. Durante el periodo de invierno la Corriente de California es más intensa, mientras que en verano es más intensa la Contracorriente Norecuatorial. Por otra parte, la circulación marina superficial en la bahía es afectada por la topografía de la costa y la velocidad del viento, que pueden dar origen a la formación de giros ciclónicos y anticiclónicos (Núñez-Fernández, 2006).

Los vientos dominantes en la Bahía de Manzanillo varían estacionalmente. De noviembre a junio los vientos dominantes son los del O y ONO, cuya rapidez anual promedio es de  $4.38 \text{ ms}^{-1}$ . Mientras que, de julio a octubre los vientos dominantes provienen del S y SSE y su rapidez media anual es de  $5 \text{ m s}^{-1}$  (DIGAOHM, s.f.; Galicia-Pérez, 1987). Se ha reportado que los vientos del O y ONO favorecen las surgencias costeras en el PCM incluyendo la Bahía de Manzanillo (Bulgakov y Martínez-Zatarián, 2006).

### **3.3 Surgencias costeras eólicas y ENOS en la Bahía de Manzanillo**

Se ha observado que las condiciones oceanográficas de la Bahía de Manzanillo son el resultado de interacciones de procesos de diferente escala espaciotemporal (Patiño-Barragán *et al.*, 2009)). Referente a los procesos oceanográficos asociados a la ocurrencia de los FAN en la Bahía de Manzanillo, se ha reportado que procesos de mesoescala, como las surgencias costeras y de macroescala como el fenómeno ENOS parecen tener una relación importante en la ecología de las especies de fitoplancton nocivo (Sierra-Beltrán *et al.*, 2004). La presencia de FAN en la bahía ha sido asociada a eventos de surgencias costeras eólicas y al fenómeno de ENOS que afectan la región del PCM (Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Morales-Blake *et al.*, 2013; Vega-Juárez, 2014). Tanto las surgencias costeras como la fase fría del fenómeno ENOS se caracterizan por ocasionar la elevación de la termoclina, promoviendo procesos de mezcla y consecuentemente la fertilización de la zona eufótica y el desarrollo del fitoplancton.

#### **Surgencias costeras eólicas**

Se ha reportado que la Bahía de Manzanillo se encuentra en la zona de surgencias que se presenta desde Cabo Corrientes, Jalisco hasta Michoacán (Morales-Blake *et al.*, 2013), la cual, a su vez, se sugiere que es una continuación del sistema de surgencias asociado a la Corriente de California (Galindo *et al.*, 1999). Se menciona que la intensidad de los afloramientos varía a lo largo de la costa, siendo Cabo Corrientes el sitio en donde ocurren los eventos de mayor intensidad (Morales-Blake *et al.*, 2013). La extensión de estos eventos también es variable, por ejemplo, se ha observado que la extensión de estas surgencias es de entre 18 y 27 km desde la costa hacia mar abierto. La duración de estos eventos oscila desde unos pocos días hasta semanas (Galindo *et al.*, 1999; Morales-Blake *et al.*, 2013). Estos procesos oceanográficos son de gran relevancia ya que generan cambios en las condiciones oceanográficas de las localidades en que ocurren, como ausencia de estratificación y la elevación de las isothermas e isopicnas, entre otras, lo que a su vez influye en la ecología del fitoplancton (Morales-Blake *et al.*, 2013).

Estas surgencias tienen un carácter estacional ya que se presentan durante invierno-primavera y son producidas por el sistema eólico dominante en el PCM que proviene del noroeste (NO) (López-Sandoval., 2009). Estos vientos tienen una componente paralela a la costa que genera

un transporte de Ekman hacia el mar, lo que a su vez produce el ascenso de aguas subsuperficiales (Galindo *et al.*, 1999). En el ciclo anual, específicamente en la zona localizada entre 18° y 22°N, y de 104°10'a los 107°25'O (dentro del PCM), se observó que la ocurrencia de surgencias se caracteriza por tres periodos: (1) un periodo de surgencia relativamente intensa en primavera, 2) un periodo de relajamiento de la surgencia a finales de primavera-inicios de verano y 3) el periodo de verano otoño, con fuerte estratificación de la columna que no favorece la presencia de surgencias (López-Sandoval, 2009).

### **El Niño Oscilación del Sur (ENOS)**

El fenómeno ENOS disminuye la productividad primaria en el Pacífico este, desde Norte América hasta Perú (Aguirre-Gómez, 1999; Monreal-Gómez, 1999). Se ha observado una sincronía entre la presencia de la fase cálida ENOS y el debilitamiento o completo cese de procesos de surgencia que favorecen la productividad primaria mediante la fertilización de la zona eufótica, en sistemas de surgencia de Oregon, el Pacífico central mexicano, Golfo de Tehuantepec, las costas de Perú y diferentes localidades de Centroamérica (Monreal-Gómez, 1999).

En el caso específico del PCM se ha observado la inhibición de surgencias en Cabo Corrientes, bajo condiciones de fase cálida ENOS (Aguirre-Gómez *et al.*, 1999). Debido a que los FAN, son formados por organismos fitoplanctónicos es entendible que la presencia de estos eventos sea afectada por procesos que modulan la productividad primaria. Específicamente en el caso de la influencia ocurrencia de FAN en Colima, y otras regiones del PCM., algunos autores han sugerido una relación entre la fase fría de ENOS, y el incremento en la ocurrencia de FAN (Hernández-Becerril, 2007; Gómez-Villarreal *et al.*, 2008; Vega-Juárez, 2014). Sin embargo, esta relación aun no es clara.

## 4. Materiales y métodos

### 4.1 Recolección de datos

**Datos de reportes de FAN:** Se obtuvo un registro de los FAN en la Bahía de Manzanillo para el periodo 2003 a 2013, recabando, comparando e integrando la información de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), la Universidad de Colima (UCOL) y de publicaciones científicas (Sierra-Beltrán *et al.*, 2004; Ortiz-Lira y Jiménez-Quiroz, 2006; Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Sosa-Ávalos *et al.*, 2015; Quijano-Scheggia *et al.*, 2016). Los datos disponibles en el sitio electrónico de la COFEPRIS abarcaron el periodo 2007 a 2013 (COFEPRIS, 2016), la información proporcionados por la UCOL comprende el periodo 2003 a 2011, y la información de las publicaciones científicas fue empleada para complementar los datos de las dos fuentes anteriores. La información obtenida incluye, la duración de los FAN y la composición de especies (Tabla 5).

Los datos reportados en las tres fuentes coincidieron casi totalmente, excepto en dos aspectos. Por un lado, ni la UCOL ni la COFEPRIS documentaron la ocurrencia de FAN durante 2004, sin embargo, Ortiz-Lira y Jiménez-Quiroz (2006) reportaron la ocurrencia de uno de estos eventos. Por otro lado, los datos de composición de especies mencionados por la UCOL fueron, la mayoría de las veces, más detallados que los de la COFEPRIS.

**Datos satelitales de TSM y clorofila-*a*:** Se obtuvieron imágenes satelitales de la TSM y de clorofila-*a*, generadas a partir de datos del espectro radiómetro de resolución moderada (MODIS, por sus siglas en inglés) correspondientes al periodo de estudio, el cual abarca de enero de 2003 a diciembre de 2013. Las imágenes obtenidas son de dos diferentes resoluciones temporales: mensual y diaria, en ambos casos, tienen proyección Mercator y resolución espacial de 1km.

Los compuestos mensuales fueron proporcionados por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y abarcan cada uno de los meses del periodo de estudio. Mientras que, las imágenes diarias fueron descargadas del portal *Ocean Color*, perteneciente a la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) y corresponden a las fechas con reporte de FAN, así como a los cinco días previos y posteriores, cuando estuvieron disponibles, ya que debido principalmente al ancho de barrido del sensor y a características de la órbita del satélite, que ocasionan que la

resolución temporal de las imágenes sea no de uno, sino de dos días para algunas latitudes, así como a la interferencia ocasionada por la presencia de nubes, no se tuvieron imágenes disponibles para cada uno de los días del periodo estudiado. El nivel de procesamiento de las imágenes es L2, lo cual implica que son productos generados a través de algoritmos conocidos, los cuales se describen a continuación.

Cada píxel de las imágenes, ya sean compuestos mensuales o imágenes diarias, tiene un valor de temperatura expresada en grados Celsius (°C), para el caso de las imágenes de TSM, y un valor de concentración de clorofila-*a* expresada en mg/m<sup>3</sup>, en el caso de las imágenes de clorofila-*a*.

Para el cálculo de la clorofila-*a* se emplea el algoritmo OC3M (Cerdeira-Estrada y López-Saldaña, 2011). Este algoritmo utiliza una relación empírica derivada de mediciones *in situ* de la clorofila-*a* y la reflectancia medida por percepción remota en la región azul y verde del EEM. La concentración de clorofila-*a* es expresada en mg/m<sup>3</sup> y corresponden a la reflectancia de la primera profundidad óptica. El algoritmo OC3M es una relación polinomial de cuarto grado entre la proporción de las reflectancias de la región azul y verde del EEM medidas por percepción remota satelital y la clorofila-*a* (McClain *et al.*, 1985; NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group., s.f.). De acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\log_{10} (Cl-\alpha) = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i \left( \log_{10} \left( \frac{R_{rs}(\lambda_{azul})}{R_{rs}(\lambda_{verde})} \right) \right)^i$$

Donde R<sub>rs</sub>=reflectancias determinadas por percepción remota satelital, λ<sub>azul</sub>=443 nm > 488 nm (bandas 9 y 10 del MODIS), λ<sub>verde</sub>= 547nm (banda 12 del MODIS), a<sub>0</sub>=0.2424, a<sub>1</sub>=-2.7423, a<sub>2</sub>=1.8017, a<sub>3</sub>=0.0015 y a<sub>4</sub>=-1.2280

Por su parte, los datos de TSM empleados en el presente trabajo son calculados a partir del algoritmo de tipo estadístico propuestos por McClain *et al.* (1985), basados en el método multicanal de ventana dividida. Este algoritmo calcula la diferencia de la temperatura de brillo de mediciones en las longitudes de onda de 11 y 12 μm, correspondientes al infrarrojo de onda larga o infrarrojo térmico (bandas 31 y 32 del MODIS) (Cerdeira-Estrada y López-

Saldaña, 2011; McClain *et al.*, 1985; NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group., s.f.), que se representa con la siguiente fórmula:

$$TSM = a_0 T_{11} + a_1 (T_{11} - T_{12}) + a_2 (T_{11} - T_{12}) (\seczen - 1) + a_3$$

Donde  $T_{11}$  y  $T_{12}$  son las temperaturas de brillo calculadas a partir de radiancias,  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  son constantes experimentales y  $\seczen$  es la secante del ángulo de inclinación del radiómetro al momento de realizar la observación (Galindo *et al.*, 1999; Aguirre-Gómez, 2004).

## 4.2 Preparación de los datos

**Elaboración de la serie de tiempo de reporte de FAN:** Se construyó una serie de tiempo de la ocurrencia de FAN empleando número de días de FAN para cada mes del periodo de estudio.

**Elaboración de la serie de tiempo de los compuestos mensuales de la TSM y de la clorofila-*a*:** Este procedimiento consistió en dos grandes pasos. El primer paso fue exportar y filtrar los datos satelitales de TSM y clorofila-*a* correspondientes al área de estudio, y el segundo paso consistió en emplear los datos exportados y filtrados para calcular las anomalías mensuales, con las que a su vez se construyeron las series de tiempo de TSM y clorofila-*a*. Es importante aclarar que en este procedimiento se emplearon solamente los compuestos mensuales de TSM y clorofila-*a*, mientras que las imágenes diarias fueron analizadas con otro procedimiento que se describe más adelante, en esta misma sección.

Durante el primer paso, los valores de las imágenes satelitales de TSM y de la clorofila-*a* del área de estudio fueron exportados a una hoja de cálculo. Para lo cual, se elaboró un cuadrante de muestreo que permitiera tomar datos representativos del área de estudio. El cuadrante de muestreo tiene un área aproximada de 6 km<sup>2</sup> y se ubica entre los 104°20'17'' y 104°21'22'' longitud oeste y 18°59'54'' y 18°59'21'' latitud norte (Figura 17).

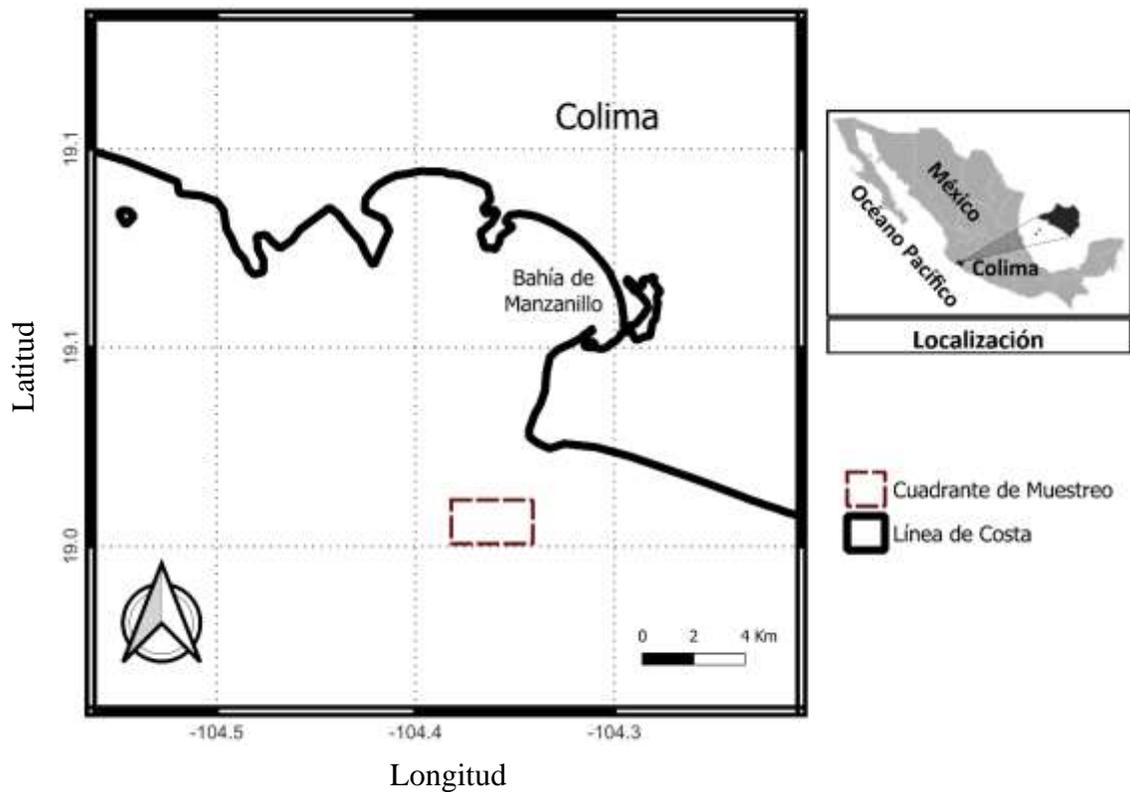


Figura 17. Con línea punteada se representa el cuadrante de muestreo en la zona costera frente a la Bahía de Manzanillo. Como criterios para su ubicación se eligió que estuviera en la zona costera, donde se realizan los muestreos *in situ* para el monitoreo de FAN y que los datos satelitales no presentaran alta interferencia. Elaboración propia.

Para definir la localización del cuadrante de muestreo se consideró que se ubicara en una zona en la que los datos satelitales no presentaran una alta interferencia de la costa. Por lo cual no fue posible ubicarlo exactamente dentro de la Bahía de Manzanillo, sino que se eligió una zona adyacente con menor interferencia lo más cerca posible a la bahía. Tomando en cuenta que el cuadrante de muestreo se encuentra en la zona costera de la Bahía de Manzanillo y que los reportes de FAN están acotados a dicha área (COFEPRIS, 2016), puede concluirse que la muestra de datos satelitales es representativa del área de estudio.

Una vez que los valores de TSM y de clorofila-*a* correspondientes al cuadrante de muestreo fueron exportados, se procedió a filtrarlos. Para filtrar los datos se calculó la mediana de los valores de los píxeles de la imagen satelital abarcados por el cuadrante de muestreo. De tal

manera que para cada compuesto mensual se obtuvo un único valor, la mediana, de TSM y de la clorofila-*a*.

Para el segundo paso, cada una de las medianas obtenidas en el paso anterior fueron empleadas para calcular las anomalías mensuales empleando la ecuación:

$$A_{i|j} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_{ij}}{\delta x_{ij}}$$

Donde, *A* representa la anomalía, definida como la variación alrededor de la mediana. Los subíndices *i* y *j*, representan los meses (enero a diciembre), y años del periodo de estudio (2003-2013), respectivamente.  $X_{ij}$  es el valor (de clorofila-*a* o TSM) para cada mes y año específico,  $\bar{X}_{ij}$  es la climatología mensual (de clorofila-*a* o de TSM), y  $\delta x_{ij}$  es la desviación estándar.

Finalmente, las anomalías fueron empleadas para elaborar las series de tiempo de la TSM y de la clorofila-*a* de todo el periodo de estudio.

### **4.3 Análisis de los datos mensuales: análisis espectral y análisis de coherencia**

Con el objetivo de identificar la influencia de las surgencias costeras y del fenómeno ENOS, sobre la variabilidad temporal de los FAN en la mesoescala y la macroescala, se realizó un análisis espectral de las series de tiempo de los FAN, la TSM y la clorofila-*a*. El análisis espectral describe la variabilidad de series de tiempo en términos de sus funciones periódicas dominantes. (Thomson. y Emery, 2014). Tanto la TSM como la clorofila-*a* se emplearon como indicadores de la ocurrencia de surgencias en la mesoescala y como indicadores del fenómeno ENOS en la macroescala. Para este análisis primero se elaboraron series de tiempo de la ocurrencia mensual de FAN, y de las anomalías mensuales de TSM y de clorofila-*a*. A continuación, con cada una de las series de tiempo se llevó a cabo el análisis espectral empleando la técnica de la transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés), usando el programa Matlab versión 2017b.

Posteriormente, con el objetivo de cuantificar la correlación de las series de tiempo en el dominio del periodo, se realizó un análisis de coherencia de magnitud cuadrada. La estimación de la coherencia de magnitud cuadrada ( $C_{xy}(f)$ ) es una función de las densidades espectrales de potencia  $P_{xx}(f)$  y  $P_{yy}(f)$ , y de la densidad espectral de potencia cruzada,  $P_{xy}(f)$ , de “x” e “y”, con valores entre 0 y 1. Estos valores indican lo bien que “x” corresponde a “y” en cada periodo (The Mathworks, s.f.) (Thomson y Emery, 2014). Su ecuación es la siguiente:

$$C_{xy}(f) = \frac{|P_{xy}(f)|}{P_{xx}(f)P_{yy}(f)}^2$$

Se emplearon las series de tiempo de FAN, TSM y clorofila-*a*, y se determinó la coherencia de magnitud cuadrada entre los pares de series de tiempo de FAN y clorofila-*a* y de FAN y TSM, empleando el programa Matlab versión 2017b.

Para complementar el análisis de correlación en la mesoescala entre los FAN y los datos satelitales de la TSM, y la clorofila-*a*, se calcularon las climatologías mensuales de la TSM y clorofila-*a* de todo el periodo de estudio calculadas a partir de la mediana de los valores de los pixeles de la imagen satelital abarcados por el cuadrante de muestreo. Las climatologías mensuales de TSM y clorofila-*a* fueron empleadas para identificar de manera integrada la variabilidad mensual de estos parámetros y posteriormente poder compararla con la variabilidad mensual de los FAN. Se consideró que las climatologías mensuales de las variables de estudio son relevantes debido a que se acotan a una escala estacional, que, a su vez, corresponde a una de las escalas en las que ocurren los procesos de surgencias y que se ha sugerido como moduladores de los FAN en el área de estudio.

Por su parte, para complementar el análisis de la covariabilidad, en la macroescala entre los FAN, la TSM, y la clorofila-*a*, estos últimos dos parámetros considerados como indicadores del fenómeno ENOS, se calculó el promedio anual de TSM y clorofila-*a* de cada año del periodo de estudio y se consultaron los valores del Índice Multivariado El Niño Oscilación del Sur, MEI (por sus siglas en inglés) del portal *The NOAA Physical Sciences Laboratory*, perteneciente a la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés) (<https://psl.noaa.gov/enso/mei/>). Los promedios anuales de TSM y clorofila-*a* fueron empleados para identificar de manera integrada la variabilidad de estos parámetros y

compararla con años en donde condiciones de fase fría o fase cálida de ENOS fueron dominantes, según el MEI, así como con la variabilidad anual de los FAN.

Adicionalmente, para el análisis de la variabilidad temporal en la macroescala, también se empleó el Índice de la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP), ya que se ha observado que la fase fría o negativa de la ODP tiene una relación con los florecimientos algales similar a la fase fría del fenómeno ENOS (Pitcher *et al.*, 2010; Cortés-Altamirano *et al.*, 2019). Los valores del Índice de la ODP fueron obtenidos del portal de los Centros Nacionales de Información Ambiental (NCEI por sus siglas en inglés) (<https://www.ncei.noaa.gov/pub/data/cmb/ersst/v5/index/ersst.v5.pdo.dat>) perteneciente a la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés). El procedimiento fue el mismo que el empleado con el MEI, es decir los datos del Índice de la ODP fueron consultados para identificar las fases de este proceso oceanográfico y compararlos con el promedio de FAN por año, así como con promedios anuales de TSM y clorofila-*a*. Es importante mencionar que, aunque el periodo de estudio del presente trabajo abarca solamente una década (2003-2013) y por lo tanto sería insuficiente para estudiar un proceso oceanográfico como la ODP que se presenta en lapsos de 20 a 30 años, se ha reportado que desde 1999 las fases de la ODP han sido más cortas, de aproximadamente 3 años (NOAA, 2023). Por lo que en el presente trabajo se consideró una posible influencia de este fenómeno sobre la variabilidad temporal de los FAN.

#### **4.4 Análisis de los datos diarios de la TSM y la clorofila-*a*: diagramas de dispersión y análisis de regresión lineal**

##### **Diagramas de dispersión y análisis de regresión de los valores diarios de TSM y**

**clorofila-*a***: Con la finalidad de tener una representación gráfica y una estimación numérica del comportamiento del conjunto de datos de TSM y clorofila-*a* en la escala de los días, para cada FAN, se elaboró un diagrama de dispersión y un análisis de regresión lineal. Como ya se mencionó, las imágenes diarias fueron descargadas del portal *Ocean Color*, perteneciente a la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?sen=am>) En total se recabaron 308 imágenes, de las cuales 243 fueron de TSM y 65 de clorofila-*a*. Como primer paso, se exportaron los datos de TSM y clorofila-*a* circunscritos al cuadrante de muestreo (Figura 17) y correspondientes a las fechas con reporte de FAN, así como de los cinco días previos y posteriores, cuando estuvieron disponibles. Posteriormente, con la finalidad de disminuir la influencia de píxeles con valores extremos, se calculó la mediana de los datos de TSM y de clorofila-*a* de los píxeles de la imagen satelital abarcados por el cuadrante de muestreo. De tal manera que para cada compuesto mensual se obtuvo un único valor, la mediana, de TSM y de la clorofila-*a*. Con estos datos se elaboraron los diagramas de dispersión y se calculó la recta de mejor ajuste. Esta información se encuentra a manera de anexo, al final del presente escrito.

Adicionalmente, para presentar de manera sintetizada los cambios de TSM y de clorofila-*a* que se presentaron antes, durante y después de los días con reporte de cada uno de los 25 FAN, se elaboraron las Tablas 7 y 8. En dichas tablas, se muestra el promedio de los valores de TSM y de clorofila-*a*, de los días correspondientes a reporte de FAN, de los cinco días previos y de los cinco días posteriores a dicho reporte. Además, se indica el rango de TSM y de clorofila-*a* que presentó cada FAN, lo que proporciona información acerca de cuantos °C o mg/m<sup>3</sup> fluctuaron estos parámetros, respectivamente. Y también se indica el valor de la recta de mejor ajuste obtenido del análisis de regresión lineal, el cual nos permite identificar si la tendencia de la TSM y de la clorofila-*a* fue a aumentar o disminuir, dependiendo si el signo de la recta fue positivo o negativo.

**Identificación de la influencia de surgencias en la escala de los días:** En este paso se emplearon únicamente imágenes de la TSM, debido a la baja disponibilidad de imágenes de clorofila-*a* que dificultó estimar el comportamiento del conjunto de datos de este pigmento en la escala de los días. En cuanto a los datos de TSM, para determinar si los cambios de esta variable podían indicar la presencia de un evento de surgencia, se empleó como criterio identificar cambios iguales o mayores a 1.7 °C dentro de un rango máximo de 10 días. Este criterio está basado, por un lado, en los reportes previos en el Pacífico mexicano, en los que se han empleado imágenes satelitales de la TSM y se ha sugerido que cambios de 2 °C (Aguirre-Gómez *et al.*, 1999) y de 1.7 °C (Vega-Juárez, 2014) están asociados a eventos de surgencia. Por otro lado, se consideró que las variaciones iguales o mayores a 1.7 °C en la TSM debían de ocurrir en un rango máximo de diez días debido a que, se ha descrito que, los eventos de surgencia se desarrollan en periodos de tres a diez días como consecuencia, principalmente de la intermitencia de los vientos, lo que, a su vez, es uno de los factores que modula la duración de los FAN en la escala de los días (Pitcher *et al.*, 2010). Finalmente, se consideró que cuando la pendiente de la recta de mejor ajuste es negativa, y que por lo tanto indica una tendencia de la TSM a disminuir, es un indicador de la ocurrencia de un evento de surgencia, ya que una característica de estos eventos es la disminución de la TSM (Aguirre-Gómez *et al.*, 1999; Pitcher *et al.*, 2010). Mientras que, cuando la pendiente fue positiva, y que por lo tanto describe una tendencia de la TSM a aumentar, se consideró como indicador de la culminación de un evento de surgencia.

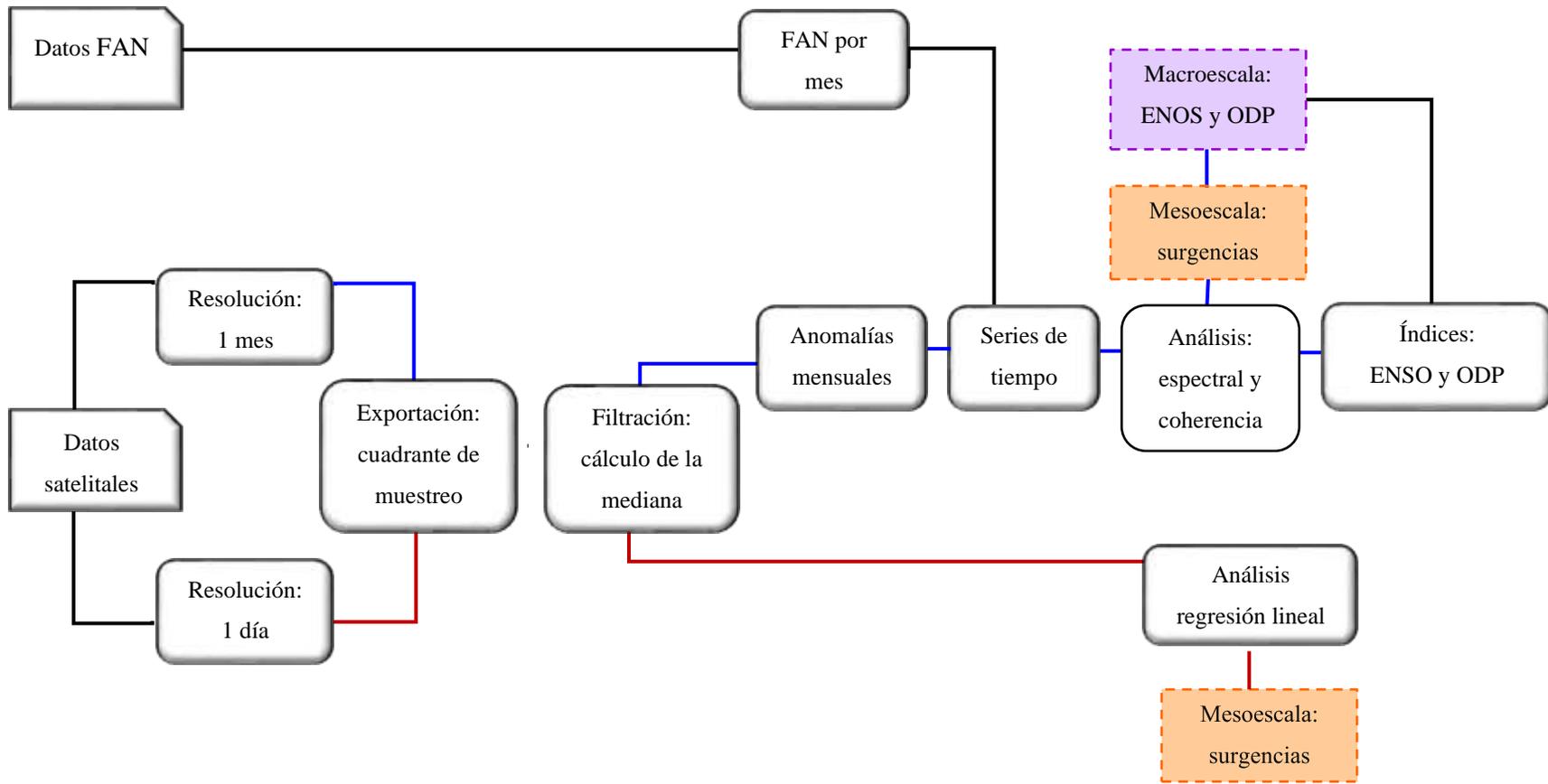


Figura 18. Esquema de los principales pasos de la metodología empleada para analizar la variabilidad temporal de los FAN, la clorofila *a* y la TSM. Por un lado, se observa que los datos mensuales de las variables de estudio fueron empleados para identificar la variabilidad temporal tanto en la mesoescala como en la macroescala. Por otro lado, se muestra que los datos satelitales de resolución temporal de un día fueron empleados para complementar el análisis de la variabilidad temporal únicamente en la mesoescala.

## 5. Resultados y análisis de resultados

### 5.1 Registro de FAN para la década 2003-2013

Para el periodo de estudio, que abarcó la década 2003-2013, se obtuvo un registro de 25 FAN. Del total de los FAN registrados, en 14 eventos se presentaron especies clasificadas como productoras de toxinas (Lundholm *et al.*, 2009 en adelante; COFEPRIS, 2016) y 11 presentaron una especie potencialmente nociva (COFEPRIS, 2016) (Tabla 5).

En total se registraron 10 especies formadoras de FAN. De estas especies, ocho son potencialmente tóxicas y pertenecen al grupo taxonómico Dinoflagellata (dinoflagelados), una especie es potencialmente tóxica y pertenece al grupo Bacillariophyta (diatomeas) (Lundholm *et al.*, 2009 en adelante) y una especie es potencialmente nociva y pertenece al grupo Ciliophora (ciliados). La dominancia de los dinoflagelados observada en el presente trabajo ha sido previamente reportada para el área de estudio y en general para las costas de México (Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Quijano-Scheggia *et al.*, 2015; Cortés-Lara *et al.*, 2022), en donde del total de las 70 especies formadoras de FAN, 47 pertenecen al grupo de los dinoflagelados (Hernández-Becerril *et al.*, 2007). Esta dominancia ha sido asociada a un conjunto de estrategias adaptativas que posee este grupo taxonómico, entre las que destacan: estructuras de locomoción, estrategia de reproducción *r*, mixotrofia y producción de estructuras de resistencia o quistes (Lalli y Parsons, 1997; Burkholder *et al.*, 2006).

En cuanto a la recurrencia de especies formadoras de FAN, se observó que *Mesodinium rubrum* y *Gymnodinium catenatum* fueron las especies más frecuentes, ya que estuvieron presentes en más de la mitad del periodo de estudio (Tabla 6). La alta recurrencia de estos organismos coincide con lo reportado en trabajos previos que mencionan a *M. rubrum* y *G. catenatum* dentro de las especies formadoras de FAN más frecuentes en la Bahía de Manzanillo, y también como las más dominantes en cuanto a biomasa (Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Quijano-Scheggia *et al.*, 2016). Entre las causas que favorecen la dominancia de estas especies, se han mencionado las condiciones de surgencia y post-surgencia (Vega-Juárez, 2014), que ocurren en el Pacífico Central Mexicano principalmente durante invierno-primavera (Sierra-Beltrán *et al.*, 2004; Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Morales-Blake *et al.*, 2013; Vega-Juárez, 2014; Cortés-Lara *et al.*, 2022). En el presente estudio, la alta recurrencia de *M. rubrum* y *G. catenatum* se asocia al hecho de que la mayoría de los FAN ocurrieron

dentro de la temporada de surgencias, principalmente en primavera, por lo que es probable que estas especies encontraron condiciones que favorecieron su florecimiento. La información de la relación entre estas especies y los procesos de surgencia se detallan más adelante.

Por otra parte, las especies formadoras de FAN menos recurrentes fueron *Lingulodinium polyedra*, que se presentó únicamente en el año 2012 y *Pseudo-nitzschia* sp., y *Karlodinium* sp., que fueron registradas únicamente en 2008 (Tabla 6). Previamente se han reportado a *L. polyedra* y *Pseudo-nitzschia* sp. como especies poco frecuentes en la Bahía de Manzanillo (Quijano-Scheggia *et al.*, 2016), mientras que para *Karlodinium* sp. no hay reportes previos en el área de estudio, (Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Quijano-Scheggia *et al.*, 2016) incluso se menciona que hay poca información del género *Karlodinium* y de otros dinoflagelados atecados (sin armadura o desnudos) en las costas de México (Hernández-Becerril *et al.*, 2007). En el presente trabajo, *Karlodinium* sp. se registró únicamente de marzo a mayo de 2008 y, aunque tampoco hay reportes de toxinas asociadas a este microorganismo, es importante mencionar que algunas especies del género *Karlodinium* son productoras de ictiotoxinas (Lundholm *et al.*, 2009 en adelante), por lo que es de importancia sanitaria reportar y monitorear la presencia de este género. Por otra parte, es posible considerar que la efímera aparición de *Karlodinium* sp. indica que puede ser una especie exótica introducida por actividades antropogénicas. Algunos autores han propuesto la hipótesis de que, principalmente a través de aguas de lastre, se puede introducir microorganismos exóticos, incluyendo especies formadoras de FAN (Hernández-Becerril *et al.*, 2007).

También es importante considerar que, el hecho de que *Karlodinium* sp. sea un registro nuevo para la Bahía de Manzanillo, es un indicador de que la información histórica acerca de la composición de especies formadoras de FAN es aún incompleta. En el presente trabajo se recabó información de tres diferentes fuentes: la base de datos de la COFEPRIS (COFEPRIS, 2016), una base de datos elaborada por la UCOL, y publicaciones científicas (Sierra-Beltrán *et al.*, 2004; Ortiz-Lira y Jiménez-Quiroz, 2006; Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Sosa-Ávalos *et al.*, 2015; Quijano-Scheggia *et al.*, 2016). Aunque en general hubo una gran coincidencia, algunas fuentes eran más completas y detalladas en cuanto a la información de las especies. Específicamente, *Karlodinium* sp. fue registrada únicamente en la base de datos

de la UCOL, indicando que se presentó solamente en 2008. Esta situación resalta la necesidad de hacer una revisión más exhaustiva e integrada tanto de los registros históricos, como de las actualizaciones de la información de los FAN en la Bahía de Manzanillo en cuanto a su composición de especies, pues esta información puede ser de apoyo para el diseño de sistemas de monitoreo y alerta temprana.

Tabla 5. Registro de FAN en la Bahía de Manzanillo de 2003-2013. Se resalta con rojo a las especies potencialmente tóxicas. Con asterisco (\*) se indica a la especie potencialmente nociva.

Fecha de reporte de FAN	Grupo funcional	Especies	Efecto nocivo potencial
24-28 marzo de 2003	Ciliado	<i>Mesodinium rubrum*</i>	Alta biomasa
11-21 mayo de 2004	Dinoflagelado	<i>Tripos divaricatus</i> ( <i>Ceratium divaricatum</i> )	
	Ciliado	<i>Mesodinium rubrum*</i>	Alta biomasa
26 marzo de 2007.	Dinoflagelado	<i>Karenia mikimotoi</i>	Gymnodimina y especies reactivas de oxígeno
	Dinoflagelado	<i>Karenia mikimotoi</i>	Gymnodimina y especies reactivas de oxígeno
3 abril -27 junio de 2007	Dinoflagelado	<i>Gymnodinium catenatum</i>	Saxitoxina
	Dinoflagelado	<i>Margalefidinium polykrikoides</i>	Ictiotoxinas y especies reactivas de oxígeno
	Dinoflagelado	<i>Tripos divaricatus</i> ( <i>Ceratium divaricatum</i> )	
23 de febrero de 2008	Diatomeas	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	Ácido domoico
6-12 marzo de 2008	Ciliado	<i>Mesodinium rubrum*</i>	Alta biomasa
	Dinoflagelado	<i>Karenia mikimotoi</i>	Gymnodimina y especies reactivas de oxígeno
20 de marzo-13 abril de 2008	Dinoflagelado	<i>Karlodinium</i> sp.	Karlotoxinas
	Dinoflagelado	<i>Polykrikos hartmannii</i>	Ictiotoxinas
	Dinoflagelado	<i>Dinophysis caudata</i>	Ácido okadaico
	Dinoflagelado	<i>Margalefidinium polykrikoides</i>	Ictiotoxinas y especies reactivas de oxígeno
	Dinoflagelado	<i>Levanderina fissa</i> ( <i>Gyrodinium instriatum</i> )	
18 de abril de 2008	Dinoflagelado	<i>Akashiwo sanguinea</i>	
	Dinoflagelado	<i>Prorocentrum micans</i>	
	Diatomea	<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.	Ácido domoico
26 de abril de 2008	Dinoflagelado	<i>Polykrikos hartmannii</i>	Ictiotoxinas
	Dinoflagelado	<i>Akashiwo sanguinea</i>	

Fecha de reporte de FAN	Grupo funcional	Especies	Efecto nocivo potencial
	Dinoflagelado	<i>Levanderina fissa</i> ( <i>Gyrodinium instriatum</i> )	
3 mayo de 2008	Dinoflagelado	<i>Karlodinium</i> sp.	Karlotoxinas
	Dinoflagelado	<i>Polykrikos hartmannii</i>	Ictiotoxinas
	Dinoflagelado	<i>Akashiwo sanguinea</i>	
4-25 marzo de 2009	Dinoflagelado	<i>Dinophysis caudata</i>	Ácido ocadaico
	Ciliado	<i>Mesodinium rubrum</i> *	Alta biomasa
29 marzo 2009	Dinoflagelado	<i>Levanderina fissa</i> ( <i>Gyrodinium instriatum</i> )	
	Dinoflagelado	<i>Gymnodinium catenatum</i>	Saxitoxina
9-15 de mayo 2009	Dinoflagelado	<i>Polykrikos hartmannii</i>	Ictiotoxinas
	Dinoflagelado	<i>Prorocentrum micans</i> <i>Polykrikos schwartzii</i>	
14 abril 2010	Ciliado	<i>Mesodinium rubrum</i> *	Alta biomasa
	Dinoflagelado	<i>Peridinium quadridentatum</i> ( <i>Peridinium quinquecorne</i> )	
7 mayo-14 junio 2010	Dinoflagelado	<i>Gymnodinium catenatum</i>	Saxitoxina
	Dinoflagelado	<i>Levanderina fissa</i> ( <i>Gyrodinium instriatum</i> )	
	Dinoflagelado	<i>Prorocentrum micans</i>	
	Dinoflagelado	<i>Tripos furca</i> ( <i>Ceratium furca</i> )	
	Dinoflagelado	<i>Dinophysis</i> sp.	
15 diciembre de 2010-5 enero de 2011	Dinoflagelado	<i>Gymnodinium catenatum</i>	Saxitoxina
	Dinoflagelado	<i>Pyrodinium bahamense</i>	Saxitoxina
10 de febrero de 2011	Ciliado	<i>Mesodinium rubrum</i> *	Alta biomasa
	Dinoflagelado	<i>Mesodinium rubrum</i> *	Alta biomasa
9 de marzo de 2011	Dinoflagelado	<i>Levanderina fissa</i> ( <i>Gyrodinium instriatum</i> )	
	Dinoflagelado	<i>Tripos divaricatus</i> ( <i>Ceratium divaricatum</i> )	
15-22 marzo de 2011.	Eustigmatofita	<i>Nannochloropsis</i> sp.	
	Ciliado	<i>Mesodinium rubrum</i> *	Alta biomasa
11 enero-1 febrero de 2012	Dinoflagelado	<i>Tripos divaricatus</i> ( <i>Ceratium divaricatum</i> )	
	Ciliado	<i>Mesodinium rubrum</i> *	Alta biomasa
2-6 marzo de 2012	Dinoflagelado	<i>Gymnodinium catenatum</i>	Saxitoxina
	Dinoflagelado	<i>Margalefidinium polykrikoides</i>	Ictiotoxinas y especies reactivas de oxígeno
	Ciliado	<i>Mesodinium rubrum</i> *	Alta biomasa

<b>Fecha de reporte de FAN</b>	<b>Grupo funcional</b>	<b>Especies</b>	<b>Efecto nocivo potencial</b>
28 marzo-6 abril de 2012	Ciliado	<i>Mesodinium rubrum*</i>	Alta biomasa
	Dinoflagelado	<i>Protoperidinium</i> sp.	
	Diatomea	<i>Chaetoceros</i> sp.	
	Dinoflagelado	<i>Ceratium</i> sp.	
5-13 junio de 2012	Dinoflagelado	<i>Lingulodinium polyedra</i>	Yesotoxina
2-5 mayo de 2013	Ciliado	<i>Mesodinium rubrum*</i>	Alta biomasa
	Dinoflagelado	<i>Scrippsiella</i> sp.	
31 octubre-27 noviembre de 2013	Dinoflagelado	<i>Gymnodinium catenatum</i>	Saxitoxina
	Dinoflagelado	<i>Dinophysis</i> sp.	
	Dinoflagelado	<i>Margalefidinium catenatum</i>	

Tabla 6. Listado de especies ordenado descendientemente con base en la recurrencia por año. En rojo están resaltadas las especies potencialmente tóxicas y en azul la especie potencialmente nociva.

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	TOTAL DE AÑOS
<i>Mesodinium rubrum</i>	●	●				●	●	●	●	●	●	8
<i>Gymnodinium catenatum</i>					●		●	●	●	●	●	6
<i>Levanderina fissa</i> ( <i>Gyrodinium instriatum</i> )						●	●	●	●			4
<i>Tripos divaricatus</i> ( <i>Ceratium divaricatum</i> )		●			●				●			3
<i>Prorocentrum micans</i>						●	●	●				3
<i>Margalefidinium polykrikoides</i>					●	●				●		3
<i>Dinophysis caudata</i>						●	●					2
<i>Dinophysis</i> sp.								●			●	2
<i>Karenia mikimotoi</i>					●	●						2
<i>Polykrikos hartmannii</i>						●	●					2
<i>Pyrodinium bahamense</i>								●	●			2
<i>Akashiwo sanguinea</i>						●						1
<i>Tripos furca</i> ( <i>Ceratium furca</i> )								●				1
<i>Ceratium</i> sp.										●		1
<i>Chaetoceros</i> sp.										●		1
<i>Karlodinium</i> sp.						●						1
<i>Lingulodinium polyedra</i>										●		1
<i>Margalefidinium catenatum</i>											●	1
<i>Nannochloropsis</i> sp.									●			1
<i>Peridinium quadridentatum</i> ( <i>Peridinium quinquecorne</i> )								●				1
<i>Polykrikos schwartzii</i>							●					1
<i>Protoperdinium</i> sp.										●		1
<i>Pseudo-nitzschia</i> sp.						●						1
<i>Scrippsiella</i> sp.											●	1
<b>TOTAL DE ESPECIES NOCIVAS</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	
<b>TOTAL DE ESPECIES</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	

## 5.2 Variabilidad temporal de los FAN en la mesoescala: datos mensuales

Las series de tiempo del número de días de FAN y de los datos satelitales de TSM y clorofila-*a*, mostraron su señal espectral más importante y el valor más alto de coherencia en la mesoescala, concretamente a los 12 meses. En el periodograma del análisis espectral (Figura 19) se observa que las oscilaciones temporales más importantes de las variables de estudio ocurrieron de manera recurrente en periodos de un año aproximadamente, es decir, las variables de estudio oscilan estacionalmente (Figura 19). Además, el análisis de coherencia permite comprobar que la principal correlación entre las variables de estudio ocurrió también a los 12 meses (Figura 20). Esta variabilidad estacional puede apreciarse de manera más detallada al observar la distribución mensual del número de días de FAN y las climatologías mensuales de la TSM y de la clorofila-*a*. Se observa que, en primavera, específicamente de marzo a mayo, se registró el mayor número de días de FAN (Figura 21), acompañado de las concentraciones más altas de clorofila-*a*, que van de 5.3-8.4 mg/m<sup>3</sup> (Figura 22) y los valores más bajos de TSM, de 25 °C (Figura 23). En contraste, en verano, especialmente en los meses de julio a septiembre, no hubo ningún reporte de FAN (Figura 21), y se registraron los valores más altos de TSM, de 30 °C, (Figura 23) y las concentraciones más bajas de clorofila-*a* 0.3-1 mg/m<sup>3</sup> (Figura 22).

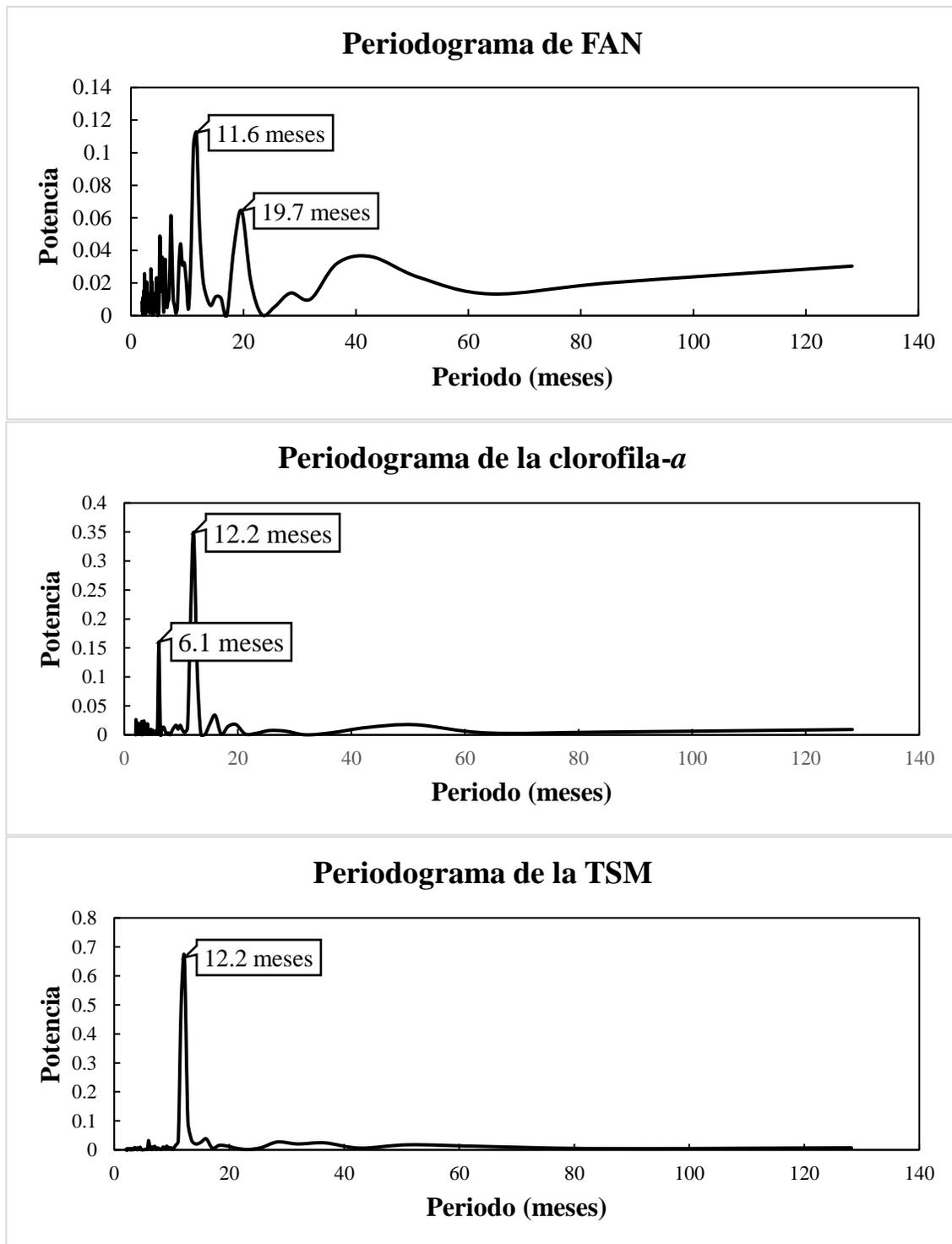


Figura 19. Periodogramas de las variables de estudio: A) FAN, B) clorofila-a y C) TSM. Se indican los periodos en los que se presentan las principales señales. Se observa que las tres variables presentaron la mayor señal aproximadamente a los 12 meses, lo cual indica una tendencia estacional.

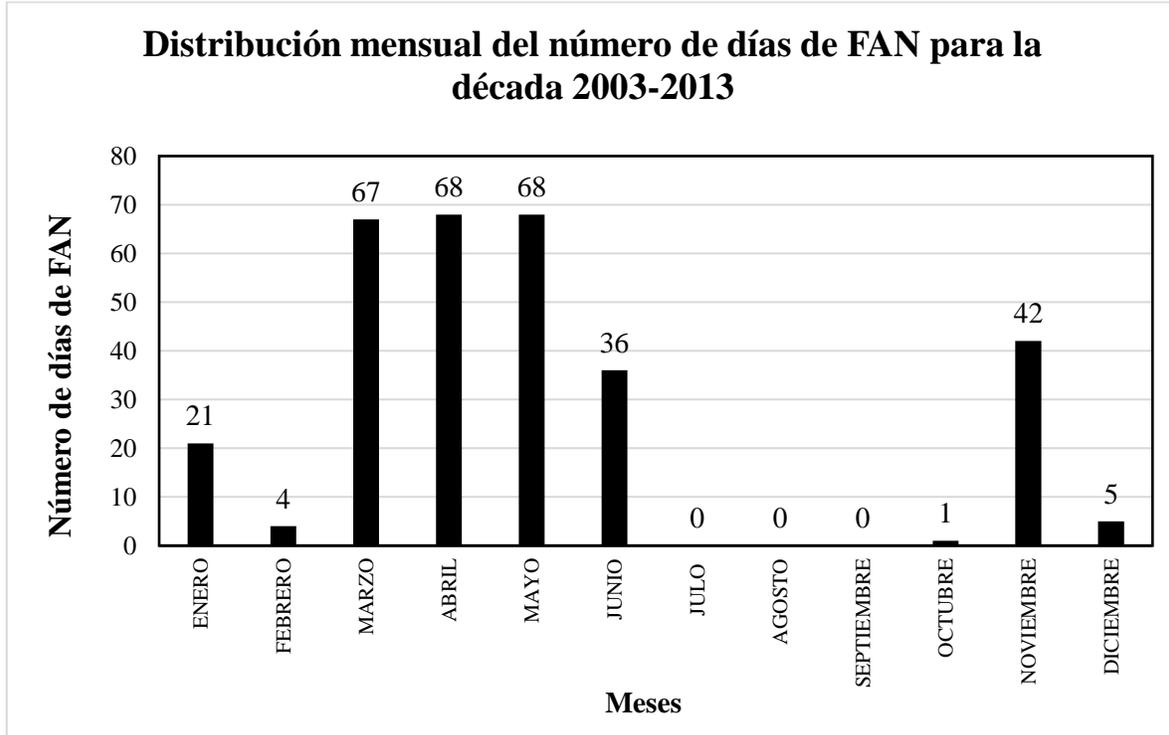


Figura 21. Número de días de FAN por mes, durante la década 2003-2013. Se observa que de abril a mayo se presenta el mayor número de FAN, coincidiendo parcialmente con la temporada de surgencias que ocurre durante invierno-primavera. Mientras que, de julio a septiembre hay ausencia de FAN.

Figura 20. Análisis de coherencia entre los FAN y los datos satelitales de la clorofila-*a* (A) y la TSM (B). Se observa que, en ambos casos el principal valor de coherencia ocurrió a los 12 meses, es decir en la escala estacional, lo cual, posiblemente indica que los FAN están modulados por la temporada de surgencias costeras eólicas. Mientras que, en la escala mayor a un año, solamente el par FAN-TSM mostró un valor importante de coherencia a los 28.4 meses, lo cual puede indicar que la TSM y los FAN oscilan en esta escala probablemente por la influencia de ENOS.

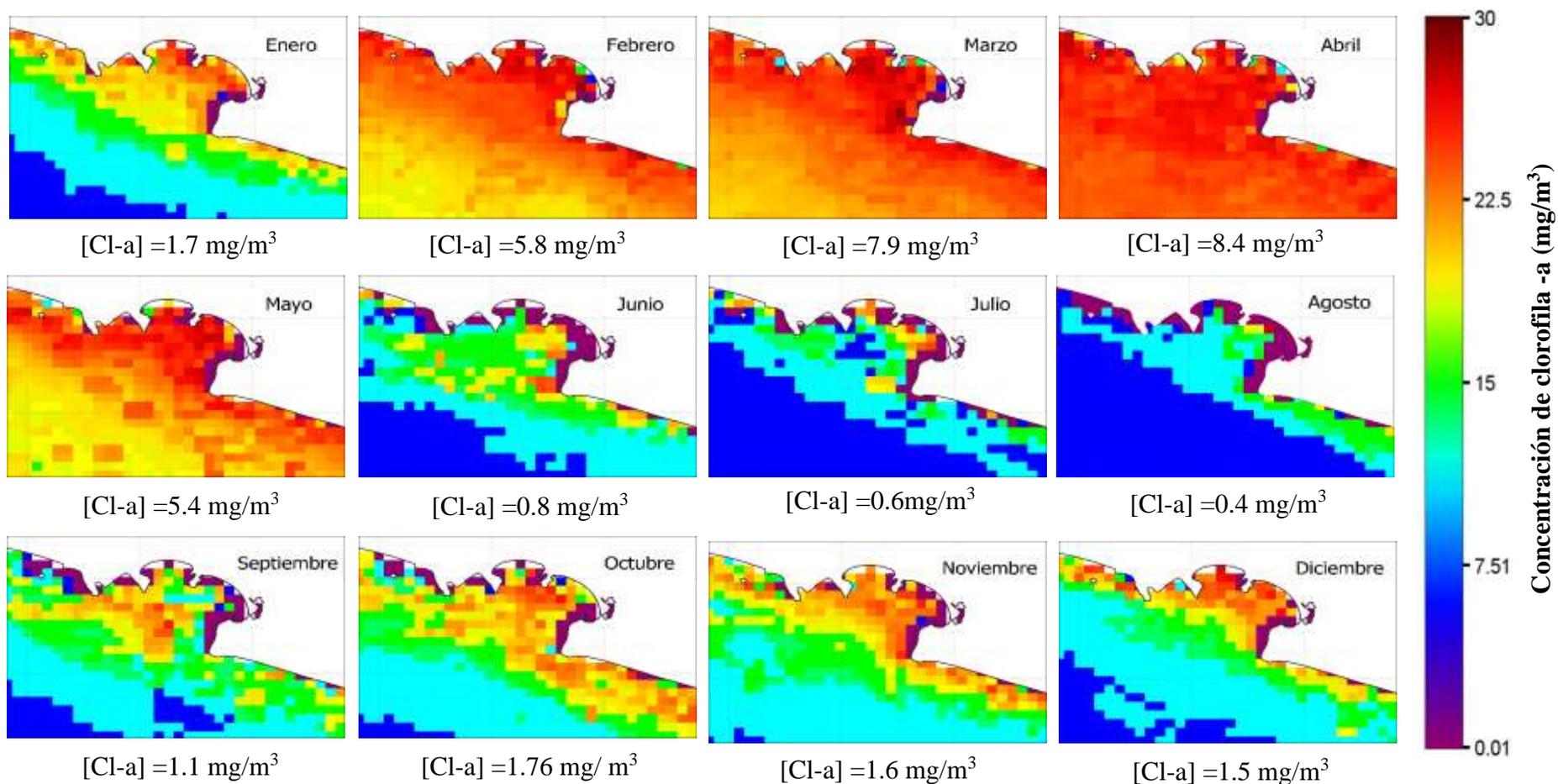


Figura 22. Climatologías mensuales de clorofila-*a* (mg/ m<sup>3</sup>). Se observa que de marzo a mayo se registran las concentraciones más altas. Mientras que de julio a septiembre se registran las concentraciones más bajas. Las concentraciones de clorofila-*a* corresponden a la mediana de los valores de los píxeles abarcados por el cuadrante de muestreo, por lo que para cada mes se obtuvo un único valor de clorofila-*a*.

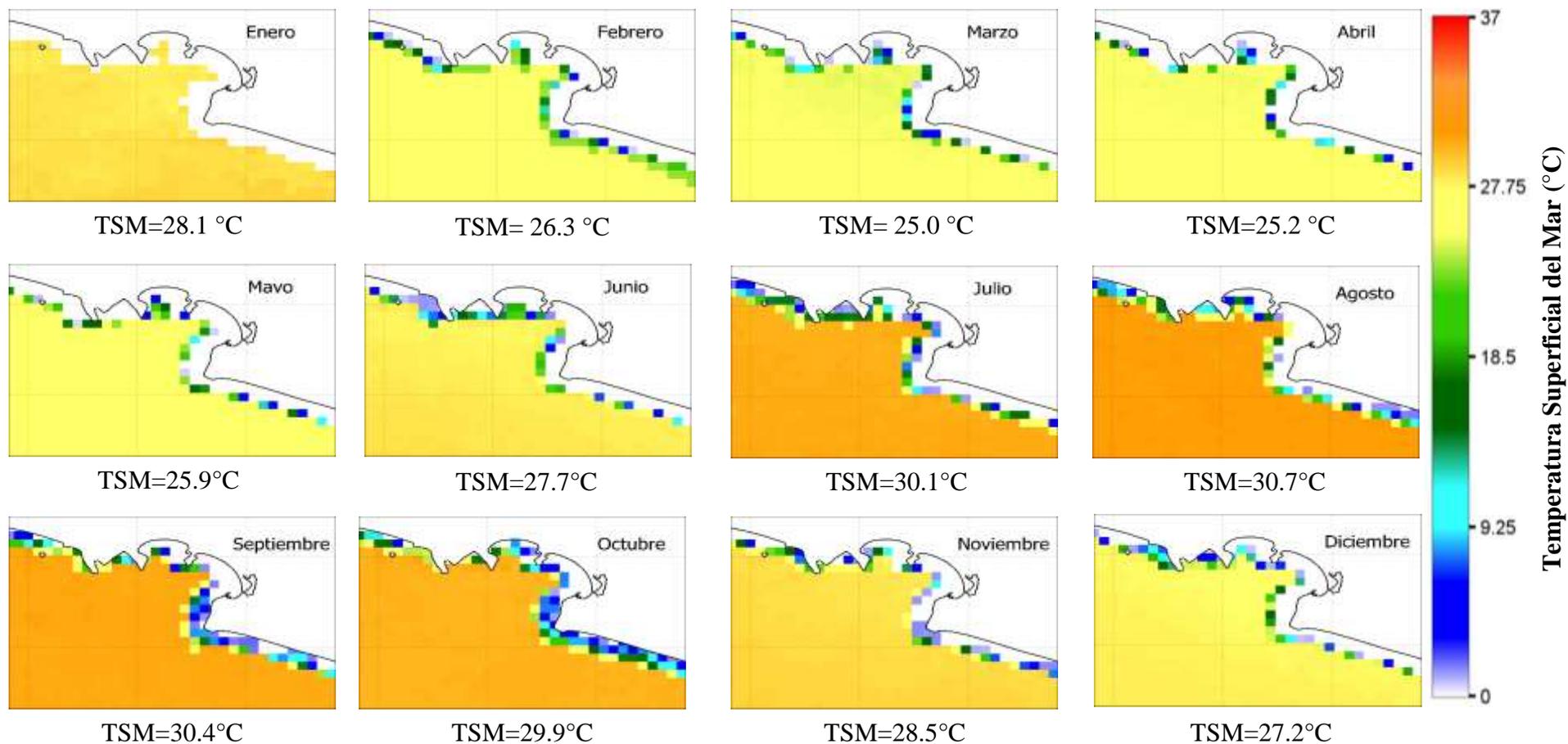


Figura 23. Climatologías mensuales de TSM (°C). Se observa que de marzo a mayo se registran los valores más bajos de TSM. Mientras que de julio a septiembre se registran los valores más altos. Las concentraciones de TSM corresponden a la mediana de los valores de los pixeles abarcados por el cuadrante de muestreo, por lo que para cada mes se obtuvo un único valor de TSM.

En estudios previos en la Bahía de Manzanillo, se ha reportado que los FAN ocurren principalmente durante la temporada de surgencias en invierno-primavera (Sierra-Beltrán *et al.*, 2004; Ortiz-Lira y Jiménez-Quiroz, 2006; Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Sosa-Ávalos *et al.*, 2015) lo cual coincide con la estacionalidad de primavera observada en el presente trabajo. Esta tendencia temporal se ha explicado como el resultado de que las surgencias costeras producen condiciones favorables para la formación de florecimientos algales en el área de estudio (Sierra-Beltrán *et al.*, 2004; Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Morales-Blake *et al.*, 2013; Sosa-Ávalos *et al.*, 2015; Vega-Juárez, 2014; Cortés-Lara *et al.*, 2022). Durante la temporada de surgencias las aguas subsuperficiales de temperatura relativamente menor y de mayor concentración de nutrientes ascienden a la superficie, alcanzando la zona eufótica. Consecuentemente, durante un evento de surgencia la TSM disminuye y se produce la fertilización de la zona eufótica, lo que, a su vez, favorece la proliferación de las especies fitoplanctónicas y el aumento en las concentraciones de clorofila-*a* (Monreal-Gómez *et al.*, 1999; Colling, 2004). Dichas condiciones de surgencia fueron encontradas en el presente estudio, lo que permite sugerir que los FAN, están modulados por procesos estacionales de mesoescala como lo es la temporada de surgencias.

Es importante mencionar que, la relación entre los FAN y las surgencias costeras ha sido difícil de esclarecer y una de las principales razones es la falta de análisis de series de tiempo. La mayor parte de la información acerca de los FAN en la Bahía de Manzanillo no proviene de registros continuos (Ortiz-Lira y Jiménez-Quiroz, 2006), sino de estudios eventuales en los que, en algunas ocasiones no se incluye información sobre las condiciones oceanográficas, lo cual dificulta identificar adecuadamente la relación entre los FAN y las surgencias costeras eólicas. Esta falta de información permite sugerir que ha existido un submuestreo temporal y también espacial de los FAN en la Bahía de Manzanillo, como el que ha sido observado para el caso de otros florecimientos en el Pacífico Central Mexicano (Gómez-Villarreal *et al.*, 2008), en los que al emplear imágenes satelitales se observó que las condiciones que favorecen la presencia de FAN se extienden en regiones más amplias y por más tiempo que las detectadas por métodos de muestreo *in situ* (Gómez-Villarreal *et al.*, 2008). Aunado a esta posibilidad de submuestreo, en el presente estudio se observa que las dos especies más recurrentes en la Bahía de Manzanillo, que fueron *Mesodinium rubrum* y *Gymnodinium catenatum* son especies recurrentes en toda la región del Pacífico Central

Mexicano, no solamente en la Bahía de Manzanillo (Ortiz-Lira y Jiménez-Quiroz, 2006; Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Quijano-Scheggia *et al.*, 2016). Esta información permite sugerir que, para entender mejor la dinámica de los FAN en la Bahía de Manzanillos es necesario abordarlos no solamente como eventos locales, sino también considerando las características oceanográficas y biológicas en una escala temporal y espacial más amplia.

### 5.3 Variabilidad temporal de los FAN en la mesoescala: datos diarios

Los valores de TSM obtenidos de imágenes satelitales diarias permitieron identificar la posible influencia de las surgencias costeras eólicas en el desarrollo de 21 de los 25 FAN (84%). Es importante explicar que, en el presente trabajo, el criterio empleado para identificar un evento de surgencia fue observar los valores de TSM de días con reporte de FAN, así como de cinco días previos y cinco días posteriores e identificar cambios iguales o mayores a 1.7 °C dentro de un rango máximo de 10 días. Este criterio está basado, por un lado, en los reportes previos en el Pacífico mexicano, en los que se han empleado imágenes satelitales de la TSM y se ha sugerido que cambios de 2 °C (Aguirre-Gómez *et al.*, 1999) y de 1.7 °C (Vega-Juárez, 2014) están asociados a eventos de surgencia. Por otro lado, se consideró que, las variaciones iguales o mayores a 1.7 °C en la TSM debían de ocurrir en un rango máximo de diez días, ya que se ha descrito que, los eventos de surgencia se desarrollan en periodos de tres a diez días, como consecuencia principalmente de la intermitencia de los vientos, lo que, a su vez, es uno de los factores que modula la duración de los FAN en la escala de días (Alonso-Rodríguez, 1998; Pitcher *et al.*, 2010;).

Asimismo, se observó que, los FAN ocurrieron tanto en los días correspondientes, como en los días posteriores a los eventos de surgencia. Empleando la recta de mejor ajuste de los valores diarios de TSM correspondientes a la fecha de reporte de cada FAN, se observó que, trece FAN ocurrieron en días posteriores a un evento de surgencia, siete ocurrieron durante el desarrollo de un evento de surgencia y en uno de los FAN no se pudo identificar ninguna tendencia clara (Tabla 7). Cabe mencionar que, en el presente trabajo se consideró que, cuando la pendiente de la recta de mejor ajuste fue negativa, y que por lo tanto describe una tendencia de la TSM a disminuir, es un indicador de la ocurrencia de un evento de surgencia, ya que una característica de estos eventos es ocasionar la disminución de la TSM. Mientras que, cuando la pendiente fue positiva, y que por lo tanto describe una tendencia de la TSM a aumentar, se consideró como indicador de la culminación de un evento de surgencia (Tabla 7). Estos resultados, coinciden con estudios previos que reportan la ocurrencia de FAN durante surgencia (Alonso-Rodríguez, 1998; Vega-Juárez, 2014; Lalli y Parsons, 1997; Burkholder *et al.*, 2006; Morales-Blake *et al.*, 2013) y también en días posteriores al evento

de surgencia (Aguirre-Gómez *et al.* 1999; Pitcher *et al.*, 2010; Vega-Juárez, 2014; Morales-Blake *et al.*, 2013).

Tabla 7. Datos diarios de TSM (°C). Se muestran los datos de TSM promediados correspondientes a fechas con reporte de FAN, así como a los cinco días previos y posteriores. También se muestra la mayor diferencia de TSM ocurrida dentro de un lapso de 1-10 días, el valor de la pendiente de la recta de mejor ajuste y el momento en que se sugiere que ocurrió cada FAN

	<b>Fecha de FAN</b>	<b>Promedio de TSM (°C)</b>	<b>Mayor diferencia 1-10 días (°C)</b>	<b>Pendiente recta mejor ajuste</b>	<b>Momento en que se sugiere que ocurrió</b>
2003	24-28 marzo	Antes: 21.5	3.0	0.31	Posterior a evento de surgencia
		Durante: 22.7			
		Después: —			
2004	11-21 mayo	Antes: 28.2	5.1	-0.11	Durante evento de surgencia
		Durante: 25.8			
		Después: 27.4			
2007	26 marzo	Antes: 27.0	2.6	-0.22	Durante evento de surgencia
		Durante: —			
		Después: 25.6			
2007	3 abril- 27 junio	Antes: 20.6	3.3	0.03	Posterior a evento de surgencia
		Durante: 26.5			
		Después: 29.5			
2008	23 febrero	Antes: 22.7	1.8	-0.07	Durante evento de surgencia
		Durante: —			
		Después: 22.4			
2008	6-12 marzo	Antes: 24.3	2.2	0.01	Posterior a evento de surgencia
		Durante: 22.6			
		Después: 23.2			

Fecha de FAN	Promedio de TSM (°C)	Mayor diferencia 1-10 días (°C)	Pendiente recta mejor ajuste	Momento en que se sugiere que ocurrió		
2009	20 marzo-13 abril	Antes: 21.6 Durante: 25.6 Después: 25.3	3.4	0.15	Posterior a evento de surgencia	
	18 abril	Antes: 25.3 Durante: 25.4 Después: 26.2	1.2	0.16	Sin influencia de evento de surgencia	
	26 abril	Antes: 25.9 Durante: — Después: 26.0	0.5	0.02	Sin influencia de evento de surgencia	
	3 mayo	Antes: 26.0 Durante: 26.3 Después: —	0.3	0.07	Sin influencia de evento de surgencia	
	4-25 marzo	Antes: 25.5 Durante: 25.9 Después: 25.4	2.6	0	Sin tendencia	
	29 marzo	Antes: 25.7 Durante: 24.9 Después: 23.6	2.8	-0.31	Durante evento de surgencia	
	9-15 mayo	Antes: 25.9 Durante: 27.5 Después: 27.3	3.8	0.13	Posterior a evento de surgencia	
	2010	14 abril	Antes: 28.3 Durante: 26.7 Después: 25.3	4.0	-0.43	Durante evento de surgencia
		7 mayo-14 junio	Antes: 22.5 Durante: 25.8	4.4	0.05	

Fecha de FAN	Promedio de TSM (°C)	Mayor diferencia 1-10 días (°C)	Pendiente recta mejor ajuste	Momento en que se sugiere que ocurrió
	Después: 26.1			Posterior a evento de surgencia
2010-2011 15 diciembre 2010- 5 enero 2011	Antes: 24.4 Durante: 24.7 Después: 25.6	2	0.04	Posterior a evento de surgencia
10 febrero	Antes: 23.1 Durante: 24.3 Después: 24.0	2.4	0.19	Posterior a evento de surgencia
2011 9 marzo	Antes: 23.7 Durante: 22.9 Después: 23.3	1.6	0.03	Sin influencia de evento de surgencia
15-22 marzo	Antes: 23.3 Durante: 24.4 Después: 26.2	1.2	0.20	Posterior a evento de surgencia
11 enero-1 febrero	Antes: 25.8 Durante: 26.8 Después: 27.4	2.4	0.02	Posterior a evento de surgencia
2012 2-6 marzo	Antes: 24.2 Durante: 24.9 Después: 26.8	2.7	0.29	Posterior a evento de surgencia
28 marzo-6 abril	Antes: 23.1 Durante: 22.2 Después: 21.8	1.6	-0.07	Durante evento de surgencia

<b>Fecha de FAN</b>	<b>Promedio de TSM (°C)</b>	<b>Mayor diferencia 1-10 días (°C)</b>	<b>Pendiente recta mejor ajuste</b>	<b>Momento en que se sugiere que ocurrió</b>	
2013	5-13 junio	Antes: 28.3 Durante: 29.3 Después: 29.4	2.7	0.09	Posterior a evento de surgencia
	2-5 mayo	Antes: 23.4 Durante: 24.6 Después: 25.5	3.3	0.24	Posterior a evento de surgencia
	31 octubre-27 noviembre	Antes: 30.2 Durante: 30.0 Después: 29.1	2.8	-0.05	Durante evento de surgencia

Otra información que apoya a concluir que algunos FAN del presente estudio ocurrieron durante eventos de surgencia son los datos *in situ* reportados para la Bahía de Manzanillo. En el Pacífico Central Mexicano, incluyendo la Bahía de Manzanillo, Morales Blake *et al.* (2013) monitorearon los datos *in situ* de diferentes parámetros durante el desarrollo de un FAN ocurrido del 26 de abril al 6 de mayo de 2010, identificando un evento de surgencia, caracterizado por valores mínimos de temperatura y oxígeno y valores máximos de densidad y nutrientes. En el presente trabajo, el 14 de abril de 2010, una fecha cercana a la señalada por Morales Blake *et al.* (2013), se tiene el registro de un FAN formado por *Mesodinium rubrum* y *Peridinium quadridentatum* (*Peridinium quinquecorne*), en el que se observa que, el conjunto de valores de TSM tienen una pendiente negativa de -0.43 y un considerable descenso de 4 °C (Tabla 7)(Figura 24). Adicionalmente, para este FAN hubo algunos datos diarios disponibles de la clorofila-*a*, dichos datos presentaron una pendiente positiva de 6.46 y un aumento de 25.9 mg/m<sup>3</sup> en el día en que se reportó el FAN (Tabla 8)(Figura 25). De tal manera que, el descenso de la TSM y el aumento de la concentración de clorofila-*a* ocurrieron de manera sincrónica, permitiendo interpretar que el FAN del 14 de abril de 2010 se desarrolló durante un evento de surgencia, coincidiendo, como ya se mencionó, con lo reportado por Morales-Blake *et al.*, (2013) que, en fechas similares, a partir de datos *in situ* identificaron el desarrollo de un FAN durante un evento de surgencia.

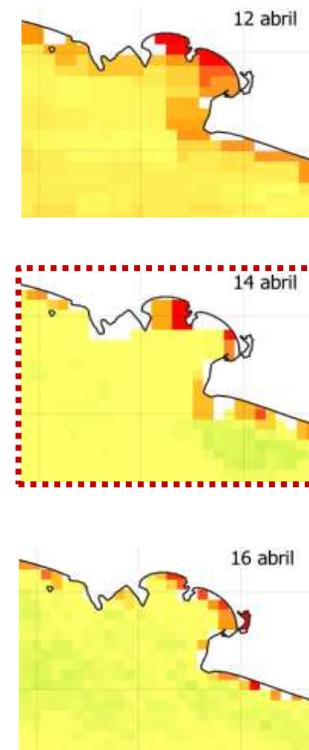
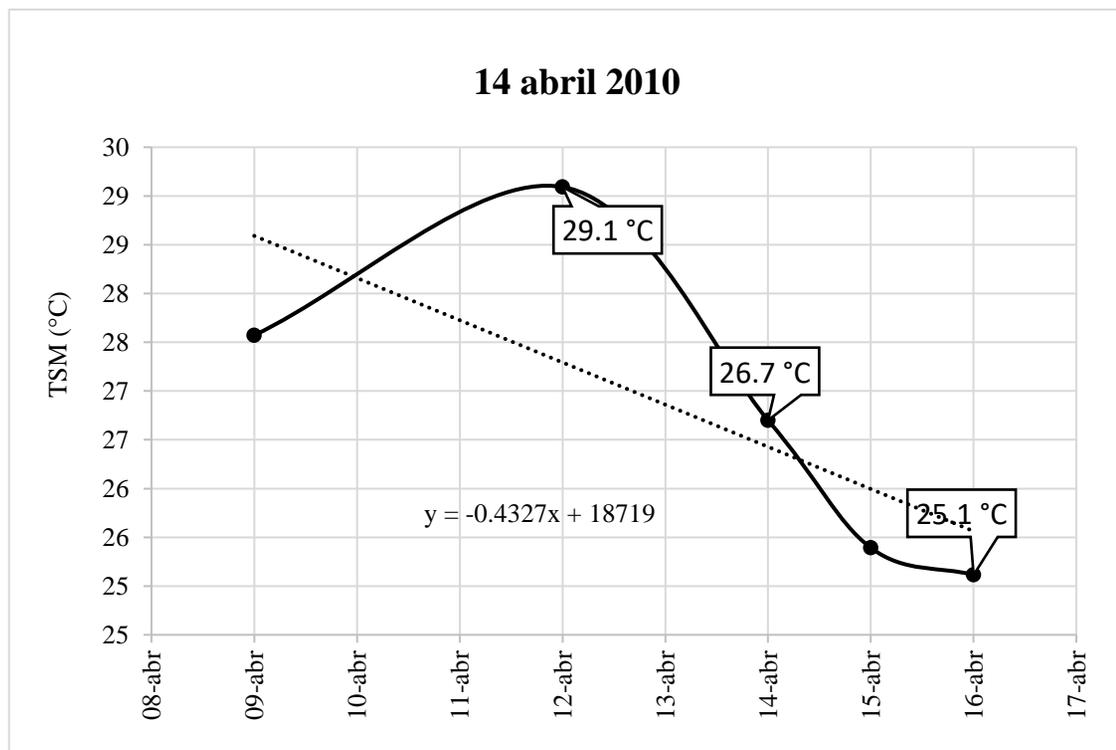


Figura 24. Valores diarios de TSM correspondientes al FAN ocurrido el 14 de abril de 2010, así como a los cinco días previos y posteriores (según la disponibilidad de datos). Las especies que conformaron este florecimiento fueron *Mesodinium rubrum* y *Peridinium quadridentatum* (*Peridinium quinquecorne*). En la gráfica se observa la pendiente negativa (-0.4) que indica una tendencia de la TSM a disminuir en la fecha en que ocurrió el FAN y una disminución de 4°C de la temperatura en un periodo de cuatro días que se puede apreciar también en las imágenes de la derecha, por lo que se sugiere que este FAN se presentó de manera simultánea al desarrollo de un evento de surgencia

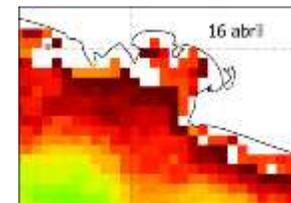
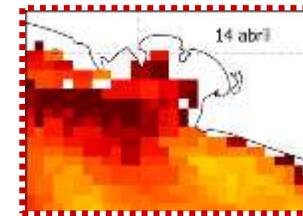
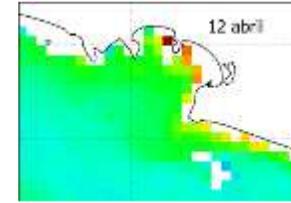
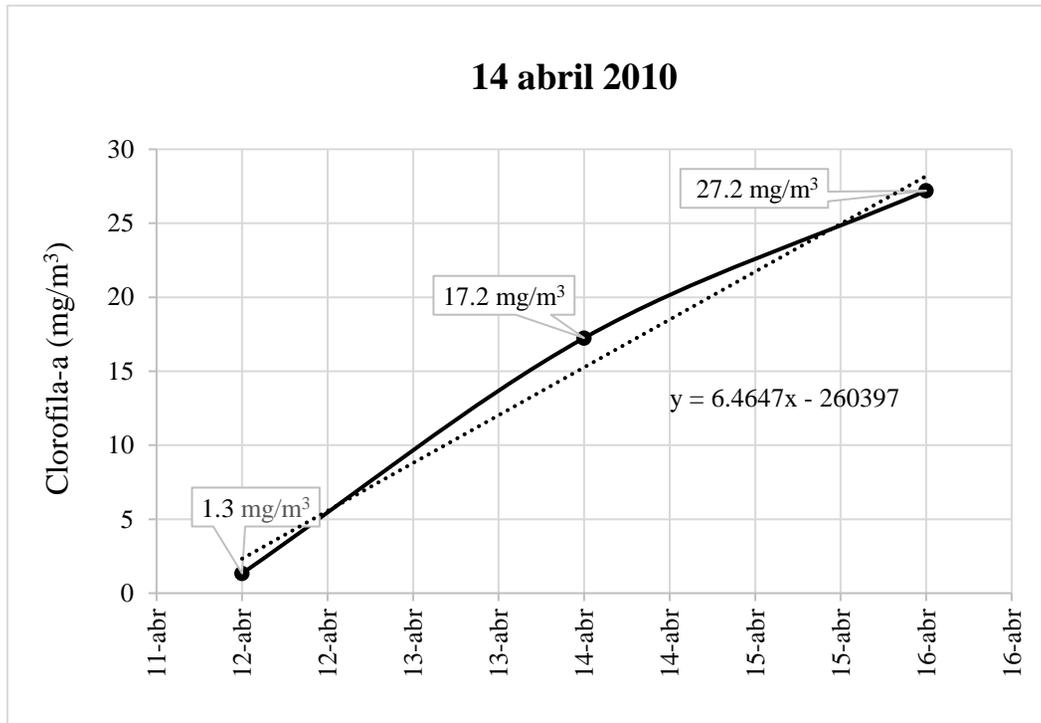


Figura 25. Valores diarios de clorofila-a correspondientes al FAN ocurrido el 14 de abril de 2010, así como a los cinco días previos y posteriores (según la disponibilidad de datos). Las especies que conformaron este florecimiento fueron *Mesodinium rubrum* y *Peridinium quadridentatum* (*Peridinium quinquecorne*). En la gráfica se observa la pendiente positiva (6.46) que indica una tendencia de la clorofila-a a aumentar en la fecha en que ocurrió el FAN y un aumento de 25.9 mg/m<sup>3</sup> de la clorofila en un periodo de cuatro días que se puede apreciar también en las imágenes de la derecha.

A nivel especie, se sugiere que la intermitencia de la intensidad de las surgencias influyó en que algunos microorganismos fueran más recurrentes que otros. Como ya se ha mencionado, la intensidad de las surgencias eólicas oscila en intervalos de 3 a 10 días aproximadamente, y se ha descrito como uno de los factores que modula la duración de los FAN en la escala de los días (Pitcher *et al.*, 2010). Dicha intermitencia ocasiona cambios en las condiciones oceanográficas que, pueden ser favorables o desfavorables para algunos microorganismos, produciendo una sucesión de especies (Burkholder *et al.*, 2006), marcando con ello el desarrollo o la culminación de los FAN. En el presente trabajo, se sugiere que *Gymnodinium catenatum* y *Mirionecta rubrum*, que fueron las especies más recurrentes (Tabla 6), fueron favorecidas por los cambios en la intensidad de las surgencias, pues se ha reportado que estos microorganismos pueden presentarse indistintamente cuando la intensidad de la surgencia aumenta, como cuando decrece, es decir tanto durante un evento de surgencia como posteriormente (Vega-Juárez, 2014), lo que les permite desplazar a especies que no tienen tal capacidad.

Por su parte, la baja recurrencia de *Lingulodinium polyedra*, *Karlodinium* sp. y *Pseudo-nitzschia* sp., que se presentaron solamente en un año del periodo de estudio (Tabla 6), puede indicar que estos organismos fueron desplazados por las especies dominantes. Estos resultados coinciden con lo reportado por Alonso-Rodríguez *et al.* (2000), quienes observaron el desplazamiento de diatomeas y otros grupos de fitoplancton por especies dominantes formadoras de FAN, principalmente como consecuencia de cambios en la proporción de nutrientes. Específicamente para la diatomea *Pseudo-nitzschia* sp., que se menciona que, es favorecida por los eventos de surgencia debido al aumento de la turbulencia (Pitcher *et al.*, 2010; Lalli y Parsons, 1997; Burkholder *et al.*, 2006). La turbulencia le permite a *Pseudo-nitzschia* sp. mantenerse a flote en la zona eufótica, ya que, al carecer de estructuras de locomoción esta especie tiende a sedimentarse cuando disminuye la turbulencia en la columna de agua (Lalli y Parsons, 1997; Burkholder *et al.*, 2006). Lo cual, podría ser una causa de la baja recurrencia de esta especie observada en el presente trabajo, pues probablemente fue desplazada por microorganismos como *Gymnodinium catenatum* y *Mesodinium rubrum*. que no dependen directamente de la turbulencia, ya que, poseen estructuras de locomoción para evitar sedimentarse y que, por lo tanto, pueden presentarse indistintamente durante o posteriormente a un evento de surgencia.

En el presente trabajo se registraron solamente dos FAN formados por *Pseudo-nitzchia* sp. (Tabla 6) y en ambos se identificó, a partir de los datos diarios de TSM, la posible presencia de aumento de la turbulencia en la columna de agua que pudo haber favorecido a esta diatomea. Por un lado, en el FAN ocurrido el 23 de febrero de 2008 se identificó una pendiente negativa (-0.07) y un descenso de la TSM (1.8 °C) (Tabla 7) (Figura 26) lo que indica que el FAN se desarrolló simultáneamente a un evento de surgencia, por lo que es probable que se haya generado un aumento de la turbulencia de la columna de agua, que a su vez, favoreció el desarrollo de este florecimiento de *Pseudo-nitzchia* sp. Por otro lado, aunque en el FAN ocurrido el 18 de abril de 2008, no se identificó la ocurrencia de un evento de surgencia (Tabla 7), el día con reporte de FAN coincidió con el valor más bajo de TSM (23.5 °C) (Figura 27), lo cual puede indicar la existencia de algún proceso de turbulencia en la columna de agua que pudo haber favorecido a esta diatomea. Estos resultados coinciden con lo reportado para esta especie que, como ya se mencionó se ha descrito que es favorecida por el aumento de la turbulencia que le permite mantenerse a flote en la zona eufótica (Pitcher *et al.*, 2010; Lalli y Parsons, 1997; Burkholder *et al.*, 2006).

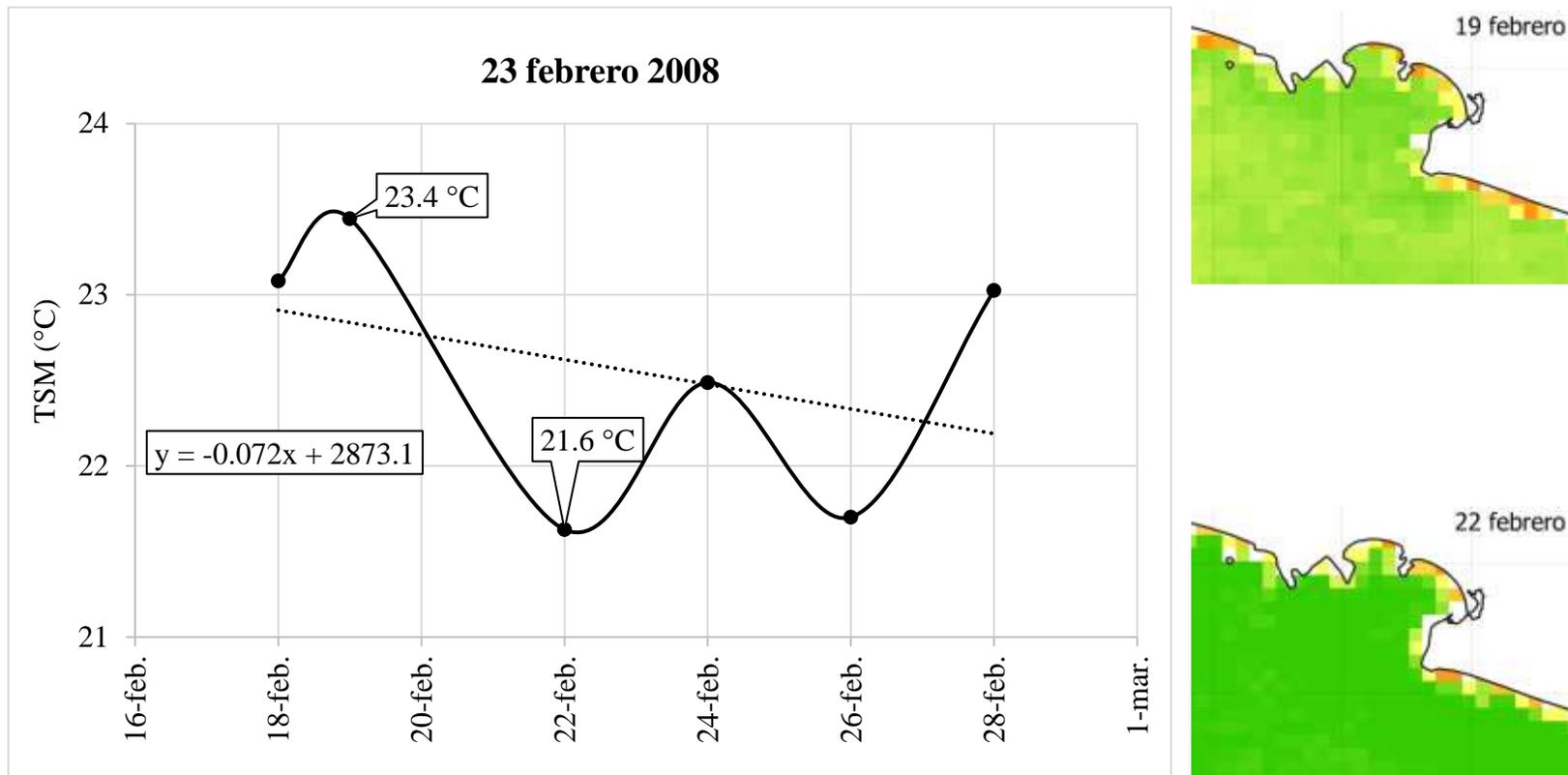


Figura 26. Valores diarios de TSM correspondientes al FAN de *Pseudo-nitzschia* sp. ocurrido el 23 de febrero de 2008, así como a los cinco días previos y posteriores (según la disponibilidad de datos). En la gráfica se observa la pendiente negativa (-0.07) que indica una tendencia de la TSM a disminuir en la fecha en que ocurrió el FAN y una disminución de 1.8 °C de la temperatura en un periodo de cuatro días que se puede apreciar también en las imágenes de la derecha, por lo que se sugiere que este FAN

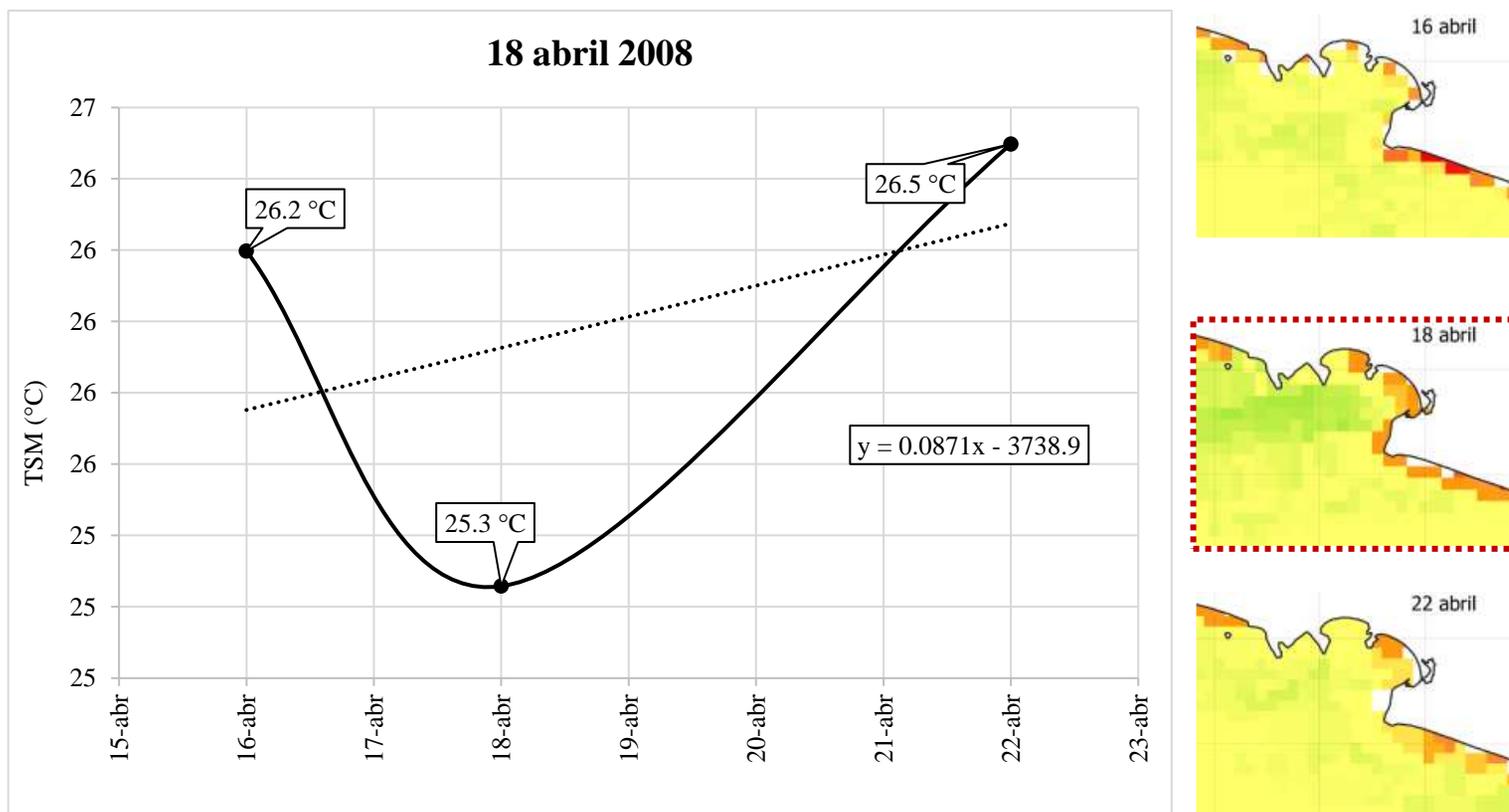


Figura 27. Valores diarios de TSM correspondientes al FAN de *Pseudo-nitzschia* sp. ocurrido el 18 de abril de 2008, así como a los cinco días previos y posteriores (según la disponibilidad de datos). En la gráfica se observa la pendiente positiva (0.08) que indica una tendencia de la TSM a aumentar. La máxima fluctuación de la TSM en un lapso de 1-10 días fue de 1.2 °C (Tabla 7), por lo que se considera que este FAN no está asociado a la ocurrencia de un evento de surgencia. Sin embargo, se observa en la gráfica y en las imágenes de la derecha que, en el día en que ocurrió el FAN se presenta la disminución más importante de la TSM.

Otra situación que también es importante mencionar es que, la disponibilidad de las imágenes diarias de clorofila-*a* fue insuficiente para analizar adecuadamente los valores de este pigmento. Del total de 308 imágenes diarias que se recabaron, solamente 65 fueron de clorofila-*a*, razón por la que el análisis de las imágenes diarias estuvo enfocado en los datos de imágenes de la TSM. Aunque también cabe aclarar que, a pesar de que la disponibilidad de imágenes de TSM fue mayor, en algunos días no hubo imágenes disponibles, debido principalmente al ancho de barrido del sensor y a características de la órbita del satélite, que ocasionan que la resolución temporal de las imágenes sea no de uno, sino de dos días para algunas latitudes (Mas, 2011). Por su parte, en el caso de la clorofila-*a*, la baja disponibilidad de imágenes se debió además a la interferencia de las nubes que impide obtener imágenes adecuadas, este inconveniente también lo ha reportado Vega-Juárez (2014), quien no recomienda que se utilicen únicamente imágenes satelitales de clorofila-*a* para el estudio de FAN debido a la baja disponibilidad de datos.

Sin embargo, en el presente trabajo los datos que se pudieron recabar muestran que existe una relación entre TSM y clorofila-*a*, como lo han reportado otros autores que mencionan que en los eventos de surgencia se produce una disminución de la TSM y un aumento en la concentración de clorofila, aunque no sea de manera exactamente sincrónica (Sierra-Beltrán, 2004; Morales-Blake *et al.*, 2013; Vega-Juárez 2014; Cortés-Lara *et al.*, 2022). En el presente trabajo empleando el valor de la pendiente de la recta de mejor ajuste, se observó en 11 de los 25 FAN esta relación inversa entre los valores de la concentración de clorofila-*a* y de la TSM (Tabla 8). No obstante, no fue posible realizar un análisis más detallado por la falta de imágenes diarias, principalmente de clorofila-*a*. También es importante considerar que las imágenes de la clorofila-*a* y de la TSM permitieron recuperar parte de la información histórica acerca de estos parámetros, lo cual se puede mencionar que representa un aporte de información para el estudio de los FAN en Bahía de Manzanillo, dicha información se anexa al final de este escrito a manera de catálogo.

Tabla 8. Datos diarios de clorofila-*a* (mg/m<sup>3</sup>). Se muestran los datos de clorofila-*a* (mg/m<sup>3</sup>) promediados correspondientes a fechas con reporte de FAN, así como a los cinco días previos y posteriores. También se muestra la mayor diferencia de clorofila-*a* ocurrida dentro de un lapso de 1-10 días y el valor de la pendiente de la recta de mejor ajuste. **Importante:** La última columna incluye los valores de la pendiente de los datos de TSM y se resalta en negritas y 11 FAN en los que se identificó una tendencia inversa de la pendiente de la recta de mejor ajuste de la clorofila-*a* y de la TSM.

Año	Fecha	Promedio de Cl- <i>a</i> (mg/m <sup>3</sup> )	Mayor diferencia 1-10 días (mg/m <sup>3</sup> )	Pendiente recta mejor ajuste de la Cl- <i>a</i>	Pendiente recta mejor ajuste de la TSM
2003	24-28 marzo	Antes: 16.0	16.9	-2.7	0.31
		Durante: 1.8			
2004	11-21 mayo	Después: —	5.3	2.0	-0.11
		Antes: 4.2			
2007	26 marzo	Durante: —	18.0	-2.9	-0.22
		Después: 40.1			
2007	3 abril-27 junio	Antes: 40.1	1.6	3.6	0.03
		Durante: 2.4			
2007	23 febrero	Después: —	26.4	6.5	-0.07
		Antes: 29.2			
2008	6-12 marzo	Durante: 4.9	8.4	2.8	0.01
		Después: 3.7			
2008	20 marzo-13 abril	Antes: 1.6	11.1	0.0	0.15
		Durante: 7.5			
2008	18 abril	Después: 4.2	—	0.0	0.16
		Antes: —			
2008	26 abril	Durante: 4.2	—	-2.0	0.02
		Después: —			
2008	3 mayo	Antes: —	—	-1.1	0.07
		Durante: —			

Año	Fecha	Promedio de Cl-a (mg/m <sup>3</sup> )	Mayor diferencia 1-10 días (mg/m <sup>3</sup> )	Pendiente recta mejor ajuste de la Cl-a	Pendiente recta mejor ajuste de la TSM
2009	4-25 marzo	Durante: 11.5	3.3	<b>-0.2</b>	<b>0</b>
		Después: —			
	Antes: 2.7	24.4	0.0	-0.31	
	Durante: 2.6				
	Después: 2.8				
29 marzo	Durante: 3.4	24.4	0.0	-0.31	
	Después: 26.6				
2010	9-15 mayo	Antes: —	—	—	0.13
		Durante: —			
	Después: —				
2010	14 abril	Antes: 1.3	25.9	—	-0.43
		Durante: 17.2			
	Después: 27.2				
2010-2011	7 mayo-14 junio	Antes: 32.3	0.2	—	0.05
		Durante: 0.8			
	Después: 0.9				
2010-2011	15 diciembre 2010-5 enero 2011	Antes: 5.6	0.9	—	0.04
		Durante: 2.5			
	Después: 1.0				
2011	10 febrero	Antes: 13.9	13.8	<b>-0.7</b>	<b>0.19</b>
		Durante: —			
	Después: 8.7				
	9 marzo	Antes: 11.4	3.4	<b>-0.1</b>	<b>0.03</b>
Durante: 14.6					
2011	15-22 marzo	Después: —	—	<b>-0.2</b>	<b>0.20</b>
		Antes: —			
	Durante: —				
2012	11 enero-1 febrero	Antes: —	0.6	1.7	0.02
		Durante: 0.8			
	Después: —				
	2-6 marzo	Antes: —	—	—	0.29
		Durante: —			
28 marzo-6 abril	Después: —	2.8	0.0	0.0	
	Antes: —				
Durante: 4.1					

Año	Fecha	Promedio de Cl-a (mg/m <sup>3</sup> )	Mayor diferencia 1-10 días (mg/m <sup>3</sup> )	Pendiente recta mejor ajuste de la Cl-a	Pendiente recta mejor ajuste de la TSM
					-0.07
2013	5-13 junio	Después:6.9 Antes: 0.9 Durante: 0.2	0.7	—	0.09
	2-5 mayo	Después: — Antes: — Durante: 1.3	9.0	<b>-0.1</b>	<b>0.24</b>
	31 octubre-27 noviembre	Después:9.5 Antes: — Durante: 1.2 Después 0.8	0.6	1.2	-0.05

#### 5.4 Variabilidad temporal de los FAN en la macroescala: datos anuales

En la macroescala, se observó solamente un valor importante de coherencia entre las series de tiempo de TSM y FAN a los 2.3 años (28.4 meses) (Figura 20). Este resultado es de especial interés ya que puede indicar la influencia de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) sobre los FAN. Este valor de coherencia indica que los FAN y la TSM presentaron una oscilación importante que ocurre cada 2.3 años (28.4 meses), dicha oscilación entra dentro de la escala temporal en la que generalmente ocurre ENOS que es de 2 a 7 años (Brown, *et al.* 2001), lo cual es un dato más que apoya a inferir que ENOS influye en la dinámica temporal de los FAN de la Bahía de Manzanillo.

Diferentes autores han sugerido que, en la macroescala, la variabilidad temporal de los FAN en el pacífico mexicano (Ochoa, 2003; Aguirre-Gómez *et al.*, 2003; Villarreal *et al.*, 2008; Vega-Juárez, 2014; Cortés-Altamirano *et al.*, 2019; Cortés-Lara *et al.*, 2022), incluyendo la Bahía de Manzanillo (Ortiz-Lira y Jiménez-Quiroz, 2006; Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Quijano-Scheggia *et al.*, 2016), está modulada en algún grado por el fenómeno ENOS. Principalmente, se ha descrito que ENOS genera condiciones ambientales que ocasionan que los FAN sean más intensos tanto en la escala espacial como temporal (Ochoa, 2003; Gómez-Villarreal *et al.*, 2008). En específico, se ha observado que la fase fría de ENOS es la que favorece la presencia de FAN (Cortés-Altamirano *et al.*, 2019). Dicha fase se caracteriza por ocasionar una disminución anómala en el nivel del mar y un ascenso atípico de la termoclina en el Pacífico oriental lo cual, intensifica los procesos de surgencias costeras lo que, a su vez, provoca un aumento en la biomasa fitoplanctónica, incluyendo la de especies formadoras de FAN (Monreal-Gómez *et al.*, 1999; Brown, *et al.* 2001). En el presente trabajo se identificó que, los tres FAN que presentaron el mayor descenso de la TSM fueron en el siguiente orden: 11 al 21 de mayo de 2004, 7 de mayo al 14 de junio de 2010 y el 14 de abril de 2010 (5.1 °C, 4.4 °C, 4 °C), estos dos últimos corresponden a uno de los años en que se presentó la fase fría de ENOS, de acuerdo con los valores del Índice Multivariado ENOS (Tabla 9). Lo anterior permite sugerir que, la fase fría de ENOS favoreció la intensificación de los procesos de surgencia, lo que, a su vez, favoreció la formación de FAN en la Bahía de Manzanillo, como ha sido propuesto en trabajos previos (Ortiz-Lira y Jiménez-Quiroz, 2006; Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Quijano-Scheggia *et al.*, 2016).

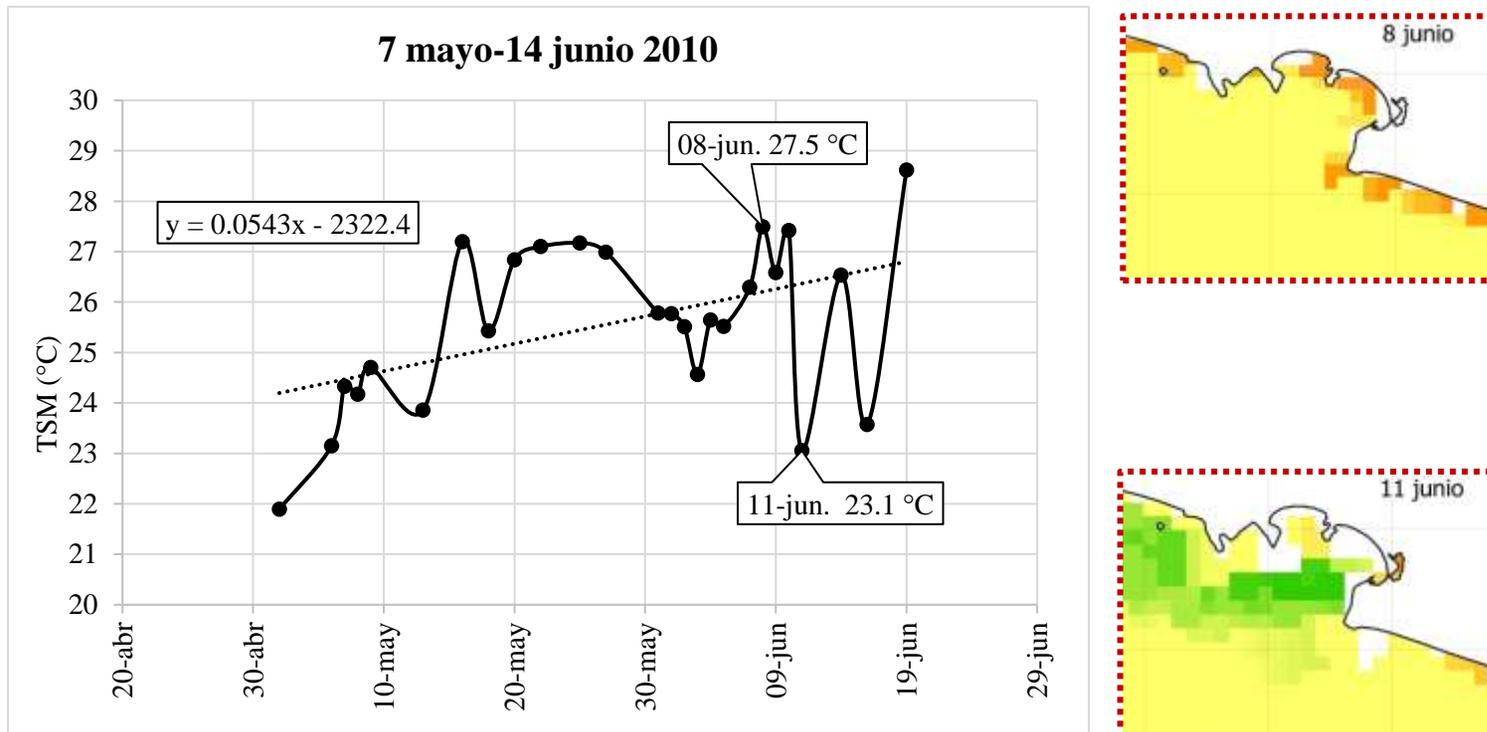


Figura 28. Valores diarios de TSM correspondientes al FAN ocurrido del 7 de mayo-14 junio de 2010, así como a los cinco días previos y posteriores (según la disponibilidad de datos). Las especies que conformaron este florecimiento fueron: *Gymnodinium catenatum*, *Levanderina fissa* (*Gyrodinium instriatum*), *Prorocentrum micans*, *Tripos furca* (*Ceratium furca*) y *Dinophysis* sp. En la gráfica se señala la TSM del 8 de junio y la del 11 de junio, días en los que se registró un importante decremento de la TSM de 4.4 °C, que también se puede apreciar en las imágenes de la derecha.

Con el objetivo de conocer con más detalle esta posible relación entre los FAN y el fenómeno ENOS se consultaron los valores del Índice Multivariado El Niño-Oscilación del Sur correspondientes al periodo de estudio (Tabla 9). Este índice permitió identificar que la fase fría de ENOS ocurrió principalmente durante los años 2007 a 2008 y 2010 a 2011, años en los que también se registró el mayor número de días de FAN, en especial durante 2007 y 2010 (Figura 29) y que en los compuestos anuales podemos observar que fueron los años que presentaron los valores de TSM más bajos (Figura 31). Estos resultados coinciden con lo reportado por Cortés-Altamirano *et al.* (2019), quienes observaron una correlación negativa entre los valores del MEI y el número de días de FAN en la Bahía de Mazatlán, encontrando que, durante la fase fría de ENOS se registró mayor número de días de FAN. En el caso de la clorofila-*a*, podemos observar que ocurrió un aumento de este pigmento en 2007 y que se mantuvo casi sin cambios hasta 2012 (), estos resultados permiten sugerir, como ya se mencionó, que la fase fría de ENOS favoreció la presencia de FAN en la Bahía de Manzanillo. Otra información que es importante mencionar es que, los años 2007 y 2010, fueron los únicos de todo el periodo de estudio, junto con el año de 2012; en los que se tuvo que implementar veda sanitaria, debido a la intensidad de los FAN, incluso un FAN de 2007 estuvo asociado a la muerte de una tonelada de peces y la destrucción de 3.2 toneladas de ostión (COFEPRIS, 2016), esta información indica que probablemente la fase fría de ENOS estuvo asociada no sólo al aumento de días de FAN, sino a que la intensidad de los FAN fue mayor.

Contrastantemente, en 2006 se presentó el mayor número de anomalías positivas de ENOS (Tabla 9), lo que indica condiciones de fase cálida de ENOS, coincidiendo con la ausencia total de FAN de 2005 a 2006 (Figura 29), y valores relativamente altos de TSM (Figura 31) y concentraciones relativamente bajas de clorofila-*a* (Figura 30), estos datos permiten sugerir que la fase cálida de ENOS puede incluso inhibir la presencia de FAN en el área de estudio. En conjunto los resultados del presente trabajo indican que existe una relación entre los FAN de la Bahía de Manzanillo y el fenómeno ENOS, como ha sido propuesto en otros estudios (Ortiz-Lira y Jiménez-Quiroz, 2006; Hernández-Becerril *et al.*, 2007; Quijano-Scheggia *et al.*, 2016).

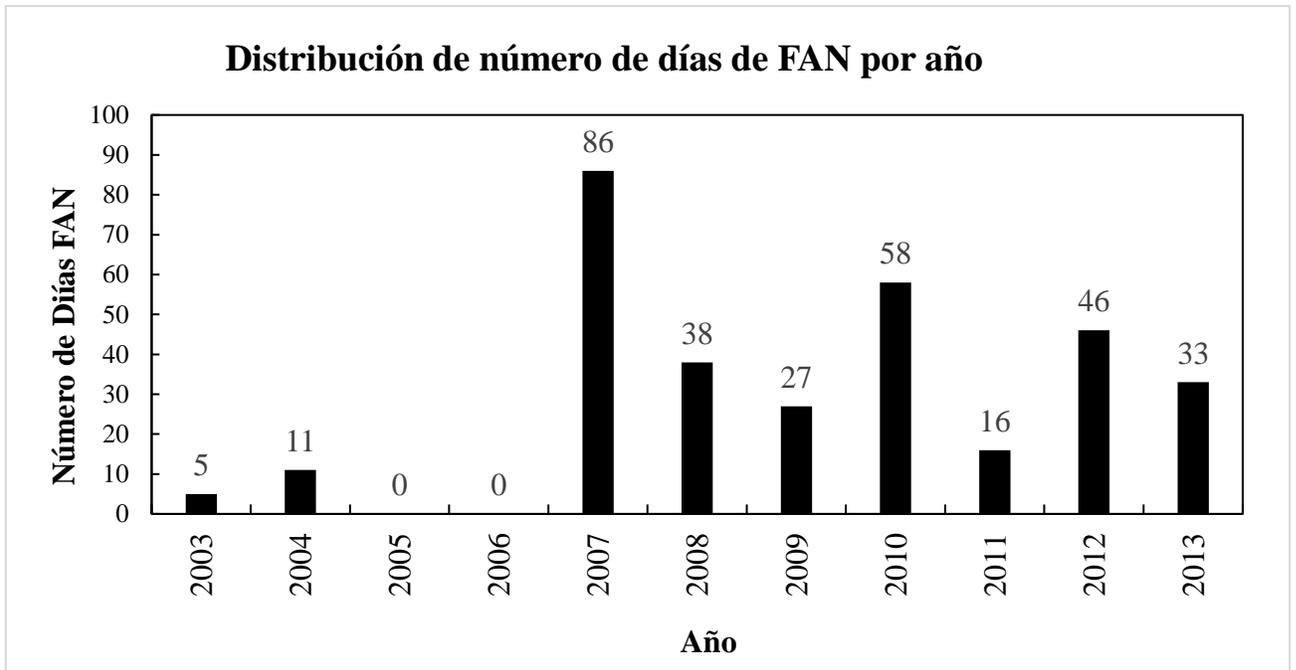


Figura 29. Distribución anual del número de días de FAN en la Bahía de Manzanillo. Se observa que, en 2007 y 2010 se registra el mayor número de días. Mientras que, en 2005 y 2006 no hay ningún registro de FAN.

Tabla 9. Valores del Índice Multivariado ENOS (MEI por sus siglas en inglés) correspondientes a la década 2003-2013. Se resaltan las anomalías positivas y negativas más importantes a partir de un umbral de 0.5 (valor absoluto). Se observa que el mayor número de anomalías negativas ocurrió en 2007-2008 y 2010-2011 y el mayor número de anomalías positivas en 2006.

Año	D-E	E-F	F-M	M-A	A-M	M-J	J-JI	JI-A	A-S	S-O	O-N	N-D
2003	0.7	0.6	0.6	0	-0.5	-0.2	-0.1	0	0.1	0.3	0.4	0.2
2004	0.1	-0.1	-0.5	-0.3	-0.4	0	0.4	0.7	0.5	0.3	0.4	0.5
2005	0.1	0.6	0.8	0.1	0.1	0.1	-0.1	0	-0.1	-0.8	-0.8	-0.7
2006	-0.7	-0.5	-0.6	-0.8	-0.3	-0.1	0.2	0.6	0.6	0.6	0.8	0.6
2007	0.6	0.5	-0.1	-0.5	-0.6	-1	-0.6	-0.9	-1.1	-1.2	-1.2	-1.3
2008	1.1	-1.2	-1.6	-1.3	-1	-0.8	-0.9	-1	-1	-1.1	-1.1	-1.1
2009	-1	-0.9	-0.9	-0.7	-0.6	0.3	0.6	0.5	0.4	0.6	1.2	1.1
2010	1	1.3	1.3	0.4	-0.5	-1.7	-2.5	-2.5	-2.4	-2.2	-2.1	-1.9
2011	-1.9	-1.6	-1.8	-1.9	-1.3	-1.1	-0.9	-0.9	-1.2	-1.4	-1.3	-1.2
2012	-1.1	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.1	0.4	0	-0.3	-0.2	-0.2	0
2013	0	0	-0.2	-0.4	-0.9	-1.1	-0.8	-0.5	-0.4	-0.2	-0.2	-0.3

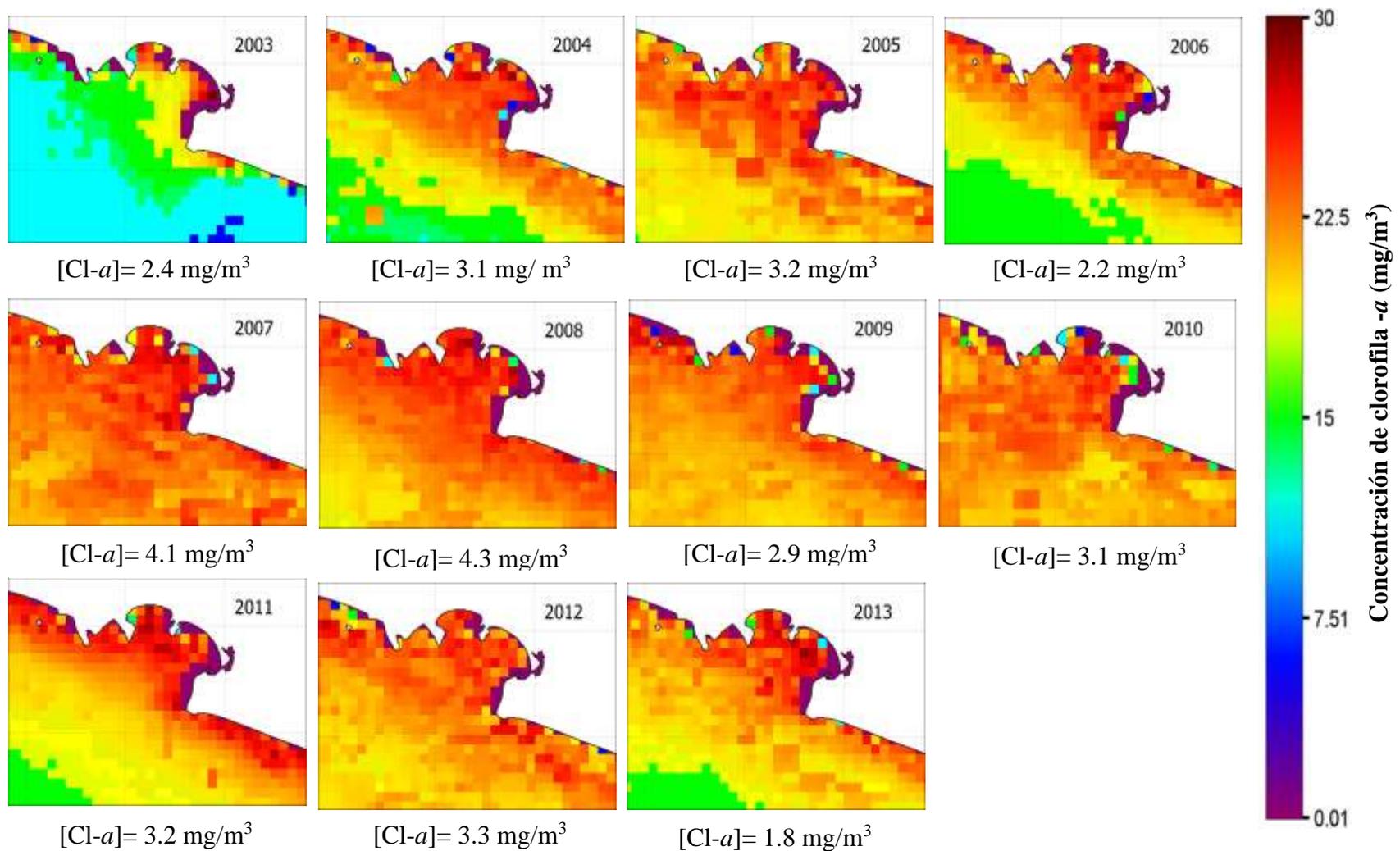


Figura 30. Promedios anuales de la concentración de clorofila-a. Se observa que a partir de 2007 se presenta un aumento en comparación al año previo. También se aprecia que a partir de 2007 las concentraciones permanecen relativamente constantes.

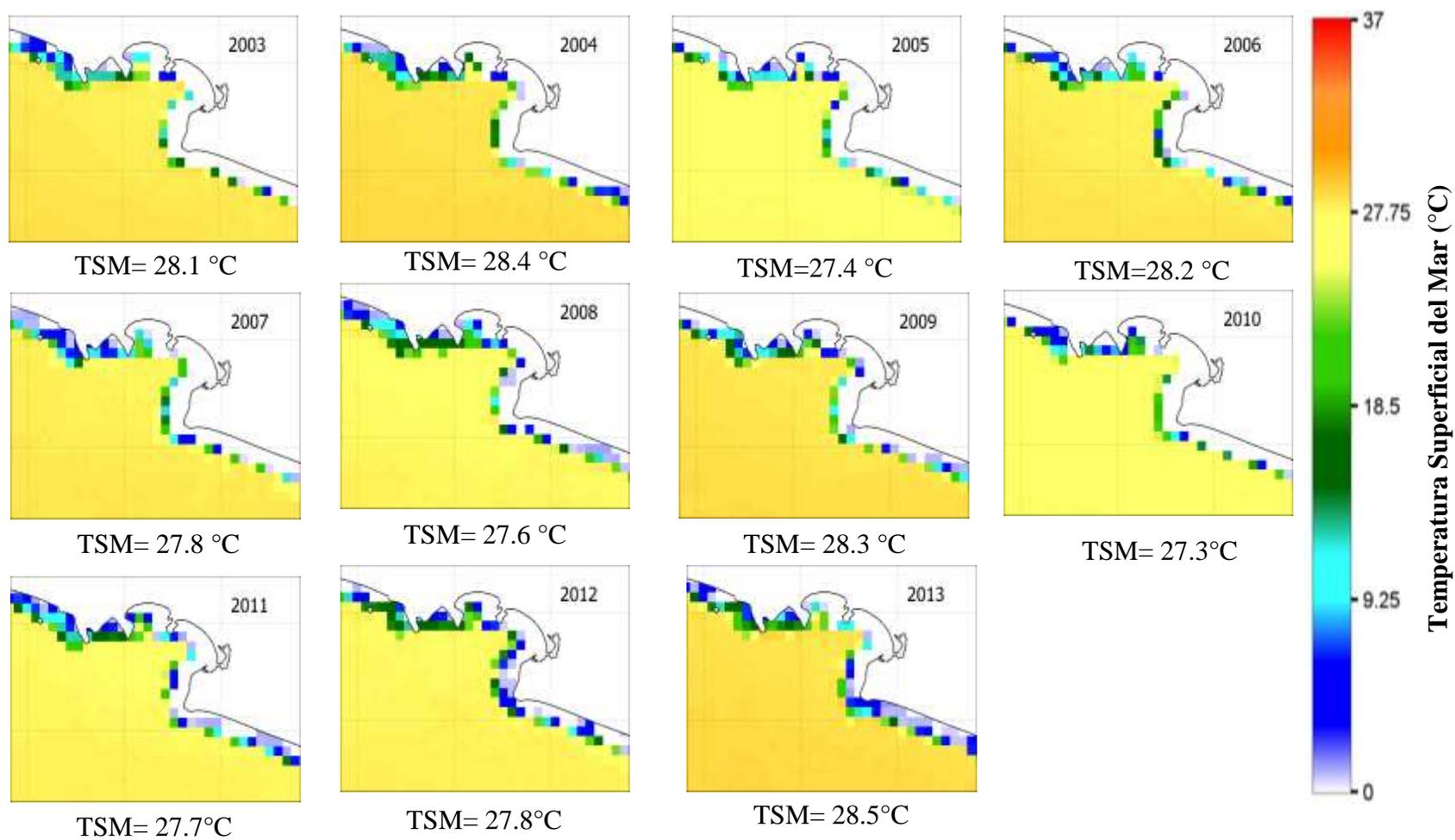


Figura 31. Promedios anuales de la TSM. Se observa que en 2007 disminuye la TSM en comparación al año previo. Se aprecia que 2010 fue el año con los valores más bajos de TSM.

Por otra parte, se observó que la mayor riqueza de especies ocurrió en 2008 (Tabla 6), el cual fue uno de los años en el que prevaleció la fase fría de ENOS (Tabla 9), esto sugiere que el fenómeno ENOS puede tener efectos en la composición de especies de los FAN. Durante el año 2008 se registraron 10 especies, de las cuales 5 fueron potencialmente tóxicas (Tabla 6), las especies que se presentaron en dicho año se caracterizan porque en su mayoría son poco frecuentes en el área de estudio (Hernández-Becerril *et al.*, 2007) y también fueron poco recurrentes durante todo el periodo de estudio, incluso dos especies potencialmente tóxicas, las cuales son *Pseudo-nitzschia* sp. y *Karlodinium* sp. se presentaron exclusivamente en este año. El hecho de que en 2008 se presentaran especies poco frecuentes en el área de estudio indica posiblemente que, durante 2008 la fase fría de ENOS produjo cambios en las condiciones oceanográficas que causaron el desplazamiento de las especies dominantes, lo que a su vez permitió el florecimiento de otras especies, de hecho, durante el florecimiento del 20 de marzo al 13 de abril 2008 (Tabla 5), no estuvieron presentes *Mesodinium rubrum* ni *Gymnodinium catenatum*, que son las especies dominantes en el área de estudio.

En el caso de *Karlodinium* sp. que es un registro nuevo para la Bahía de Manzanillo, es también un indicador de que la información histórica acerca de la composición de especies formadoras de FAN es aún incompleta. Esta situación resalta la necesidad de hacer una revisión más exhaustiva e integral tanto de los registros históricos, como de las actualizaciones de la información de los FAN en Bahía de Manzanillo, con la finalidad de contar con más información que permita estudiar de mejor manera los FAN e identificar los cambios que presenten. Otra posible causa de que *Karlodinium* sp. se haya presentado de manera eventual, y que no hayan más registros de este género en la Bahía de Manzanillo y en general haya poca información de este género en el Pacífico Central Mexicano (Hernández-Becerril., *et al.*, 2007), es que se trate de un género exótico introducido por actividades humanas, por ejemplo por la descarga de agua de lastre, y que por lo tanto no esté adaptado al ecosistema de la Bahía de Manzanillo, pero que si pueda responder de manera oportunista si las condiciones oceanográficas presentan cambios que le favorezcan, lo que probablemente ocurrió en el año 2008 como efecto de la fase fría de ENOS. Cabe mencionar que la introducción de especies exóticas formadoras de FAN es una hipótesis que ha sido propuesta previamente (Ortiz-Lira y Jiménez-Quiroz, 2006; Hernández-Becerril., *et al.*, 2007; Vega-Juárez, 2014)

Por otro lado, el hecho de que contrario a lo que se esperaba, la clorofila-*a* no mostró -ninguna señal espectral importante (Figura 19), ni tampoco mostrara coherencia con los FAN en la macroescala (Figura 20) puede indicar que, en esta escala los FAN oscilan de una manera distinta a la concentración de clorofila-*a*, es decir oscilan de una manera distinta al resto de la biomasa fitoplanctónica. Debido a que, en la macroescala se ha sugerido que, uno de los principales factores que favorecen el aumento de la biomasa fitoplanctónica, y por lo tanto de la clorofila-*a*, es la fase fría de ENOS (Monreal-Gómez *et al.*, 1999), los resultados en la macroescala serán explicados considerando la posible influencia de este fenómeno. En el caso del Pacífico mexicano, aunque se ha observado que, la fase fría de ENOS en ocasiones produce el aumento de la clorofila-*a*, en otras ocasiones no provoca cambios en la concentración de este pigmento o incluso llega a causar un decremento (Pérez-Arvizu *et al.*, 2013). Esta falta de claridad en la relación entre el fenómeno ENOS y la concentración de clorofila-*a* pudo haber sido la causa de que en el presente trabajo la clorofila-*a* no mostrara ninguna oscilación importante en la macroescala (Figura 19), indicando que este pigmento no está claramente modulado por eventos de macroescala como lo es el fenómeno ENOS (Pérez-Arvizu *et al.*, 2013). Se ha explicado que el hecho de que la biomasa fitoplanctónica, no siempre es favorecida por la fase fría de ENOS, es debido a que las especies no pueden aclimatarse rápidamente a los cambios en las condiciones oceanográficas producidos por ENOS. Un efecto similar pudo haber sucedido en el presente estudio, de modo que los cambios producidos por el fenómeno ENOS desfavorecieran al fitoplancton, excepto a aquellas especies capaces de aclimatarse a dichos cambios, tales especies se volverían dominantes y podrían formar FAN, como es el caso de *Gymnodinium catenatum* y *Mesodinium rubrum*. De tal manera que, podría ser posible que el fenómeno ENOS influya de manera más clara en la formación de FAN que en el fitoplancton en general, lo que a su vez permite explicar que los FAN si mostraron una señal espectral (Figura 19) y un valor de coherencia con la TSM en la escala temporal de 2.3 años (28.4 meses) (Figura 20), que indica que tanto los FAN como la TSM están modulados por eventos de macroescala como lo es el fenómeno ENOS.

Aunque en el presente estudio la variabilidad temporal de los FAN en la macroescala se circunscribió al estudio de la influencia de ENOS, otro fenómeno de escala mayor a un año que se ha observado que está relacionado a la ocurrencia de FAN es la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) (Pitcher *et al.*, 2010; Cortés-Altamirano *et al.*, 2019). La ODP es un patrón a largo plazo de la variabilidad climática del Océano Pacífico y puede presentar dos fases extremas, la fase positiva o cálida y la fase negativa o fría, la transición entre ambas fases ocurre en lapsos de 20 a 30 años aproximadamente (NOAA, 2023). La fase positiva o cálida de la ODP se caracteriza por un enfriamiento general del Pacífico subártico central y un calentamiento a lo largo de la costa noreste del Pacífico; mientras que cuando la ODP tiene un valor negativo, los patrones climáticos se invierten, con TSM por encima del promedio en el interior y TSM por debajo del promedio a lo largo de la costa de América del Norte (NOAA, 2023). Se ha observado que la ODP afecta los sistemas de surgencia costeras de una manera parecida a el fenómeno ENOS, es decir, durante la fase fría de la ODP se generan condiciones favorables para la presencia de surgencias (NASA, s.f.; NOAA, 2023; Pitcher *et al.*, 2010) y con ello el desarrollo de florecimientos algales, incluyendo los nocivos (Pitcher *et al.*, 2010).

Recientemente se ha reportado que, las fases de la ODP han sido más cortas. Por ejemplo, en 1999 comenzó la fase fría con una duración aproximada de 4 años (1999-2002), seguida por una fase cálida que continuó por 3 años (2003-2005), posteriormente una fase neutral hasta 2007, cuando comenzó una fase fría que duró hasta 2013 (NOAA, 2023), esta información se puede observar consultando los valores del Índice de la Oscilación Decadal del Pacífico (Tabla 10). Aunque la extensión de las series de tiempo del presente trabajo abarca solamente una década y por lo tanto es insuficiente para analizar la relación de los FAN y de la ODP, la cual oscila en periodos de más de diez años, considerando la anterior información que indica que recientemente se ha observado que la transición entre las fases de la ODP ha sido menor a una década, se sugiere que la ODP pudo haber influido en la variabilidad temporal de los FAN observada en el presente trabajo. Al revisar la distribución anual del número de días de FAN (Figura 29) se identifica que la fase cálida y la fase neutral de la ODP, de 2003 a 2006, coincide con el menor número de días de FAN o incluso la total ausencia de estos; mientras que, al iniciar la fase fría de la ODP, en 2007, se registró el mayor número de FAN, de todo el periodo de estudio (Figura 29). Estos resultados coinciden con lo que ha sido previamente

reportado, es decir que la fase fría de la ODP, de manera similar a la fase fría de ENOS puede producir condiciones oceanográficas favorables para el desarrollo de FAN (Cortes-Altamirano et al., 2019; Pitcher *et al.*, 2010). Sin embargo, es importante estudiar con mayor cantidad de datos y en una mayor escala espacial y temporal la posible influencia de la ODP y los FAN en la Bahía de Manzanillo.

Tabla 10. Valores del Índice de la ODP correspondientes a la década 2003-2013. Se resaltan las anomalías positivas, en rojo, y negativas, en azul, Se observa una fase cálida (2003-2005), posteriormente una fase neutral (2006) y el comienzo de una fase fría desde 2007 en adelante.

Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2003	1.45	1.23	1.01	0.36	0.21	-0.42	0.37	0.63	-0.17	0.74	-0.23	-0.6
2004	-0.55	-0.21	-0.15	0	0.61	-0.11	0.04	0.24	0.02	-0.72	-1.22	-0.64
2005	-0.15	-0.01	0.7	0.28	1.36	0.85	0.11	-0.42	-0.99	-2	-1.89	-0.1
2006	0.54	0.38	-0.74	-0.54	-0.37	0.21	0.39	-0.85	-1.54	-0.46	-0.81	-0.42
2007	-0.69	-0.71	-1.1	-0.46	-0.29	-0.07	0.43	0.09	-0.97	-2.33	-1.46	-0.87
2008	-1.5	-1.46	-1.26	-1.79	-1.62	-1.85	-1.96	-1.85	-1.87	-1.9	-1.59	-1.31
2009	-1.81	-1.78	-2.06	-2.23	-1.32	-0.73	-0.71	-0.49	0.33	-0.13	-0.94	-0.51
2010	0.05	0.25	-0.16	-0.04	-0.18	-0.79	-1.99	-2.21	-2.45	-1.6	-1.57	-2.04
2011	-1.8	-1.46	-1.28	-1.02	-0.66	-1.08	-2.3	-2.37	-2.5	-1.92	-2.95	-2.4
2012	-1.85	-1.35	-1.66	-1.01	-2.12	-1.63	-2.4	-2.6	-2.99	-1.22	-0.66	-1.31
2013	-1.1	-1.42	-1.48	-0.72	-0.4	-1.19	-1.34	-1.56	-1	-1.65	-1.09	-1.04

De manera general, los resultados del presente estudio permitieron corroborar que es necesario un estudio multidisciplinario y de mayor escala temporal y espacial para generar una mejor comprensión de los FAN en la Bahía de Manzanillo. Aunque el empleo de análisis de series de tiempo de datos satelitales de clorofila-*a* y de la TSM permitió identificar con mayor detalle algunas tendencias de la variabilidad temporal de los FAN que ya habían sido propuestas como hipótesis en trabajos previos, también quedan aspectos para estudiar con mayor detalle, como la ecología de especies, y la influencia sobre los FAN de las características locales de la Bahía de Manzanillo, las condiciones oceanográficas en escalas temporales y espaciales de mayor extensión. Se sugiere que el análisis de series de tiempo

de diversas variables que pueden estar asociadas al desarrollo de FAN representa una herramienta útil para avanzar en la comprensión de este tipo de florecimientos algales.

## 6. Conclusiones

Se sugiere que la hipótesis planteada en el presente trabajo puede ser aceptada. Ya que se identificó que la TSM, la clorofila-*a* y el número de días de FAN están correlacionados temporalmente en la mesoescala (Coherencia FAN-clorofila-*a*=0.5; Coherencia FAN-TSM=0.6) y en la macroescala (Coherencia FAN-TSM=0.4). Lo que, a su vez, permite concluir que la variabilidad temporal de los FAN en la Bahía de Manzanillo está modulada por eventos de mesoescala como las surgencias costeras eólicas, así como eventos de macroescala como el fenómeno ENOS e incluso la ODP.

FAN y su relación con las surgencias costeras eólicas:

- El análisis de coherencia de los FAN y los datos mensuales de TSM y clorofila-*a* permitió identificar que el valor más alto ocurrió a los 12 meses, (Coherencia FAN-clorofila-*a*= 0.5; FAN-TSM= 0.6), lo cual corresponde a la mesoescala. Estos resultados indican una tendencia estacional en las variables de estudio, la cual puede ser debido a la influencia de la temporada de surgencias costeras eólicas que ocurre en invierno-primavera y que favorecen la formación de FAN.
- En primavera, específicamente de marzo a mayo, se registraron los valores más bajos de TSM y las concentraciones más altas de clorofila-*a*, lo cual indica condiciones de surgencias, coincidiendo con el mayor número de días de FAN.
- Empleando datos satelitales diarios de la TSM se identificó la influencia de las surgencias sobre los FAN en la escala de días. Se observó que 84% de los FAN ocurrieron durante un evento de surgencia, ya que presentaron cambios de al menos 1.7 °C, indicando la presencia de un evento de surgencia.
- La disponibilidad de datos satelitales diarios de clorofila-*a* fue insuficiente para identificar alguna tendencia de este parámetro durante fechas de reporte de FAN, esto debido a la interferencia de la nubosidad, de tal manera que, de un total de 308 imágenes diarias recabadas, solamente 65 fueron de clorofila-*a*.

FAN y su relación con el fenómeno ENOS y con la ODP:

- En la macroescala el análisis de coherencia permitió identificar un único valor de 0.4, ocurrido entre los FAN y la TSM a los 2.3 años. Por un lado, este resultado puede

indicar la posible influencia del fenómeno ENOS sobre los FAN, ya que el ENOS ocurre en intervalos de 2 a 7 años. Por otro lado, este resultado también puede indicar la posible influencia de la ODP sobre los FAN, ya que, a partir de 1999 se ha reportado una disminución en el lapso en que ocurre la ODP, los cuales para el periodo de estudio del presente trabajo fueron de 1 a 6 años.

- Empleando el MEI, se identificó que en los años 2007 y 2010 se registró el mayor número de días de FAN, coincidiendo con la fase fría de ENOS. Contrastantemente, el año 2006 fue en el que se presentó el mayor número de anomalías positivas, las cuales indican condiciones de fase cálida de ENOS, coincidiendo con la ausencia de FAN. Adicionalmente, empleando el Índice de la ODP permitió identificar que la ODP, puede producir condiciones oceanográficas similares a las generadas por ENOS, pues se observó que la fase cálida y la fase neutral de la ODP, de 2003 a 2006, coincidieron con el menor número de días de FAN o incluso la total ausencia de estos (en 2005 y 2006); mientras que, al iniciar la fase fría de la ODP, en 2007, se registró el mayor número de FAN, de todo el periodo de estudio.

Alcances y limitaciones del uso de datos satelitales de la TSM y la clorofila-*a* para el estudio de FAN en la Bahía de Manzanillo:

- Uno de los alcances del uso de datos satelitales fue la posibilidad de construir series de tiempo y recuperar parte de la información histórica de los valores de TSM y clorofila-*a*, para el estudio de los FAN durante la década 2003-2013 en la Bahía de Manzanillo.
- Otro alcance de los datos satelitales de TSM y clorofila-*a* de resolución temporal mensual, para el estudio de los FAN en la Bahía de Manzanillo es la coherencia identificada entre estos parámetros y los FAN en la mesoescala y en la macroescala, la cual indica que, en estas escalas los datos satelitales son adecuados para el estudio de los FAN.
- Por otro lado, una de las limitaciones de los datos satelitales de TSM y clorofila-*a* para el estudio de los FAN en la Bahía de Manzanillo fue la insuficiente disponibilidad de imágenes diarias en especial de la clorofila-*a*, que dificultó emplear

los datos de las concentraciones de este pigmento para el estudio de la variabilidad temporal de los FAN en la escala de los días.

- Adicionalmente, es importante considerar que, la escala espacial de los datos satelitales es insuficiente para estudiar procesos locales que modulan los FAN en la Bahía de Manzanillo, pero pueden ser útiles para identificar los procesos de mesoescala y macroescala, como las surgencias, ENOS e incluso la ODP, lo cual con muestreos *in situ* es más complejo identificar.

#### Comentarios sobre el registro de los FAN

- En total se registraron 25 FAN compuestos por 10 especies, de las cuales 9 son potencialmente tóxicas y una es potencialmente nociva.
- Las especies más recurrentes fueron, *Mesodinium rubrum* y *Gymnodinium catenatum*, su alta frecuencia se sugiere que es resultado de la existencia de condiciones de surgencia y post-surgencia, las cuales se ha observado en trabajos previos que favorecen el florecimiento de estas especies.
- Se sugiere que *Karlodinium* sp. es un nuevo registro para la Bahía de Manzanillo ya que, aunque se reportó desde 2008, solamente se reporta en una fuente de información de todas las consultadas. Esto resalta la necesidad de una revisión más integral de los registros de FAN para identificar cambios de importancia sanitaria y para la detección de especies exóticas.

## 7. Referencias bibliográficas

1. Aguirre-Gómez, R., Álvarez, R. y Salmerón, O. 1999. Red tide evolution in the Mazatlán Bay area from remotely sensed sea surface temperatures. *Geofísica internacional* 38(2): 63-71.
2. Aguirre-Gómez, R., Salmerón, O., Álvarez, R. 2003. Effects of ENOS of the southwest coast of Mexico, 1996-1999. *Geofísica Internacional*. 42(3): 377-388.
3. Aguirre-Gómez, R. 2004. Los mares mexicanos a través de la percepción remota. México: Instituto de Geografía, UNAM y P y V editores. 94 p.
4. Alonso-Rodríguez, R. 1998. Ocurrencia de mareas rojas y calidad del agua en zona sur de la Bahía de Mazatlán, Sinaloa, México. Tesis de maestría. UNAM. 165 p.
5. Alonso-Rodríguez, R., Páez-Osuna, F. y Cortés-Altamirano, R. 2000. Trophic conditions and stoichiometric nutrient balance in subtropical waters influenced by municipal sewage effluents in Mazatlán Bay (SE Gulf of California). 40(4): 331-339.
6. Anderson, D.M., P. Andersen, V.M. Bricelej, J.J. Cullen, and J.E. Rensel. 2001. *Monitoring and Management Strategies for Harmful Algal Blooms in Coastal Waters*. París, Francia: UNESCO. 268 p. Recuperado el 7 de agosto de 2023, de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000140545>
7. Babin, M. 2008. Phytoplankton fluorescence: theory, current literature and *in situ* measurement. En: Babin, M., Roesler, C y Cullen, J. (Eds.). *Real-time coastal observing systems for marine ecosystem dynamics and Harmful Algal Blooms: theory, instrumentation, and modelling* (pp. 1-41). España: UNESCO.
8. Band-Schmidt, C; Bustillos-Guzmán, J; López-Cortés, D; Núñez-Vázquez, E. y Hernández-Sandoval, F. 2011. El estado actual del estudio de florecimientos algales nocivos en México. *Hidrobiológica*. 21(3):381-413.
9. Brown, E., Colling, A., Park, D., Phillips, J. y Wright, D. 2001. *Ocean circulation*. 2ª. Inglaterra: Elsevier. 286 p. Burkholder, J.M., Azanza, R.V., Sako, Y. 2006. The Ecology of Harmful Dinoflagellates. En Granéli, E., Turner, J.T. (Eds) *Ecology of Harmful Algae*. Ecological Studies, vol 189 (pp. 55-66). Berlin: Springer.

10. Bulgakov, S. y Martínez-Zatarain, A. 2006. Surgencia y vientos favorables en la costa oriental del Pacífico mexicano. En: Jiménez-Quiroz, M. y Espino-Barr. (eds.). Los recursos pesqueros y acuícolas de Jalisco, Colima y Michoacán (pp. 29-40). México: Ediciones de la noche.
11. Cantoral-Uriza, E., Asencio-Martínez, A. y Aboal-Sanjurjo, M. 2017. Cianotoxinas: efectos ambientales y sanitarios: Medidas de prevención. *Hidrobiológica*. 27 (2): 241-251.
12. Cerdeira-Estrada, S. y López-Saldaña, G. 2011. Nuevo sistema satelital de monitoreo oceánico para México. *Ciencias Marinas*. 37(2): 237-247.
13. Chang, G. and Dickey, T. 2008. Interdisciplinary sampling strategies for detection and characterization of harmful algal blooms. En: Babin, M., Roesler, C y Cullen, J. (Eds.). *Real-time coastal observing systems for marine ecosystem dynamics and Harmful Algal Blooms: theory, instrumentation, and modelling* (pp. 43-83). España: UNESCO.
14. Chorus, I. y Bartram, J. 1999. *Toxic Cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management*. Gran Bretaña: St. Edmundsbury Press. 400 p.
15. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua (CIDTA). s.f. *Ecosistemas acuáticos marinos*. <https://cidta.usal.es/cursos/biologia/pdfs/UNIDAD%205%20BIOLOGIA%20ACUATICA.pdf>
16. Colling, A. 2004. *Ocean circulation*. Singapore: Kyodo. 286 p.
17. Comisión Estatal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COESPRIS). s.f. *Marea roja y moluscos bivalvos*. [http://www.saludcolima.gob.mx/coespris/coespris\\_proyectos\\_marearaja.php?page2=proyectos&page=marea\\_roja#coespris](http://www.saludcolima.gob.mx/coespris/coespris_proyectos_marearaja.php?page2=proyectos&page=marea_roja#coespris)
18. Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS). 2016. *Antecedentes de presencia de marea roja en costas nacionales*. <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/antecedentes-en-mexico-76707>

19. Cortés-Altamirano, R., Alonso-Rodríguez, R. y Salas de León, DA. 2019. Historical observations of algal blooms in Mazatlan Bay, Sinaloa, Mexico (1979-2014). PLoS ONE. 14(1): e0210631. Recuperado el 7 de septiembre de 2023 de, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0210631>.
20. Cullen, J. 2008. Observation and prediction of harmful algal blooms. En Babin, M., Roesler, C y Cullen, J. (Eds.). Real-time coastal observing systems for marine ecosystem dynamics and Harmful Algal Blooms: theory, instrumentation and modelling (pp. 1-41). España: UNESCO.
21. Díaz-Guevara, D. 2017. Modelado y simulación de sistemas climáticos: desde la escala global hasta los microclimas. En Cala-Vitery, F. (Ed). Modelado y simulación de sistemas naturales. (pp. 11-40). Bogotá: Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Recuperado el 12 de diciembre de 2023 de: [https://www.researchgate.net/publication/318163154\\_Modelado\\_y\\_Simulacion\\_de\\_Sistemas\\_Climaticos\\_Desde\\_la\\_escalaglobal\\_hasta\\_los\\_microclimas](https://www.researchgate.net/publication/318163154_Modelado_y_Simulacion_de_Sistemas_Climaticos_Desde_la_escalaglobal_hasta_los_microclimas)
22. Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología (DIGAOHM). s.f. *Manzanillo, Colima.* <https://digaohm.semar.gob.mx/derrotero/cuestionarios/cnarioManzanillo.pdf>
23. Galicia-Pérez, M. 1987. Modelación numérica de las Bahías de Manzanillo y Santiago. Tesis de Maestría. UNAM. 66 p.
24. Galindo, I., Solano, R. y Morales, R. 1999. Localización de una zona de alta productividad primaria cercana a Cabo Corrientes, Jalisco por medio de datos AVHRR. Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural. 49: 183-191.
25. García-Mendoza, E., Quijano-Scheggia, S., Olivos-Ortiz, A. y Núñez-Vázquez, E. (eds.). 2016. Florecimientos Algales Nocivos en México. México: CICESE. 436p.
26. Gómez-Villarreal, M., Martínez-Gaxiola, M. y Peña-Manjarrez, J. 2008. Proliferaciones algales 2000-2001 en Bahía Banderas, México según el sensor SeaWiFS. Revista de Biología Tropical. 56 (4): 1653-1664.
27. Hernández-Becerril, D., Alonso-Rodríguez, R., Álvarez-Góngora, C., Barón-Campis, S., Ceballos-Corona, G., Herrera-Silveira, J., Meave del Castillo, M., Juárez-Ruíz, N., Merino-Virgilio, F., Morales-Blake, A., Ochoa, J., Orellana-

- Cepeda., E., Ramírez-Camarena, C. y Rodríguez-Salvador, R. 2007. Toxic and harmful marine phytoplankton and microalgae (HABs) in Mexican Coasts. *Journal of Environmental Science and Health Part A*.42:(10), 1349-1363.
28. Inzunza, JC. s.f. Biofísica. Chile: Universidad de Concepción (UDEC). Recuperado el 7 de septiembre de 2023 de <http://www2.udec.cl/~jinzunza/biofisica/unidad3.pdf>
29. Lalli, C. y Parsons, T. 1997. *Biological oceanography: an introduction*. 2ª. China: Elsevier Butterworth-Heinemann. 314 p.
30. Lindstrom, E, J. s.f. NASA , Physical Oceanography Program: Ocean motion and surface currents. Recuperado 7 de septiembre de 2023, <https://oceanmotion.org/html/background/upwelling-and-downwelling.htm>.
31. López-Sandoval, DC., Lara-Lara, JR., Lavín, MF., Álvarez-Borrego, S. y Gaxiola-Castro, G., 2009. Productividad primaria en el Pacífico oriental tropical adyacente a Cabo Corrientes, México. *Ciencias Marinas*. 35(2): 169–182.
32. Lundholm, N.; Churro, C.; Escalera, L.; Fraga, S.; Hoppenrath, M.; Iwataki, M.; Larsen, J.; Mertens, K.; Moestrup, Ø.; Zingone, A. (Eds). 2009 en adelante. IOC-UNESCO: Taxonomic Reference List of Harmful Micro Algae. Recuperado el 7 de septiembre de 2023, <https://www.marinespecies.org/hab>.
33. Mas, J. 2011. *Aplicaciones del Sensor MODIS para el monitoreo del territorio*. México: SEMARNAT, INE y UNAM. 317 p.
34. McClain, E. P., W. G. Pichel and C. C. Walton. 1985. Comparative performance of AVHRR - based Multichannel Sea Surface Temperature. *Journal of Geophysical Research: Oceans.*, 90: (C6), 11587-11601.
35. Meléndez-Valencia, M. y Meléndez-Torres, P. 2013. Influencia de la circulación eólica y marítima en la formación de las islas de basura en el mundo. *Ciencia y Sociedad*. 38 (4): 743-792.
36. Miller, R. Del Castillo, E. y McKee, B. 2005. *Remote sensing of coastal aquatic environments: technologies, techniques and applications*. Dordrecht: Springer Verlag. 345p.
37. Monreal-Gómez, MA., Salas de León, DA. y Aldeco-Ramírez, J. 1999. Las surgencias costeras de América. *Revista Geofísica*. Julio-diciembre (51): 7-43.

38. Morales-Blake, A., Rodríguez-Palacio, M., Barón-Campis, S., Hernández-Becerril, D. y Chávez-Comprarán, J. 2013. Eventos de surgencia registrados en las cotas de Jalisco y Colima, México. XX Congreso de Ciencia y Tecnología del Mar. Congreso celebrado en CONAPESCA, Baja California Sur, México.
39. Morris, J. G. 1999. Pfiesteria, “the cell from hell,” and other toxic algal nightmares. *Clinical Infectious Diseases* 28(6): 1191-1198.
40. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. s.f. a. Algorithm description: Chlophyll *a* (chlor\_a). Recuperado el 7 de septiembre de 2023, [https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/resources/atbd/chlor\\_a/](https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/resources/atbd/chlor_a/).
41. NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. s.f. b. Algorithm description: Long-Wave Sea Surface Temperature (SST). Recuperado el 7 de septiembre de 2023, <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/resources/atbd/sst/>.
42. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2023. Pacific Decadal Oscillation. Recuperado el 7 de septiembre de 2023, <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/pdo/>.
43. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). s.f. a. What is El Niño. Recuperado el 7 de septiembre de 2023, [https://www.pmel.noaa.gov/el\\_nino/what-is-el-nino](https://www.pmel.noaa.gov/el_nino/what-is-el-nino).
44. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). s.f. b. Multivariate ENOS Index (MEI). Recuperado el 7 de septiembre de 2023, <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/>.
45. Núñez-Fernández. 2006. Variación espacio temporal de las bacterias coliformes fecales y su relación con los parámetros físicos de la calidad del agua (O<sub>2</sub>, DBO, T, pH, S y visibilidad): en el puerto interior y Bahía de Manzanillo, Col. México. Durante 1991-1995. Tesis de Licenciatura. UNAM. 174 p.
46. Ochoa, J. 2003. ENOS phenomenon and toxic red tides in Mexico. *Geofísica Internacional*. 42 (3): 505-515.
47. Olaya, V. 2016. Introducción a Los SIG. Polonia: CreateSpace Independent Publishing Platform. 174 p. Recuperado el 7 de diciembre de 2023 de:

[https://www.google.com.mx/books/edition/Introducci%C3%B3n\\_a\\_Los\\_SIG/-rIBvgAACAAJ?hl=es](https://www.google.com.mx/books/edition/Introducci%C3%B3n_a_Los_SIG/-rIBvgAACAAJ?hl=es)

48. Olivos-Ortiz, A., Sosa-Ávalos, R., Silva-Iñiguez, L., Acosta-Chamorro., V. 2016. Efectos de los aportes de agua residual en la abundancia de especies fitoplanctónicas en las Bahías de Santiago y Manzanillo. En: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (Ed.) La Biodiversidad en Colima. Estudio de Estado (606-609 pp.). México: CONABIO.
49. Ortiz-Lira, H. y Jiménez-Quiroz, M. 2006. Registro de eventos de Marea Roja en Manzanillo, Colima (1986-2004). En: Jiménez-Quiroz, M. y Espino-Barr, E. (Eds). Los recursos pesqueros y acuícolas de Jalisco, Colima y Michoacán. Guadalajara, México (pp.324-334). México: SAGARPA.
50. Orlanski, I. 1974. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. *Bulletin American Meteorological Society*. 56(5):527-530.
51. Pantoja, D. De la Torre, C. y Filonov, A. 2017. Conectividad y dispersión de partículas en Bahía de Banderas, México. *Revista Mexicana de Métodos Numéricos*. Recuperado el 7 de septiembre de 2023, [https://www.scipedia.com/public/Pantoja\\_2017b](https://www.scipedia.com/public/Pantoja_2017b).
52. Padilla, L. 2016. La ciudad puerto de manzanillo: relevancia regional y crecimiento local. 21 Encuentro Nacional sobre Desarrollo Regional en México. Encuentro celebrado en AMECIDER, Yucatán, México. Recuperado el 8 de septiembre de 2023, de <http://ru.iiec.unam.mx/3279/1/048-Padilla.pdf>
53. Patiño-Barragán, M., Meyer-Willerer, A., Galicia-Pérez, M., Lezama-Cervantes, C. y Lara-Chávez, B. (2009). Zona de mayor afectación en el puerto de manzanillo colima México, por eventos hidrometeorológicos intensos y su periodicidad. *Boletín Técnico*. 47(1), 47-60.
54. Pettersson, L. y Pozdnyacov. 2013. *Monitoring of Harmful Algal Blooms*. Berlin: Springer-Verlag. 309p.
55. Pitcher, G., Figueiras, F., Hickey, B. y Moita, M. 2010. The physical oceanography of upwelling systems and the development of harmful algal blooms. *Progress in Oceanography*.85(1-2): 5–32.

56. Quijano-Scheggia, S. Olivos-Ortiz, A., Pérez-Morales, A., Álvarez-García, C. Gaviño-Rodríguez, J. y Sosa-Ávalos, R. 2016. Registros de microalgas nocivas o tóxicas formadoras de florecimientos algales en las Bahías de Manzanillo, Colima, México. En García-Mendoza, E., Quijano-Scheggia, S., Olivos-Ortiz, A. y Núñez-Vázquez, E (eds.). Florecimientos Algales Nocivos en México (214-226 pp.). Ensenada, México: CICESE.
57. Shen, L., Huiping, X. y Guo, X. 2012. Satellite remote sensing of Harmful Algal Blooms (HABs) and a potential synthesized framework. *Sensors (Basel)* 12(6): 7778–7803.
58. Sierra-Beltrán, A., Lluch-Cota, D., Lluch-Cota, S., Cortés-Altamirano., R., Cortés-Lara, M., Castillo-Chávez, M., Carrillo, L., Pacas, L. Viquez, R. y García-Hansen, I. 2004. Dinámica espacio temporal de organismos precursores de marea roja en la costa Pacífica de América del Norte y Centroamérica. *Revista de Biología Tropical*, 52(1): 99-107.
59. Sosa-Ávalos, R., Millán-Núñez, S., Quijano-Scheggia, J., Lara-Lara, R. y Silva-Iñigue, L. 2015. Variabilidad del coeficiente de absorción por fitoplancton con influencia de marea roja e las bahías de Manzanillo y Santiago, México. *Revista de biología marina y oceanografía*. 50 (3): 427-438.
60. Stumpf, R.P. and Tomlinson, M.C. 2005. Remote Sensing of Harmful Algal Blooms. In: Miller, R.L., Del Castillo, C.E. and McKee, B.A., (Eds.). *Remote Sensing of Coastal Aquatic Environments* (pp. 227-196). Dordrecht: Springer Verlag.
61. The Mathworks. (s.f.). Magnitude-squared coherence Recuperado el 7 de septiembre de 2023 de <https://la.mathworks.com/help/signal/ref/mscohere.html>
62. Thomson, R. y Emery, W. 2014. *Data analysis methods in physical oceanography*. 3ra. Amsterdam: Elsevier. 716p.
63. Vega-Juárez, G. 2014. Caracterización de las proliferaciones algales ocurridas en el Pacífico Central Mexicano del 10 al 22 de abril de 2012. Tesis de Maestría. UNAM. 185p.
64. Vivancos, J. Llastarri, A., Grau, M. y Vivancos, D. 2005. La Tierra vista de satélite: introducción a la teledetección. Recuperado el 7 de septiembre de 2023

de:[http://ntic.educacion.es/w3/eos/MaterialesEducativos/mem2005/tierra\\_vista\\_satelite/index.htm](http://ntic.educacion.es/w3/eos/MaterialesEducativos/mem2005/tierra_vista_satelite/index.htm)

65. Wright, J. y Colling, A. 1995. Seawater: its composition, properties and behavior.2ª. Inglaterra: Pergamon. 172p.

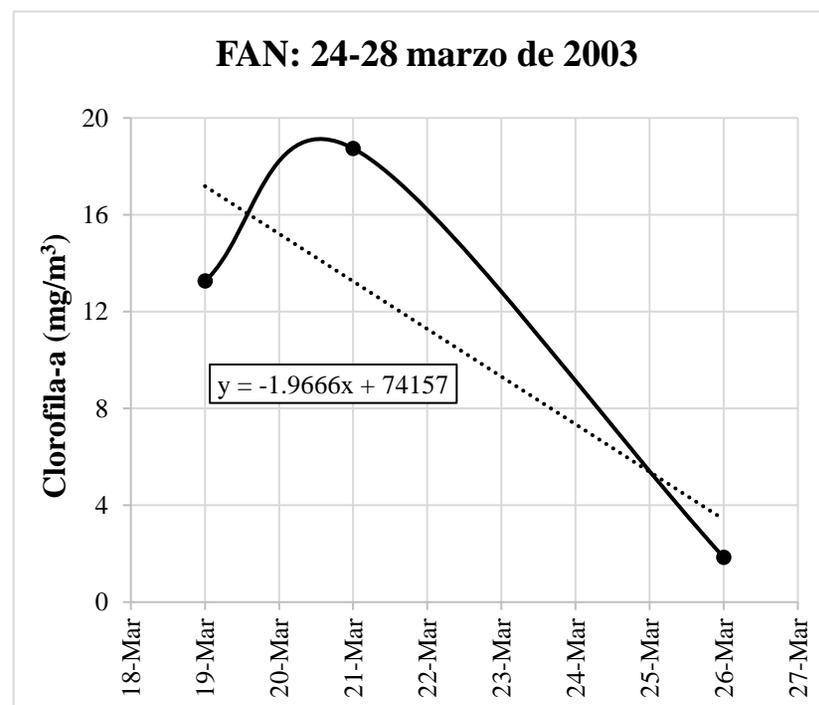
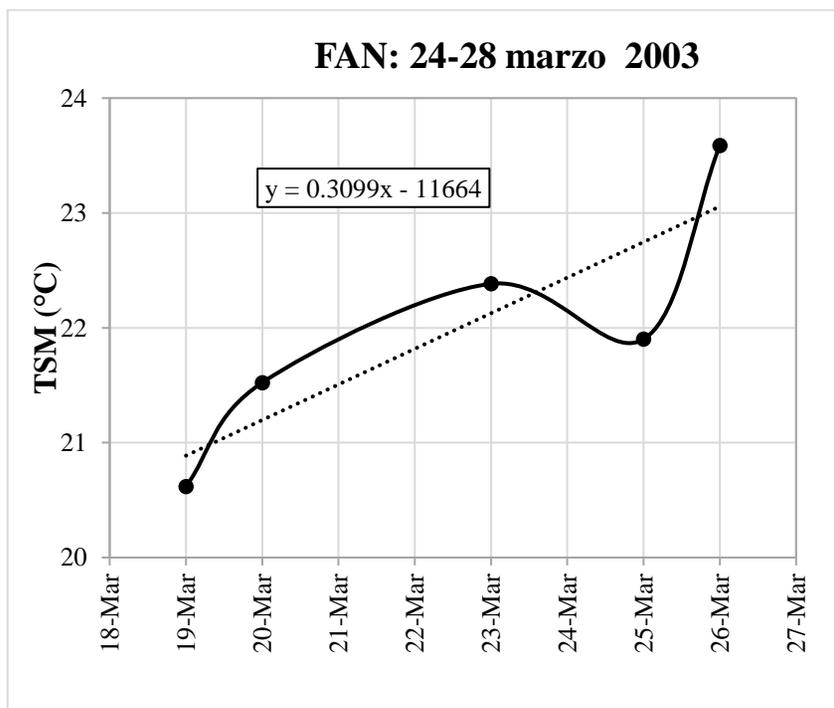
**8. Anexo: catálogo de imágenes satelitales de TSM y clorofila-a correspondientes a fechas de reporte de FAN en Bahía de Manzanillo 2003-2013**

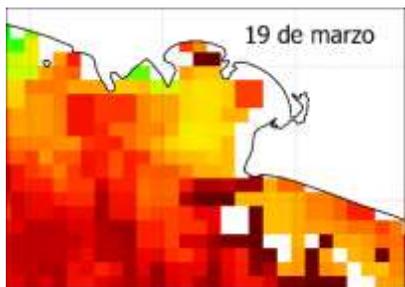
## 8.1 FAN ocurrido del 24-28 marzo 2003

Composición de especies: *Mesodinium rubrum*

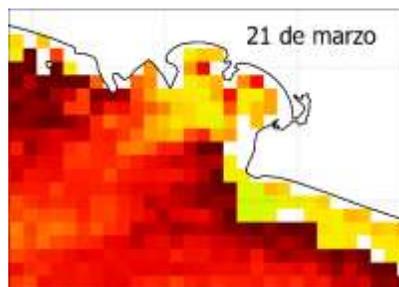
Rango de Cl-a en 1-10 días: 2 mg/m<sup>3</sup>

Rango de TSM en 1-10 días: 3 °C

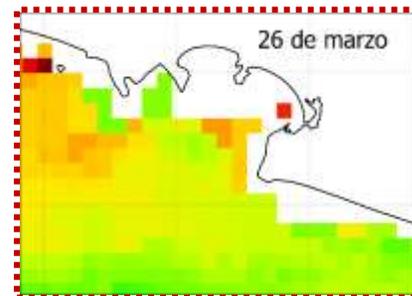




[Cl-a]=13.26 mg/m<sup>3</sup>

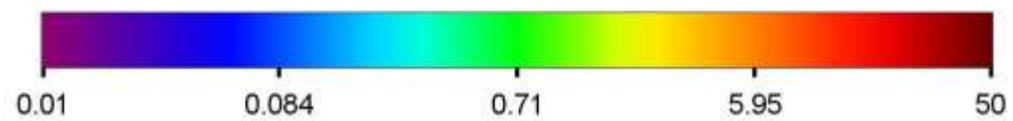


[Cl-a]=18.74 mg/m<sup>3</sup>



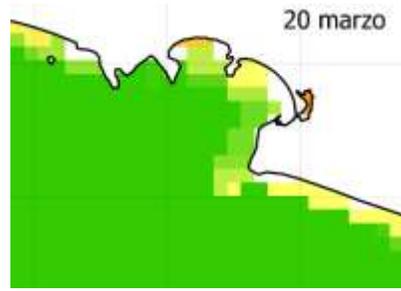
[Cl-a]=1.85 mg/m<sup>3</sup>

Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)

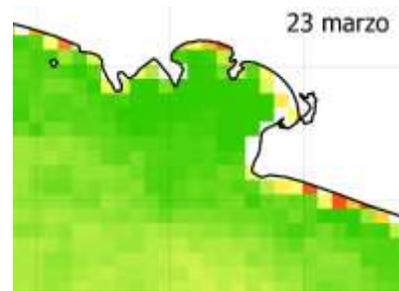




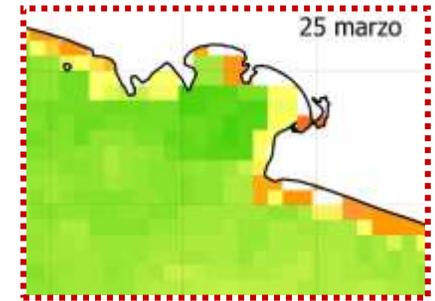
TSM=20.6°C



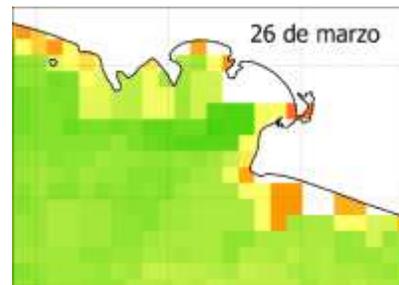
TSM=21.5°C



TSM=22.4°C

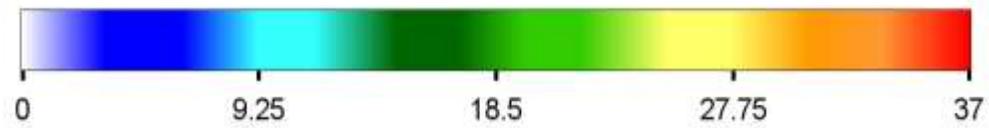


TSM=21.9°C



TSM=23.6°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

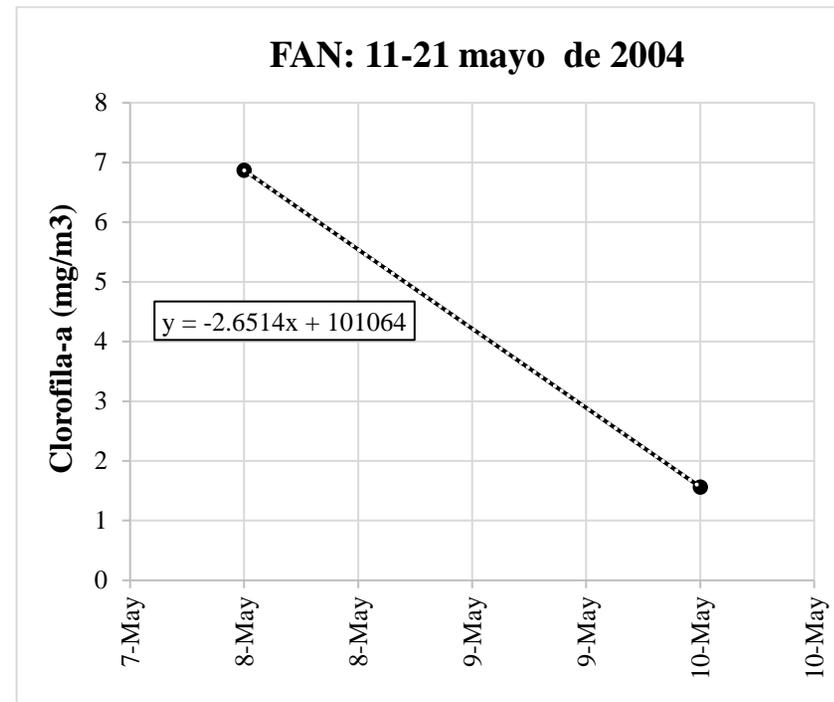
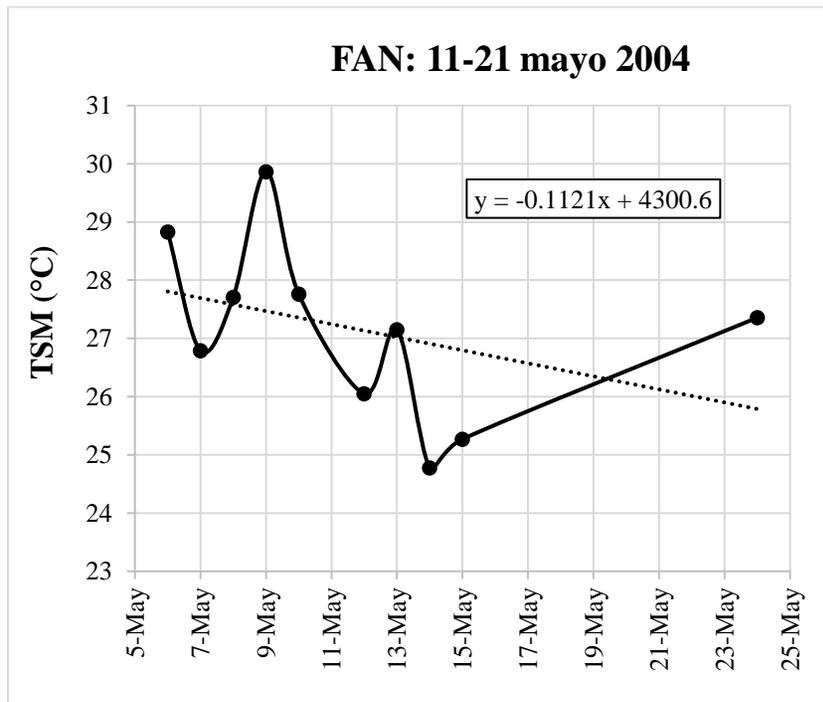


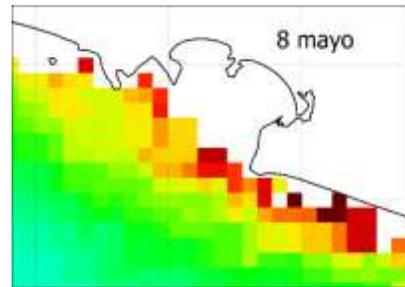
## 8.2 FAN ocurrido del 11-21 mayo 2004

Composición de especies: *Mesodinium rubrum* y *Triplos divaricatus* (*Ceratium divaricatum*)

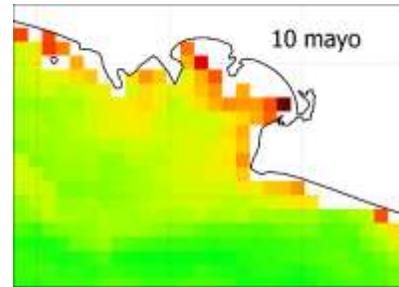
Rango de Cl-a en 1 a 10 días: 5.3mg/m<sup>3</sup>

Rango de TSM en 1 a 10 días: 5.1°C



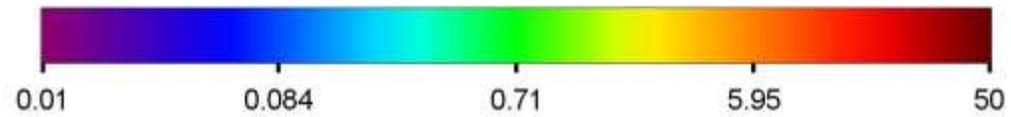


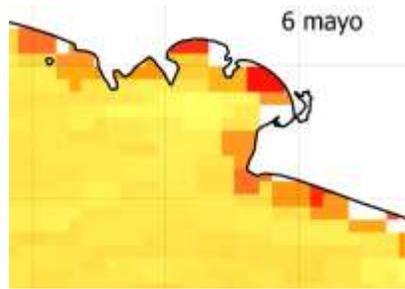
[Cl-a]= 6.9 mg/ m<sup>3</sup>



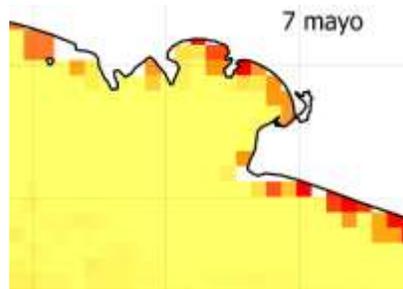
[Cl-a]= 1.6 mg/ m<sup>3</sup>

Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)

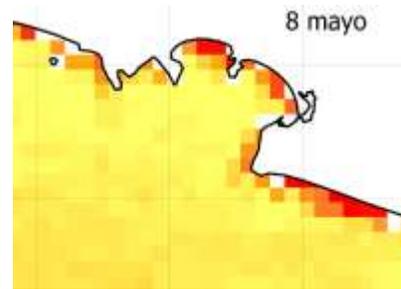




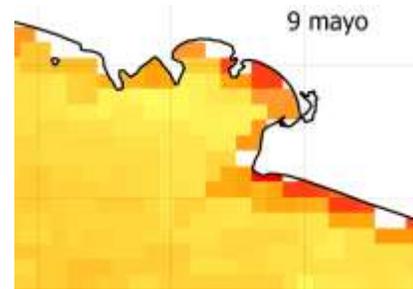
TSM= 28.8 °C



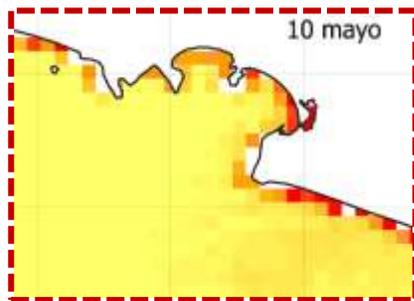
TSM= 26.8 °C



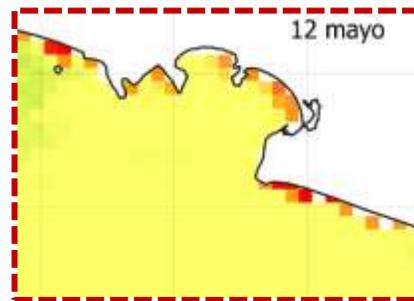
TSM= 27.7 °C



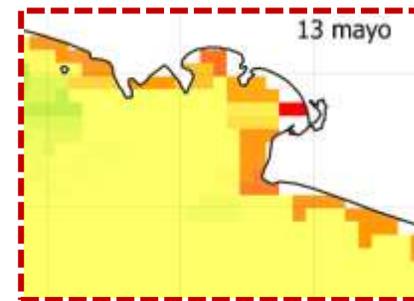
TSM= 29.9 °C



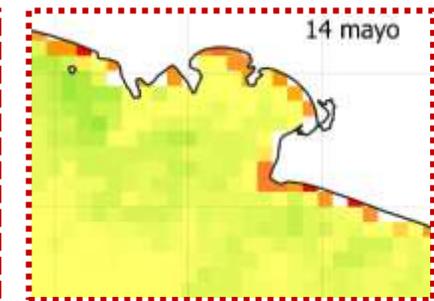
TSM= 27.8 °C



TSM= 26.1 °C

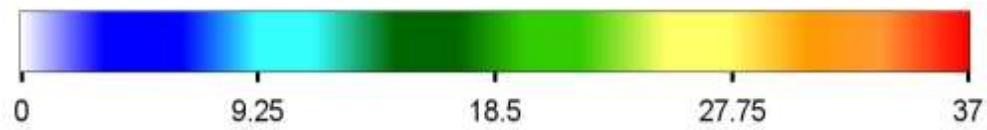


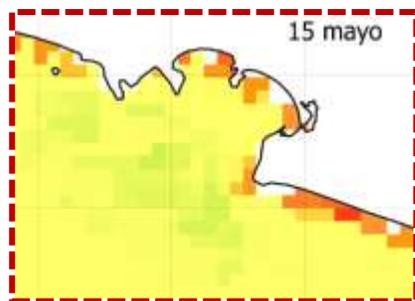
TSM= 27.2 °C



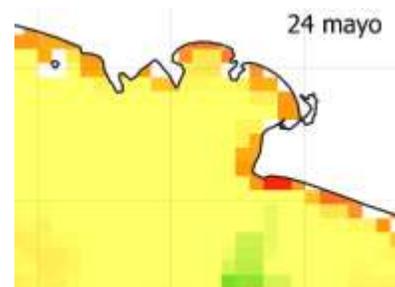
TSM= 24.8 °C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**



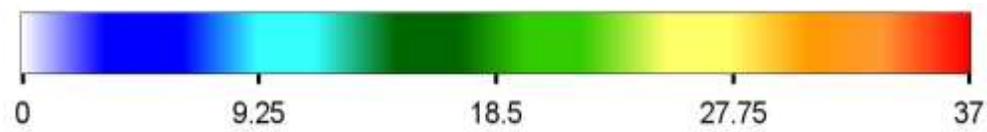


TSM= 25.3° C



TSM= 27.4° C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

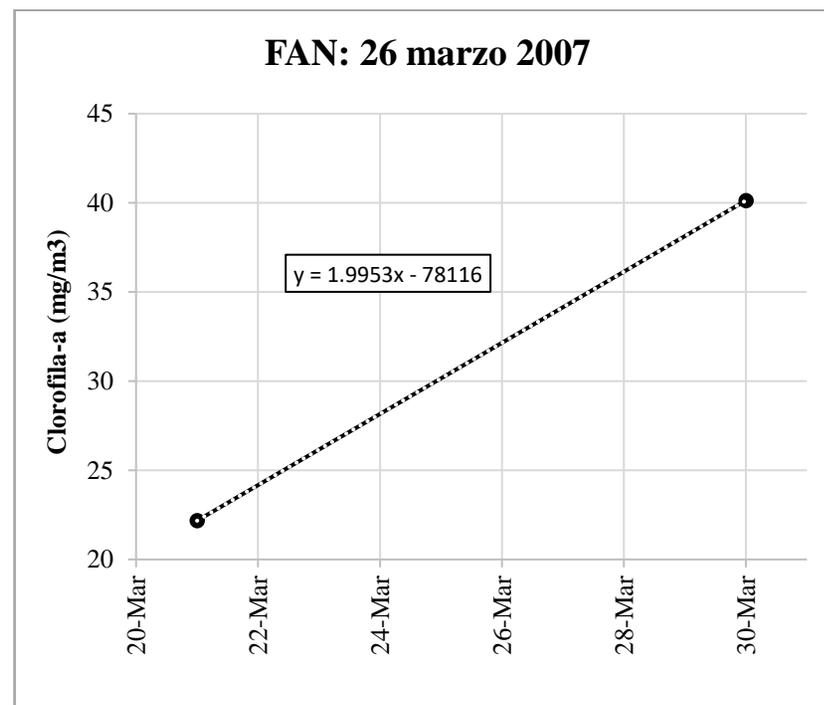
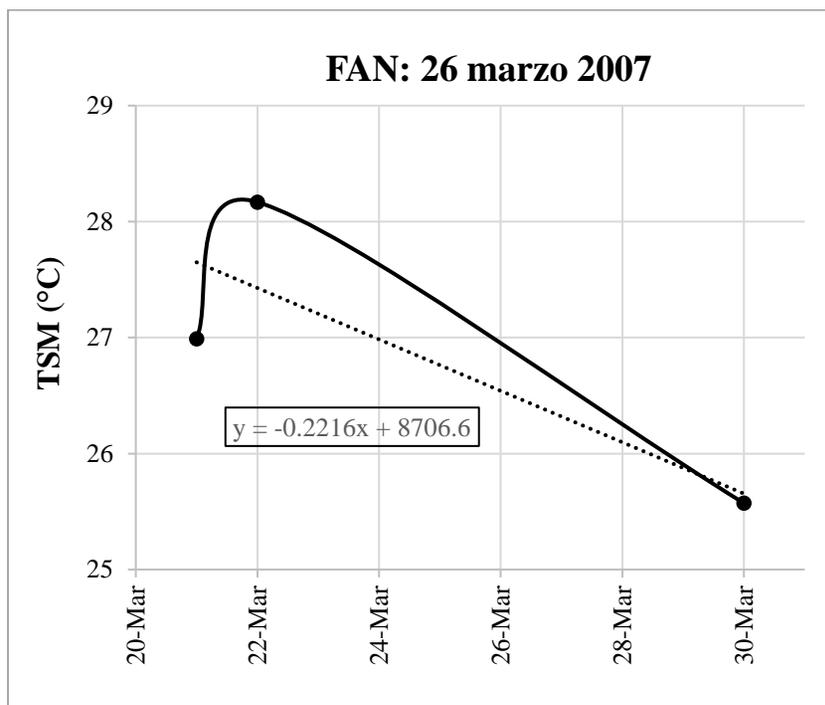


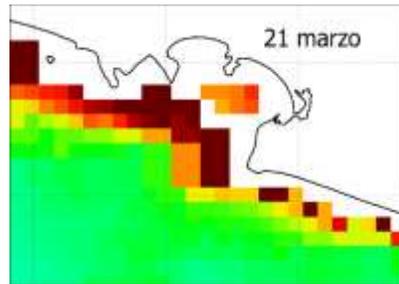
### 8.3 FAN ocurrido el 26 marzo 2007

Composición de especies: *Karenia mikimotoi*

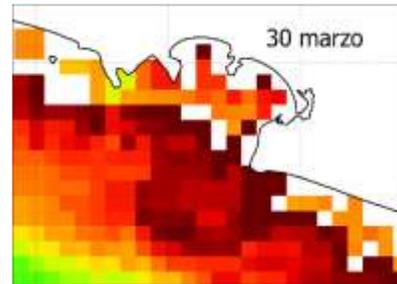
Rango de Cl-a de 1 a 10 días: 18 mg/m<sup>3</sup>

Rango de TSM de 1 a 10 días: 2.6°C



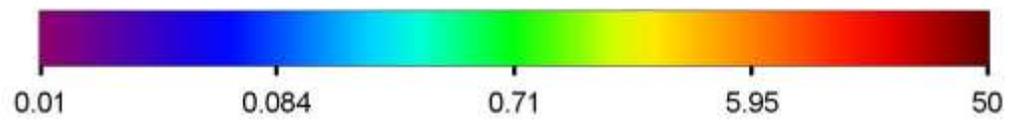


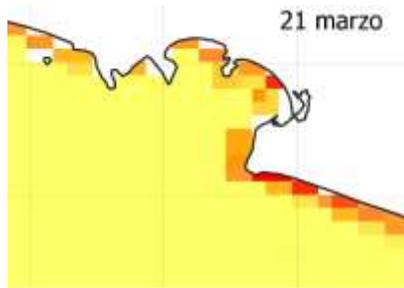
[Cl-a]= 22.2 mg/m<sup>3</sup>



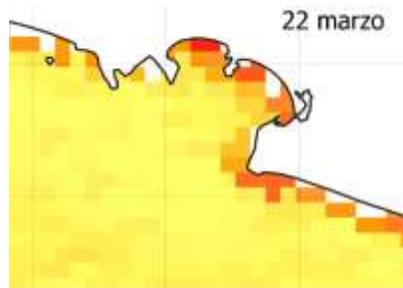
[Cl-a]= 40.1 mg/m<sup>3</sup>

**Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)**

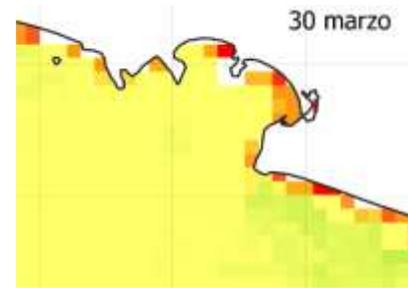




TSM=27°C

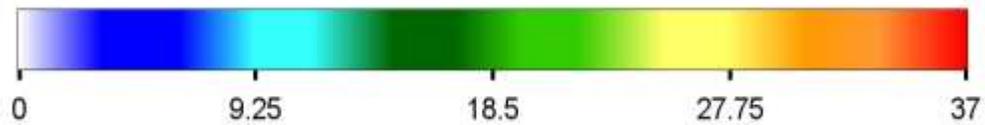


TSM=28.2°C



TSM=25.6°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

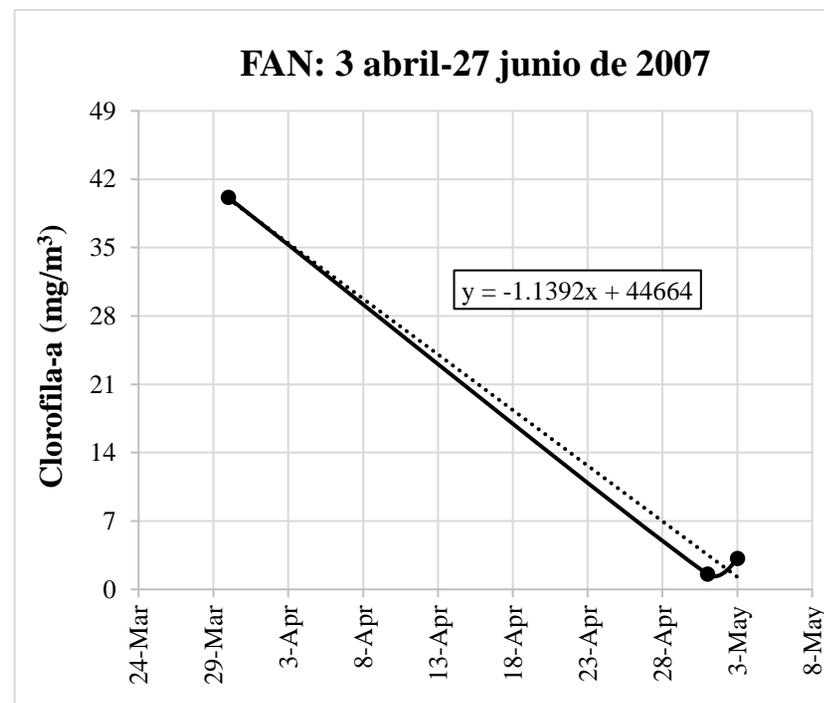
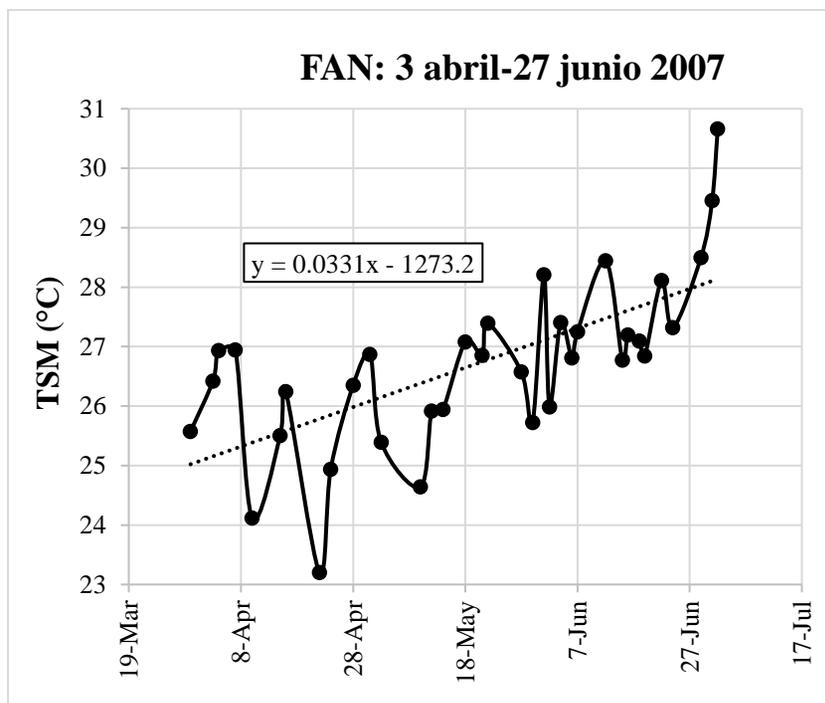


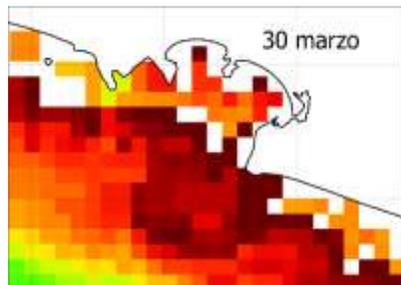
## 8.4 FAN ocurrido del 3 de abril al 27 de junio de 2007

**Composición de especies:** *Karenia mikimotoi*, *Gymnodinium catenatum*, *Margalefidinium polykrikoides* y *Tripes divaricatus* (*Ceratium divaricatum*)

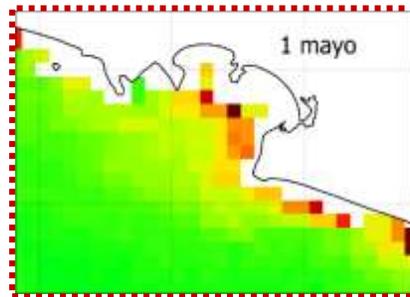
**Rango de Cl-a de 1 a 10 días:** 1.6 mg/m<sup>3</sup>

**Rango de TSM de 1 a 10 días:** 7.5°C

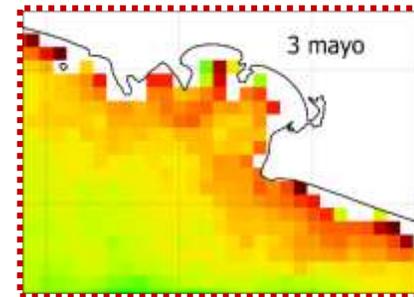




[Cl-a]= 40.1 mg/m<sup>3</sup>

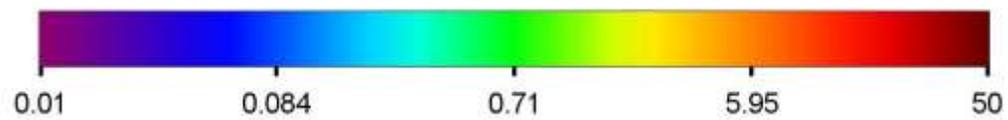


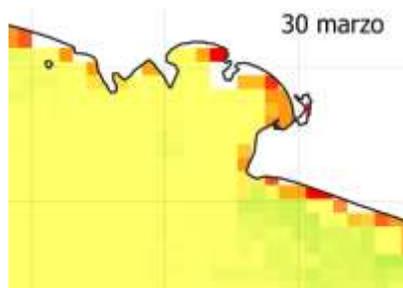
[Cl-a]=1.6 mg/m<sup>3</sup>



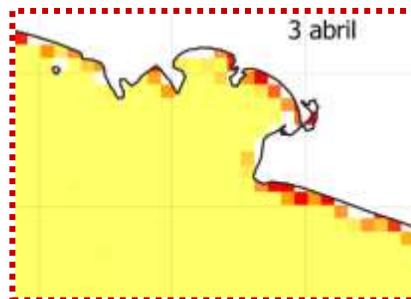
[Cl-a]= 3.2 mg/m<sup>3</sup>

Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)

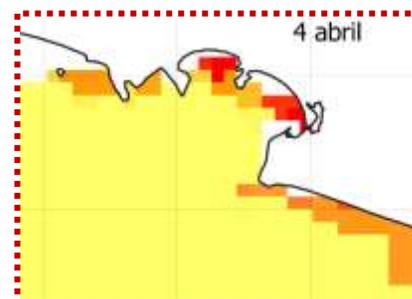




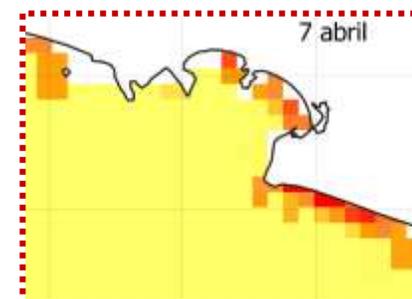
TSM=25.6 °C



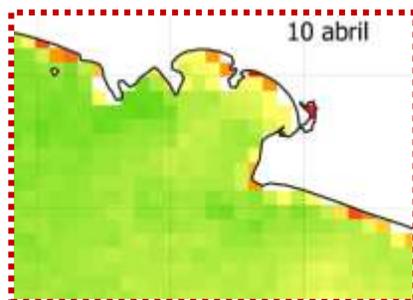
TSM=26.4 °C



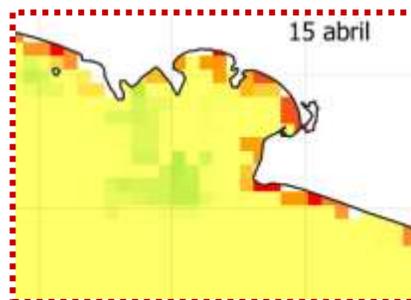
TSM=26.9 °C



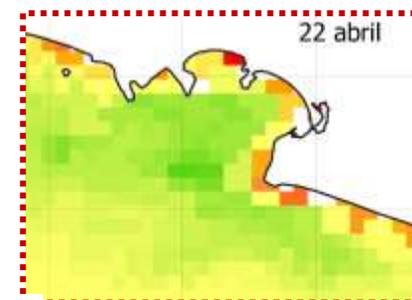
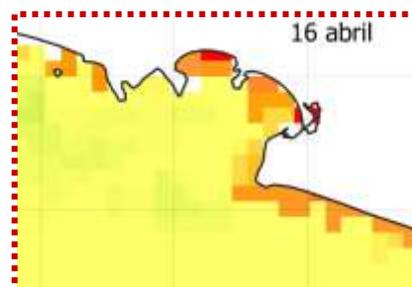
TSM=26.9 °C



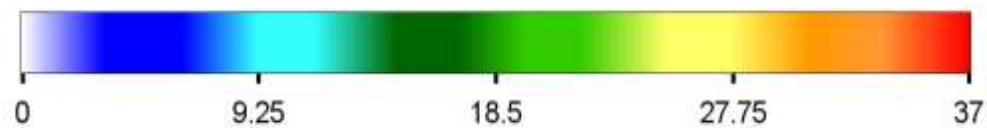
TSM=24.1 °C

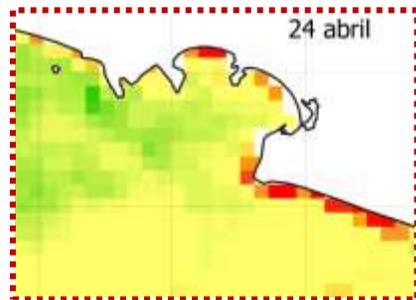


Temperatura Superficial del Mar (°C)

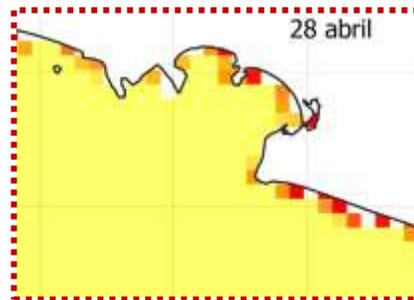


TSM=23.2 °C

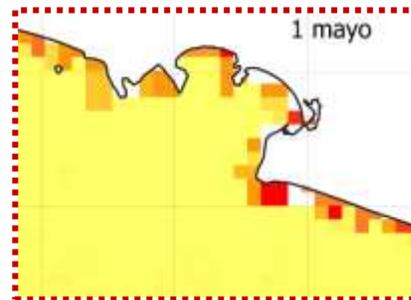




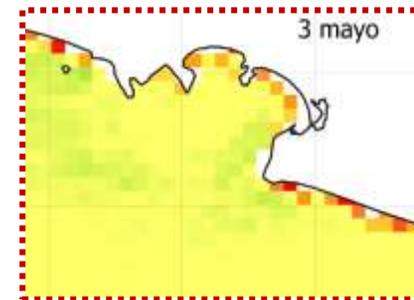
TSM=24.9°C



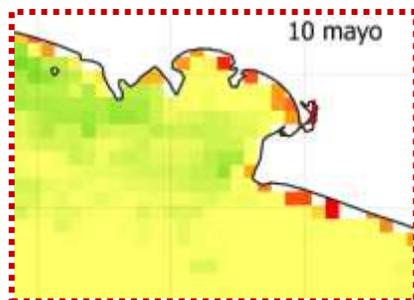
TSM=26.4°C



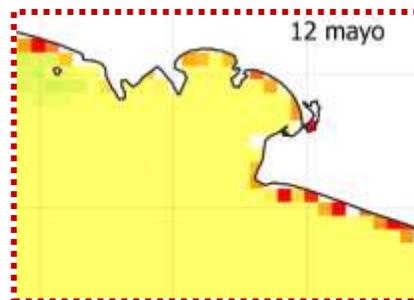
TSM=26.9°C



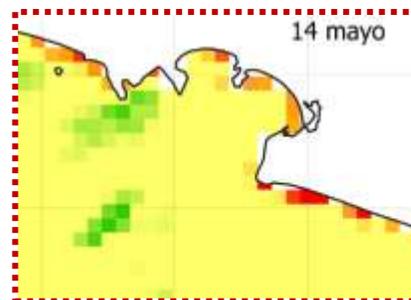
TSM=25.4°C



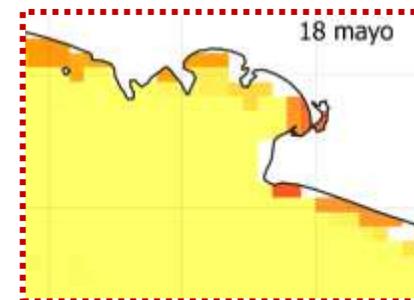
TSM=24.6°C



TSM=25.9°C

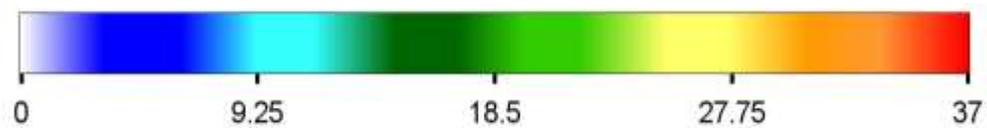


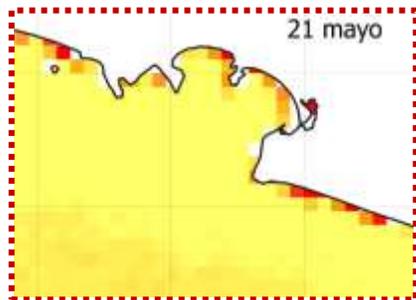
TSM=25.9°C



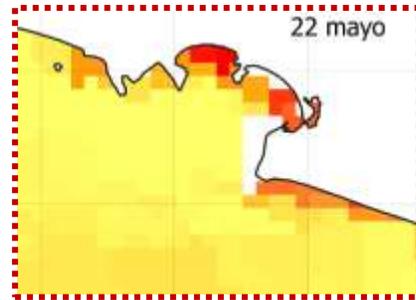
TSM=27.1°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**





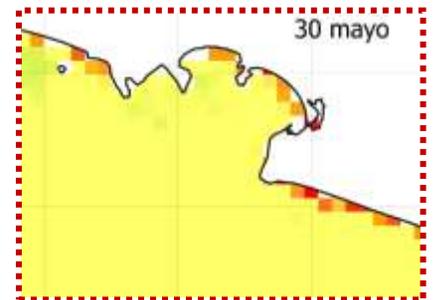
TSM=26.9°C



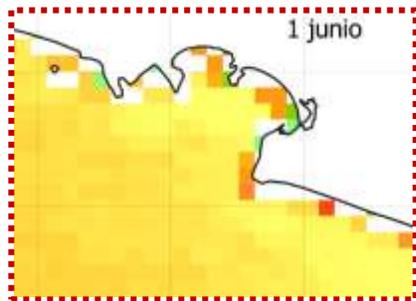
TSM=27.4°C



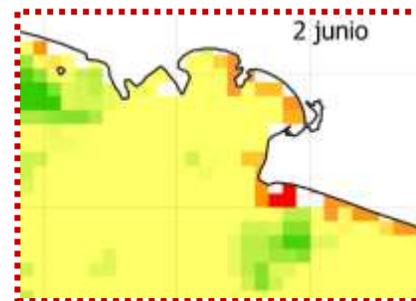
TSM=26.6°C



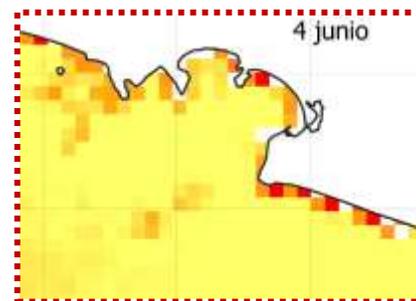
TSM=25.7°C



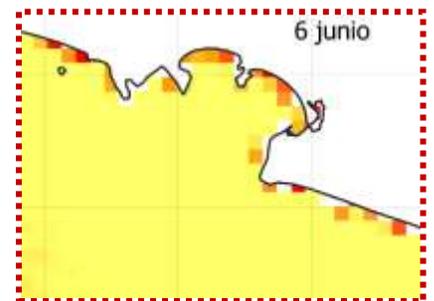
TSM=28.2°C



TSM=26°C

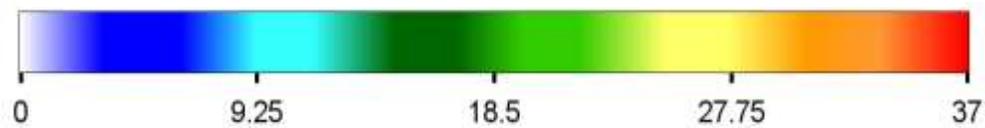


TSM=27.4°C



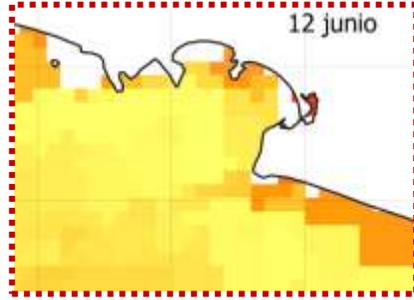
TSM=26.8°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

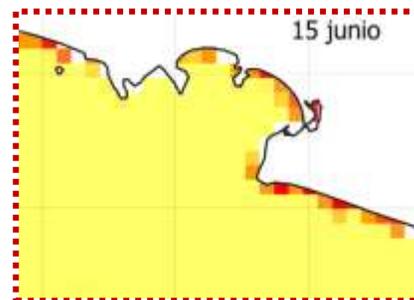




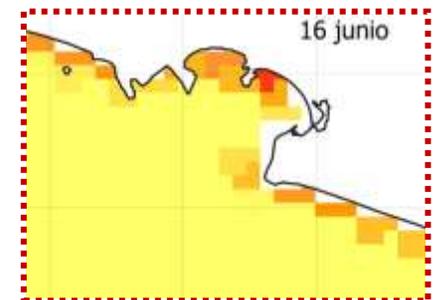
TSM=27.2°C



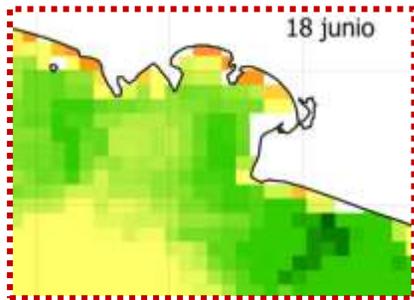
TSM=28.4°C



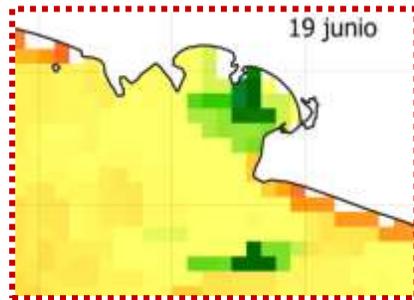
TSM=26.8°C



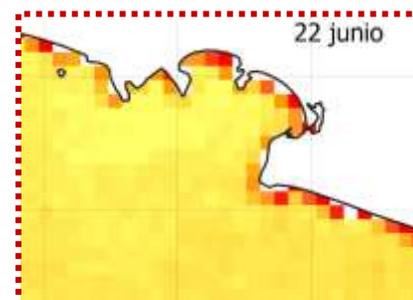
TSM=27.2°C



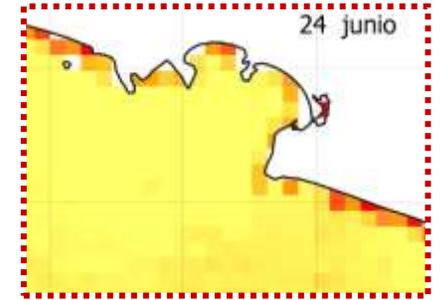
TSM=27.1°C



TSM=26.8°C

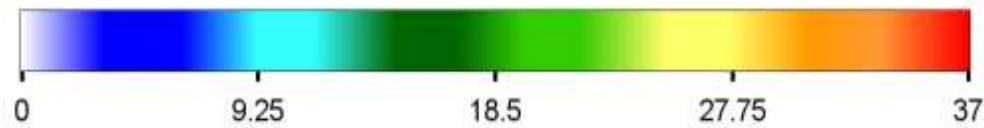


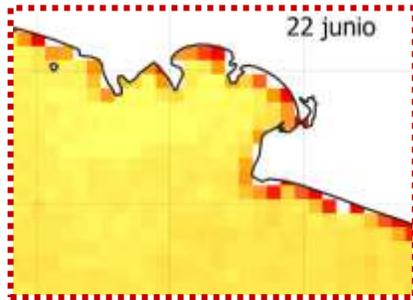
TSM=28.1°C



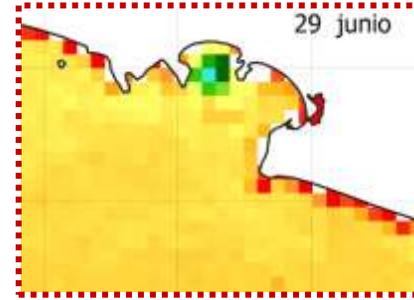
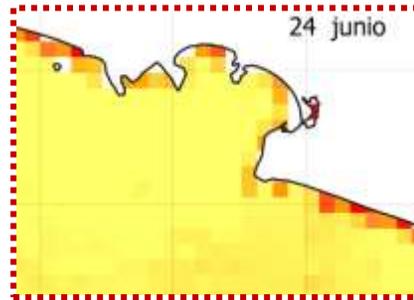
TSM=27.3°C

Temperatura Superficial del Mar (°C)

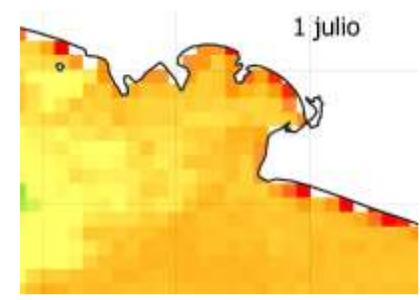




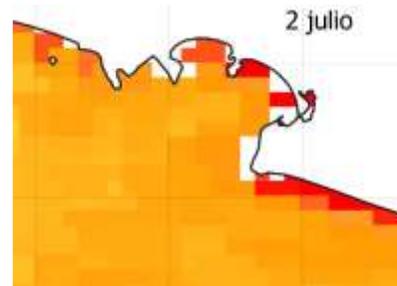
TSM=28.1°C



TSM=28.5°C

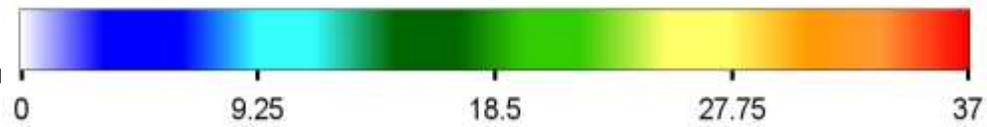


TSM=29.5°C



TSM=30.7°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

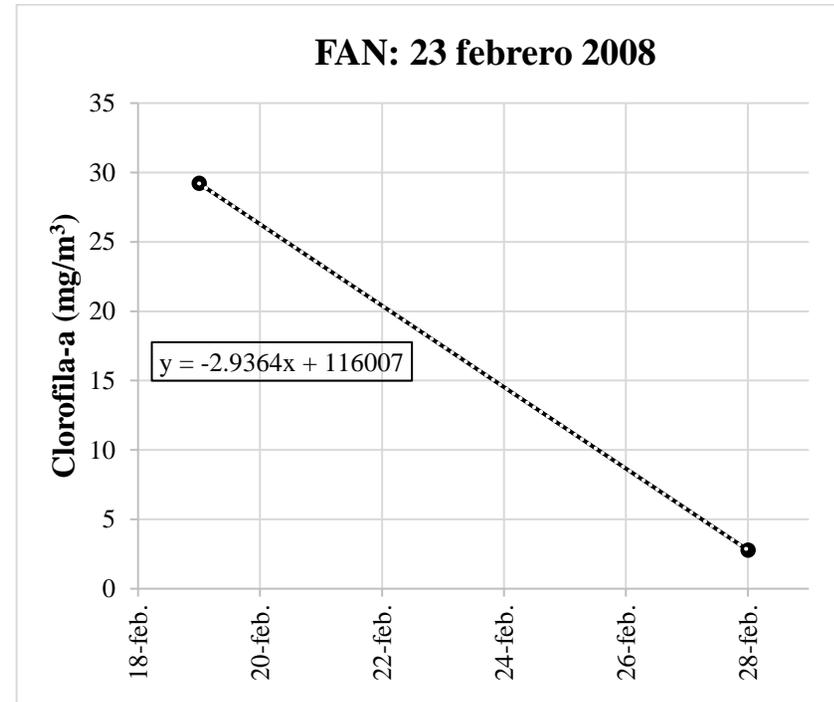
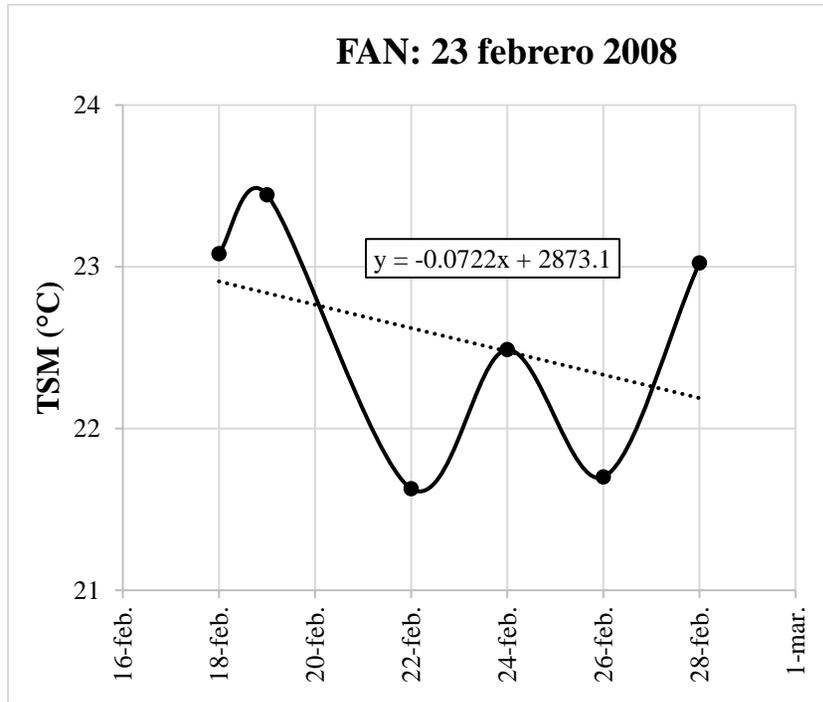


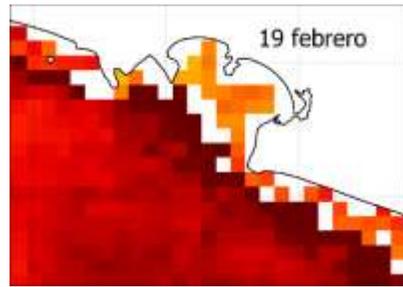
**8.5 FAN ocurrido el 23**

Composición de especies: *Pseudo-nitzschia* sp.

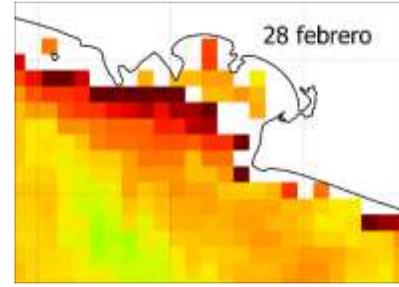
Rango de Cl-a de 1 a 10 días: 26.4 mg/m<sup>3</sup>

Rango de TSM de 1 a 10 días: 1.8°C



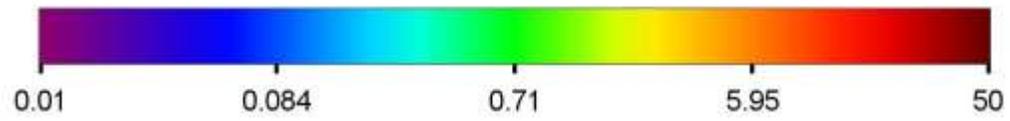


[Cl-a]=29.2 mg/m<sup>3</sup>



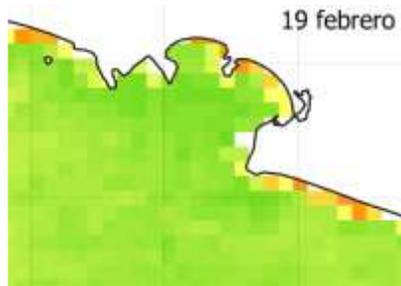
[Cl-a]=2.8 mg/m<sup>3</sup>

Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)





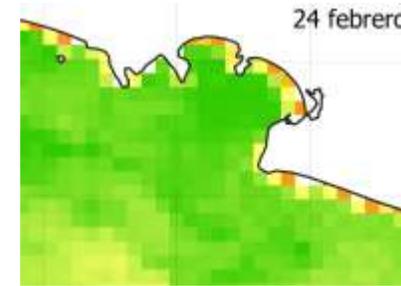
TSM=23.1°C



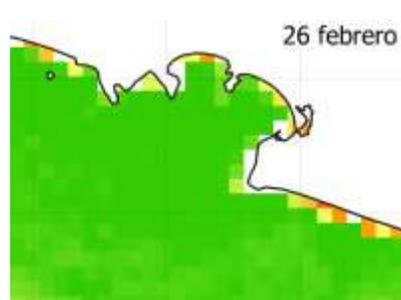
TSM=23.4°C



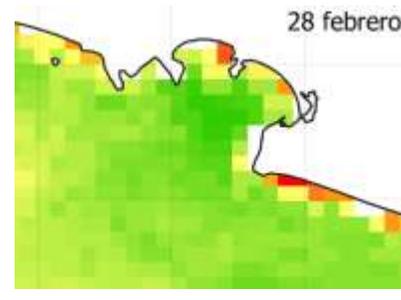
TSM=21.6°C



TSM=22.5°C

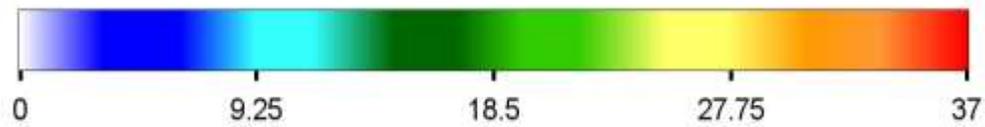


TSM=21.7°C



TSM=23 °C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

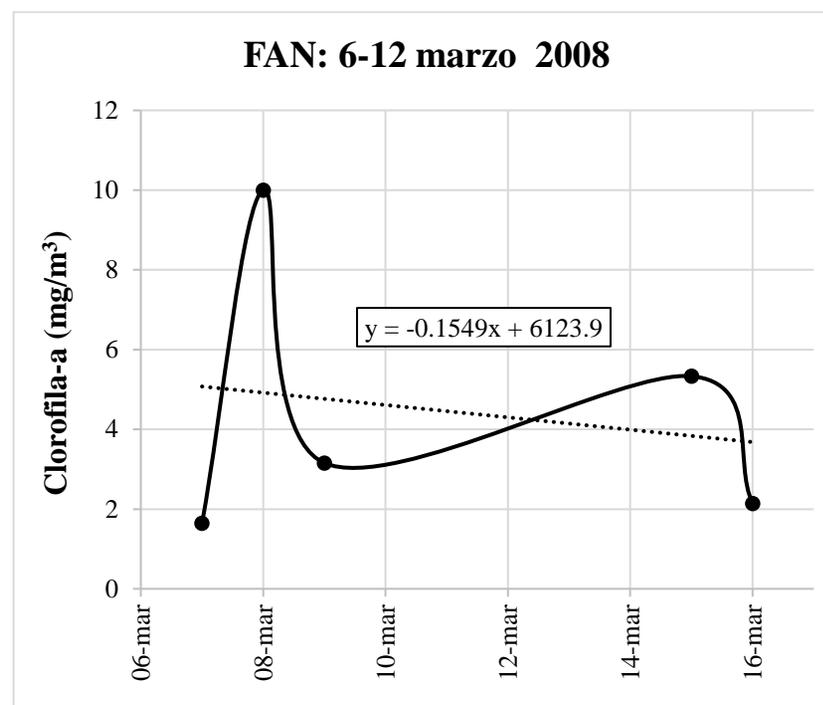
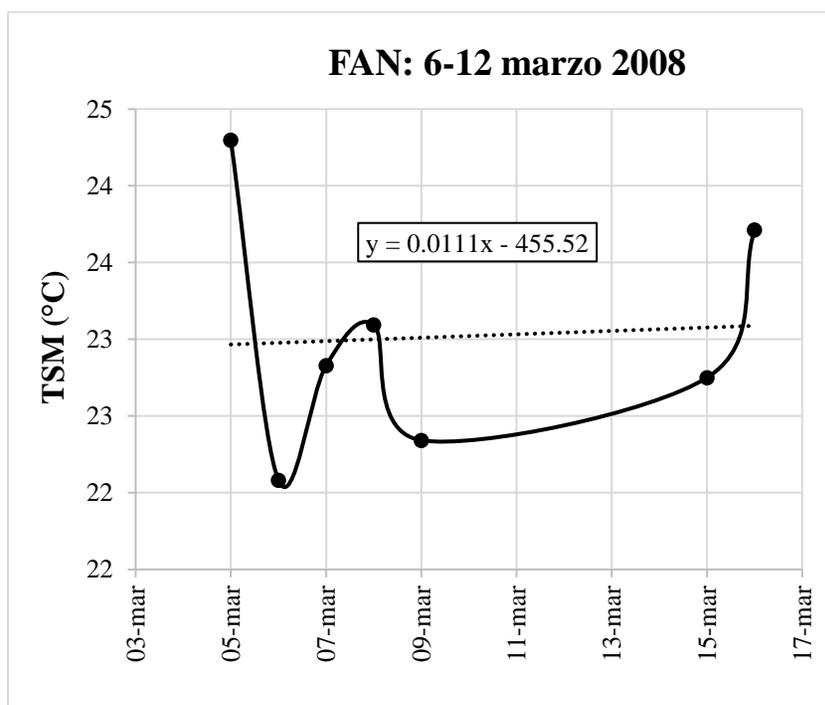


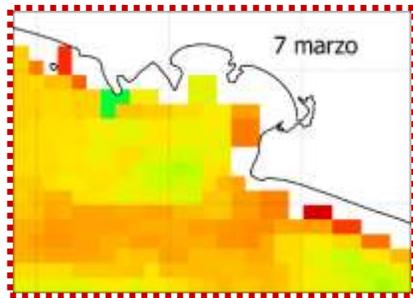
## 8.6 FAN ocurrido del 6 al 12 de marzo de 2008

Composición de especies: *Mesodinium rubrum*

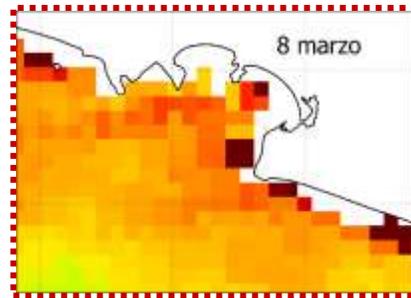
Rango de Cl-a de 1 a 10 días: 8.4 mg/m<sup>3</sup>

Rango de TSM de 1 a 10 días: 2.2°C

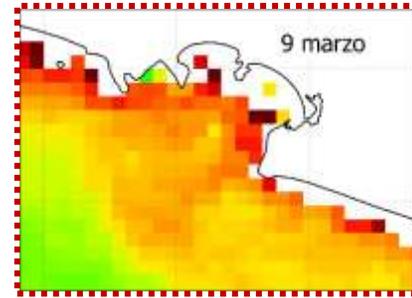




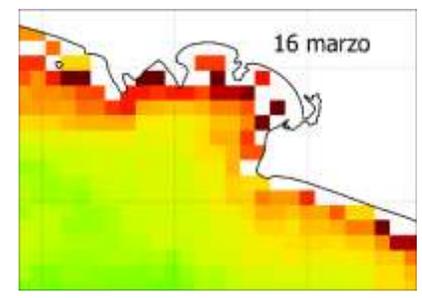
1.6 mg/m<sup>3</sup>



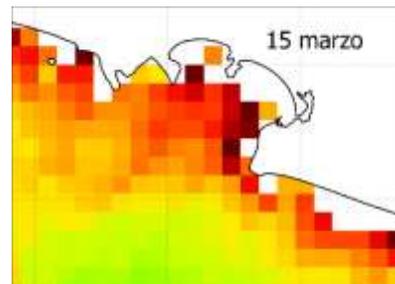
10 mg/m<sup>3</sup>



3.2 mg/m<sup>3</sup>

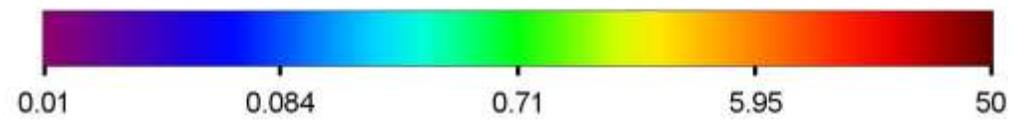


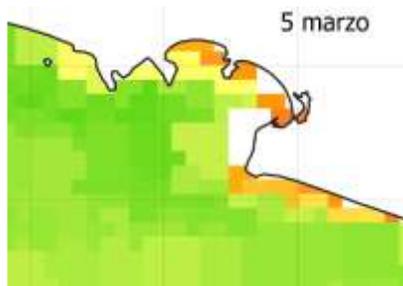
2.1 mg/m<sup>3</sup>



5.3 mg/m<sup>3</sup>

Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)

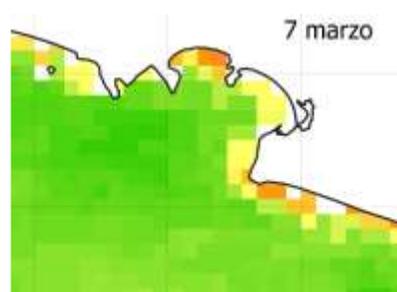




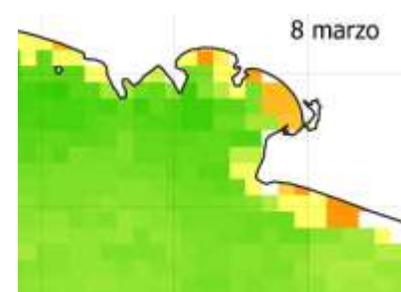
TSM=24.3°C



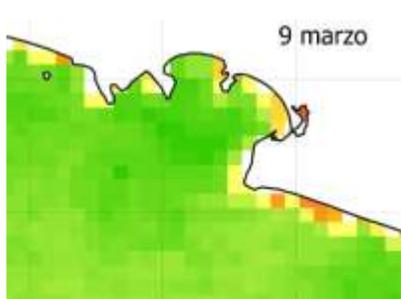
TSM=22.1°C



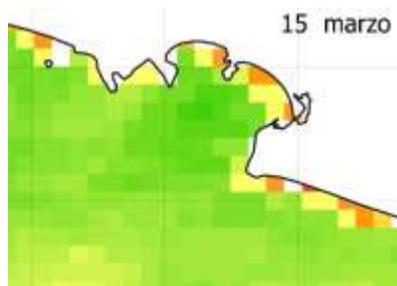
TSM=22.8°C



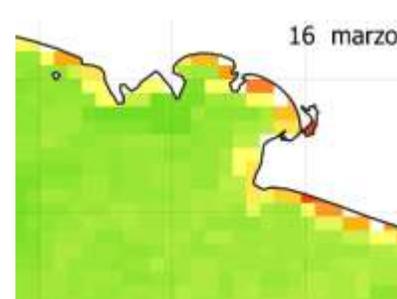
TSM=23.1°C



TSM=22.3°C

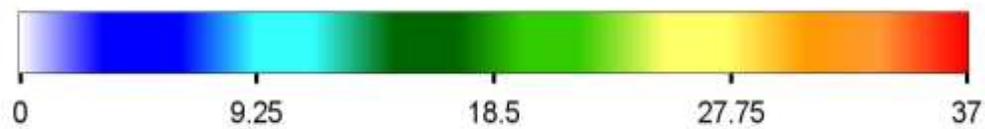


TSM=22.8°C



TSM=23.7°C

Temperatura Superficial del Mar (°C)

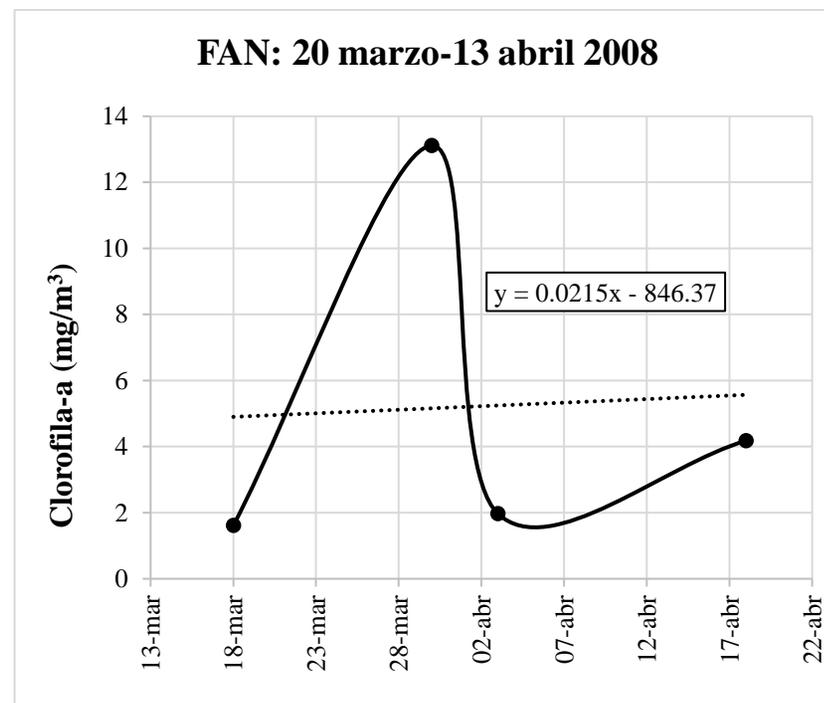
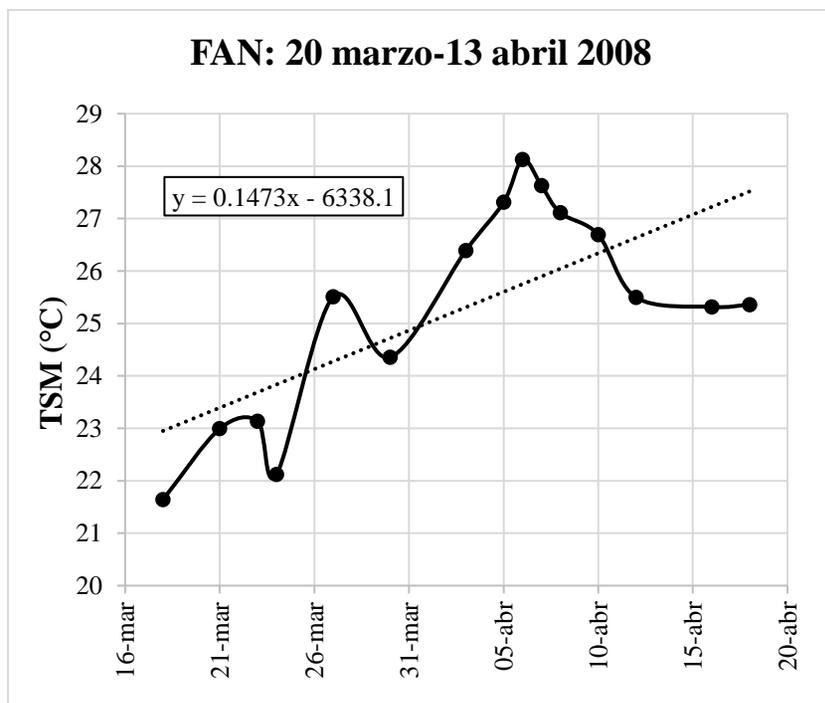


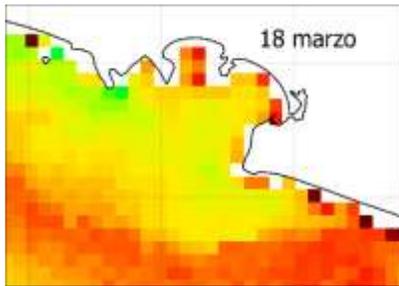
## 8.7 FAN ocurrido del 20 marzo 13 abril 2008

**Composición de especies:** *Karenia mikimotoi*, *Karlodinium* sp., *Polykrikos hartmannii*, *Dinophysis caudata*, *Margalefidinium polykrikoides*, *Levanderina fissa* (*Gyrodinium instriatum*), *Akashiwo sanguinea* y *Prorocentrum micans*

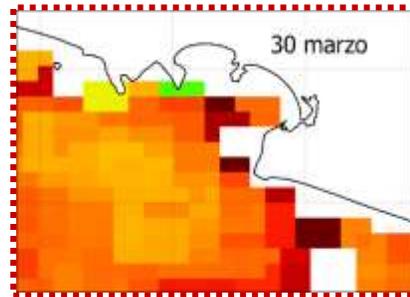
**Rango de Cl-a de 1 a 10 días:** 11.1 mg/m<sup>3</sup>

**Rango de TSM de 1 a 10 días:** 6.5 °C

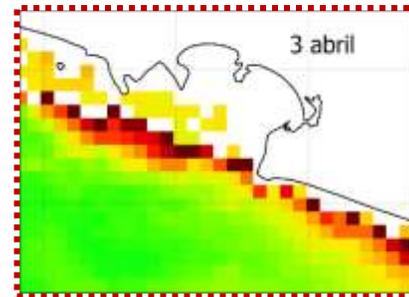




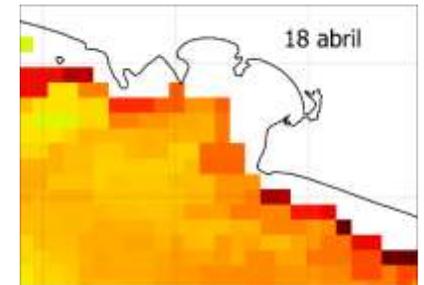
1.6 mg/m<sup>3</sup>



13.1 mg/m<sup>3</sup>

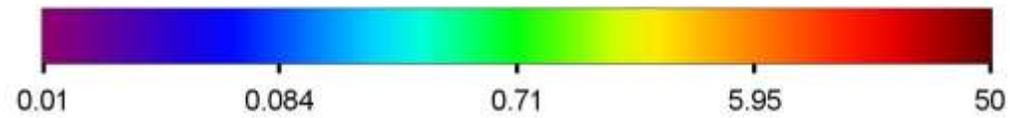


2 mg/m<sup>3</sup>



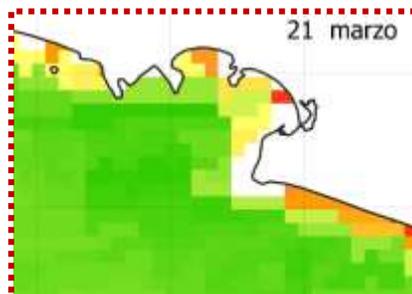
4.2 mg/m<sup>3</sup>

Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)

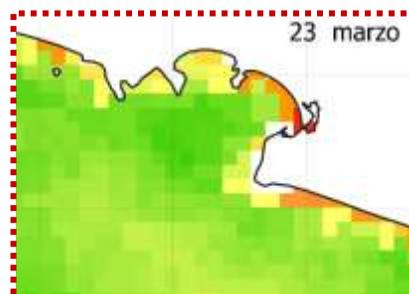




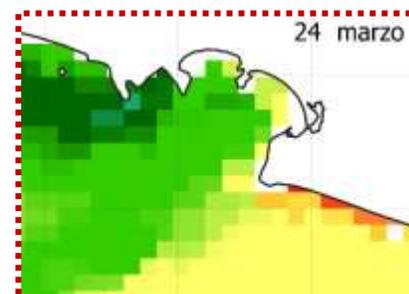
TSM=21.6°C



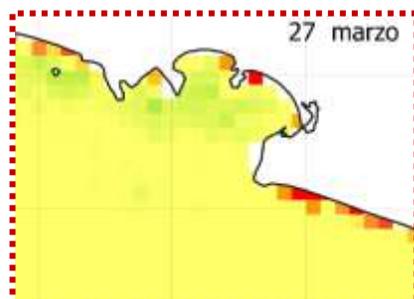
TSM=23°C



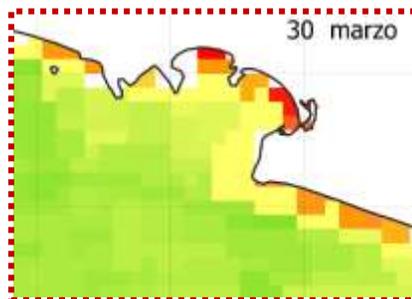
TSM=23.1°C



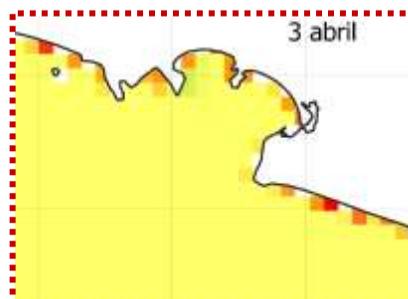
TSM=22.1°C



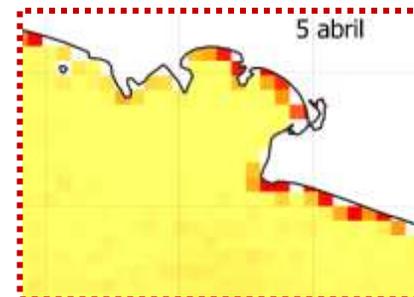
TSM=25.5°C



TSM=24.4°C

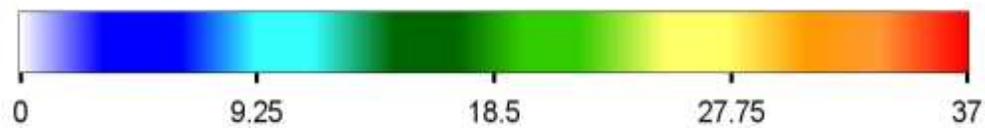


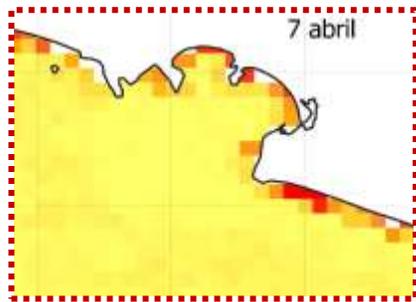
TSM=26.4°C



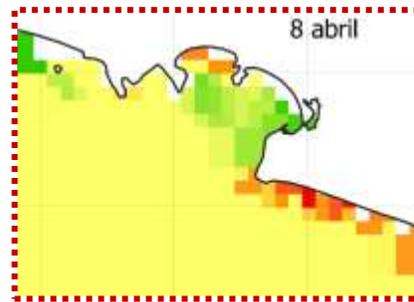
TSM=27.3°C

Temperatura Superficial del Mar (°C)

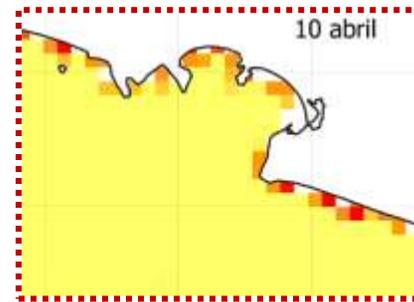




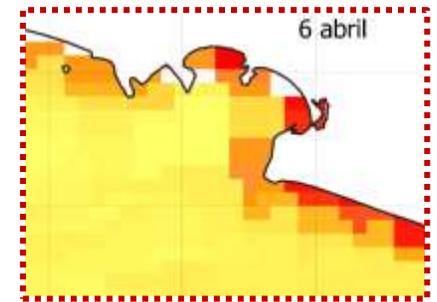
TSM=27.6°C



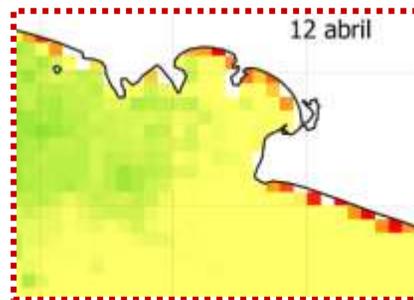
TSM=27.1°C



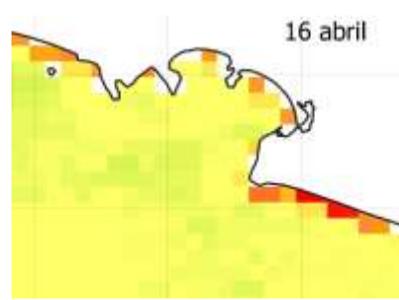
TSM=26.7°C



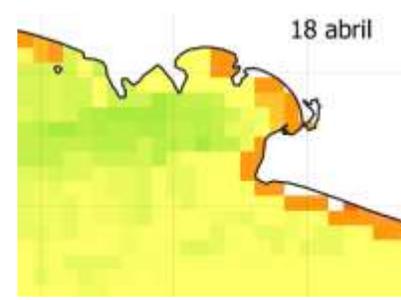
TSM=28.1°C



TSM=25.5°C

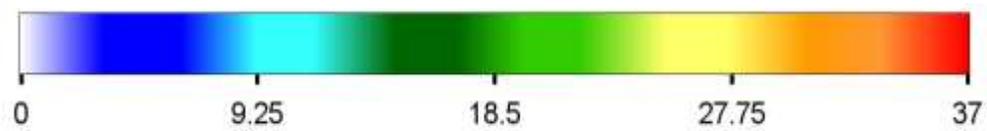


TSM=25.3°C



TSM=25.4°C

Temperatura Superficial del Mar (°C)

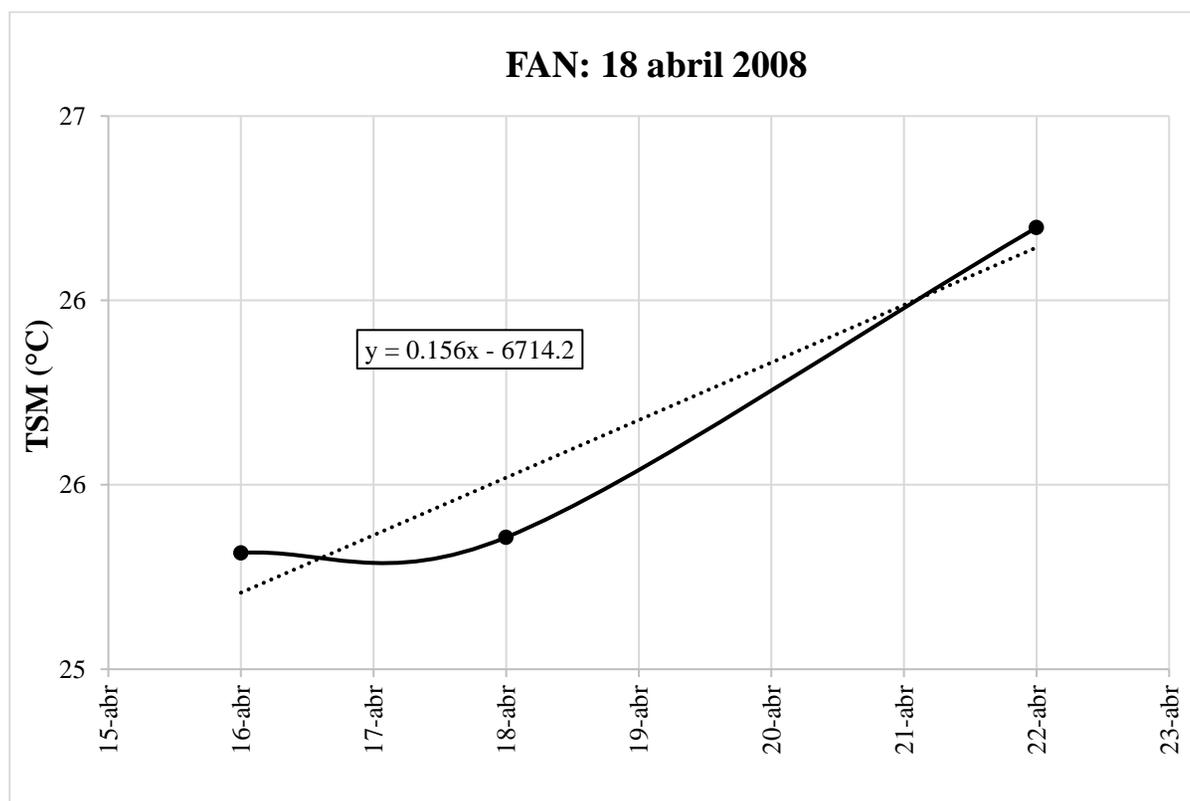


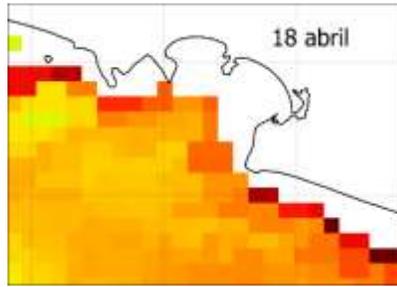
## 8.8 FAN ocurrido el 18 de abril 2008

Composición de especies: *Pseudo-nitzschia* sp.

Rango de CI-a de 1 a 10 días: **No hay datos suficientes**

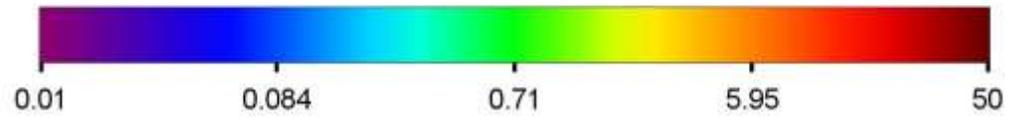
Rango de TSM de 1 a 10 días: 0.9°C

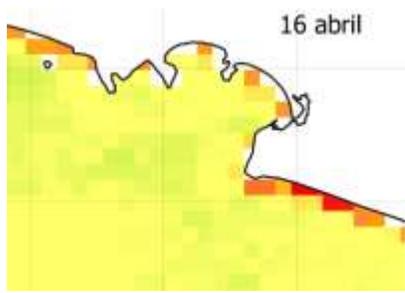




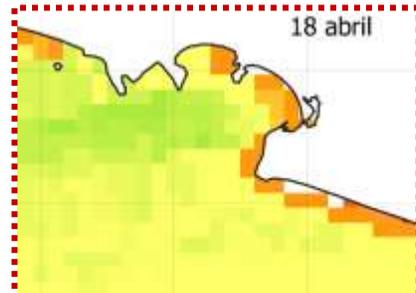
4.2 mg/m<sup>3</sup>

**Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)**

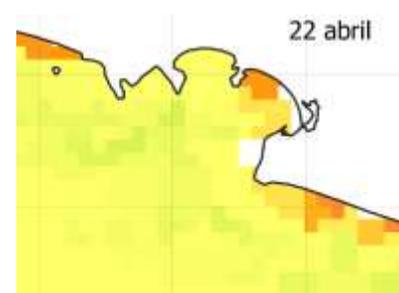




TSM=25.3°C

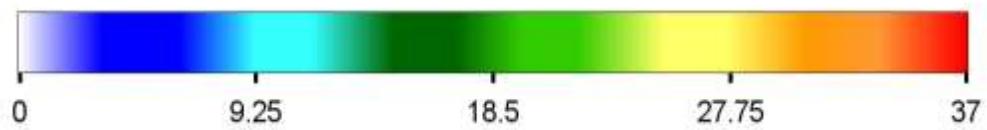


TSM=25.4°C



TSM=26.2°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

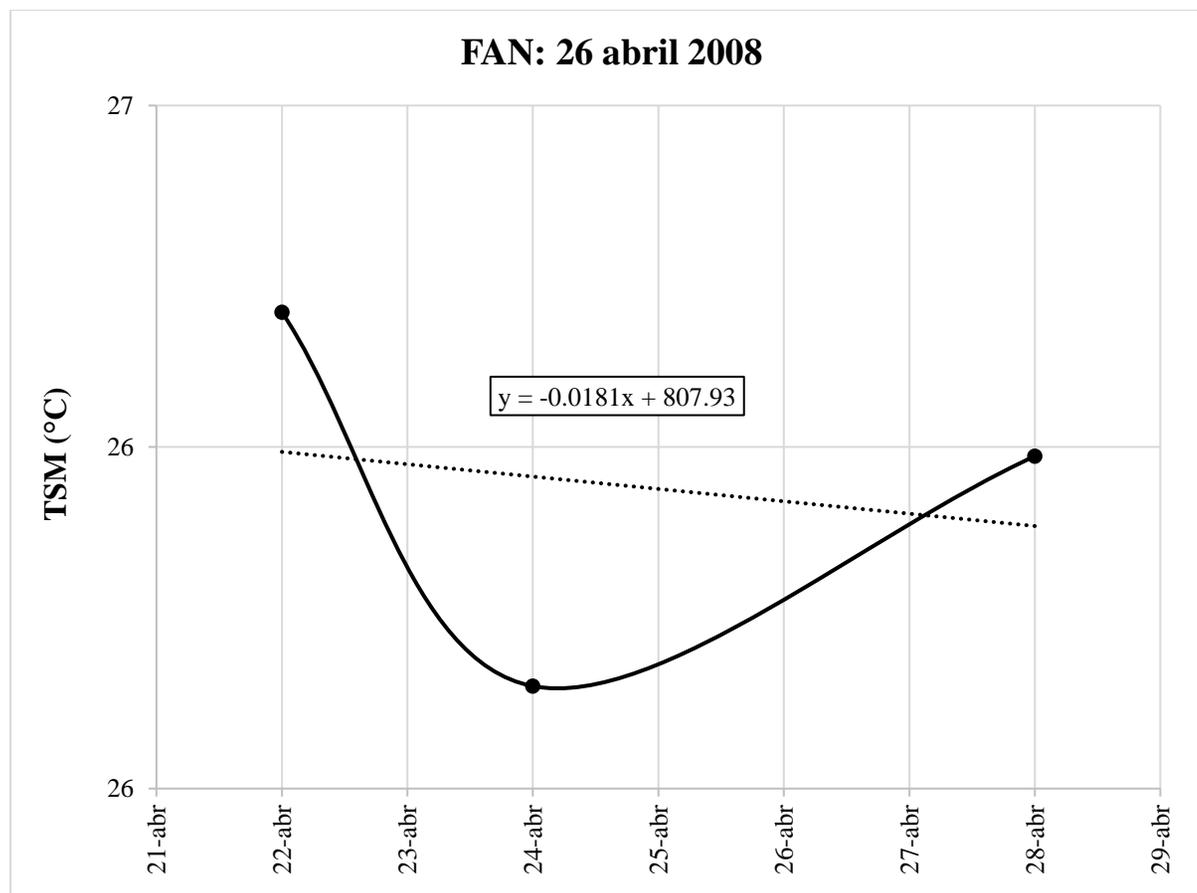


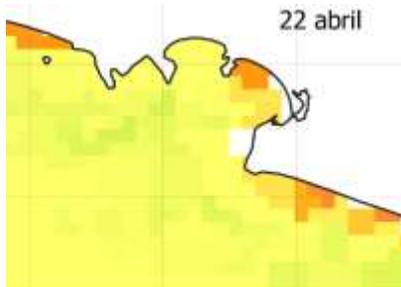
## 8.9 FAN ocurrido el 26 de abril 2008

Composición de especies: *Polykrikos hartmannii*, *Akashiwo sanguínea* y *Levanderina fissa* (*Gyrodinium instriatum*)

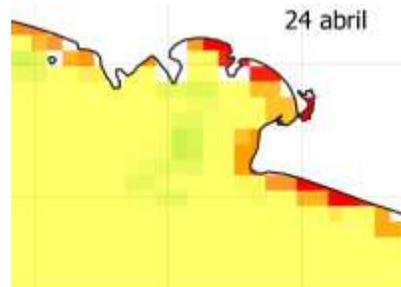
Rango de CI-a de 1 a 10 días: Sin imágenes disponibles

Rango de TSM de 1 a 10 días: 0.1°C

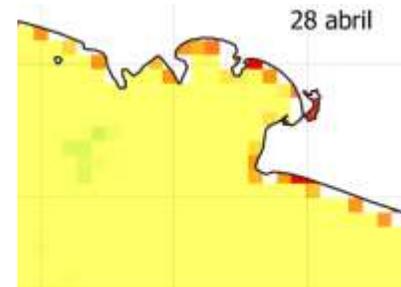




TSM=26.2°C

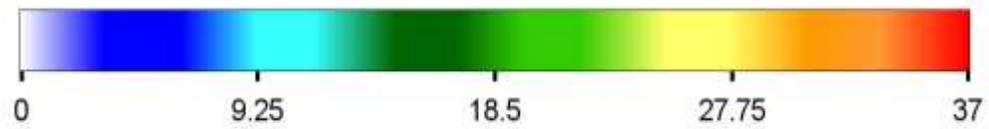


TSM=25.7°C



TSM=26°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

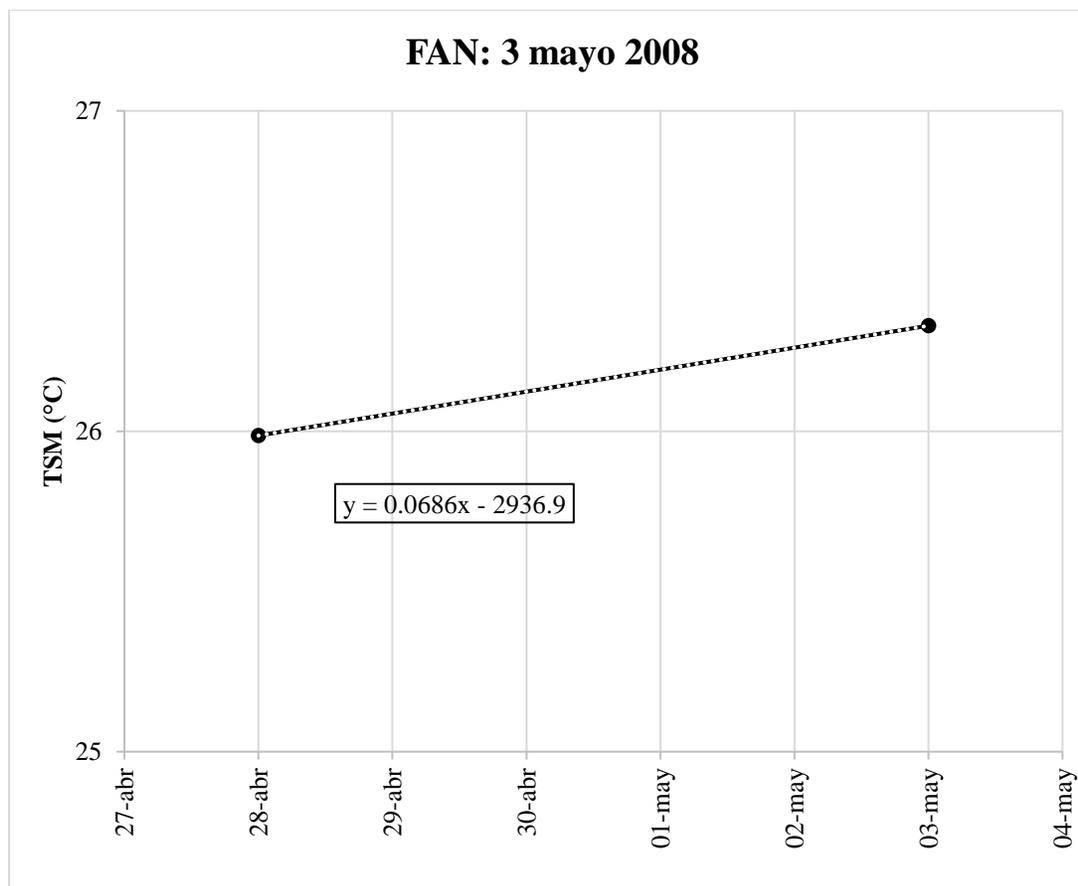


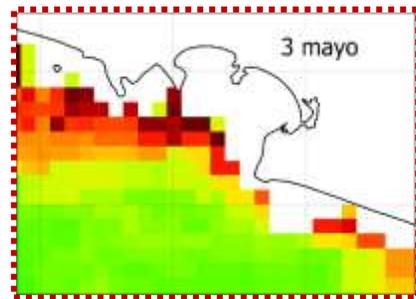
### 8.10 FAN ocurrido el: 3 de mayo de 2008

Composición de especies: *Karlodinium* sp., *Polykrikos hartmannii* y *Akashiwo sanguinea*

Rango de CI-a de 1 a 10 días: No hay datos suficientes

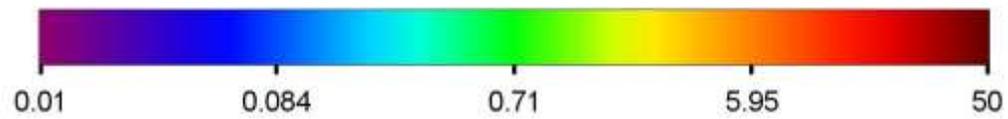
Rango de TSM de 1 a 10 días: 0.3°C

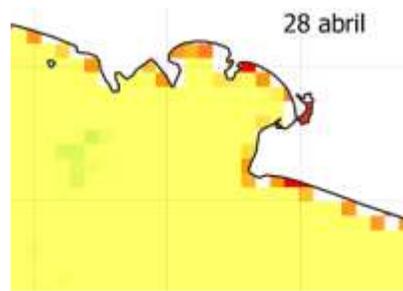




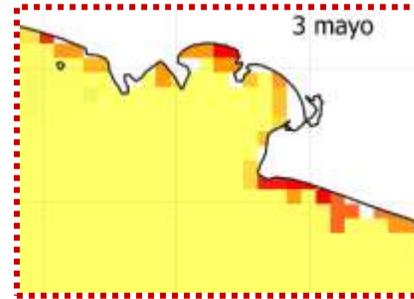
11.5 mg/m<sup>3</sup>

Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)



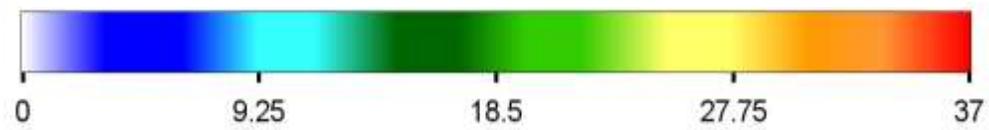


TSM=26°C



TSM=26.3°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

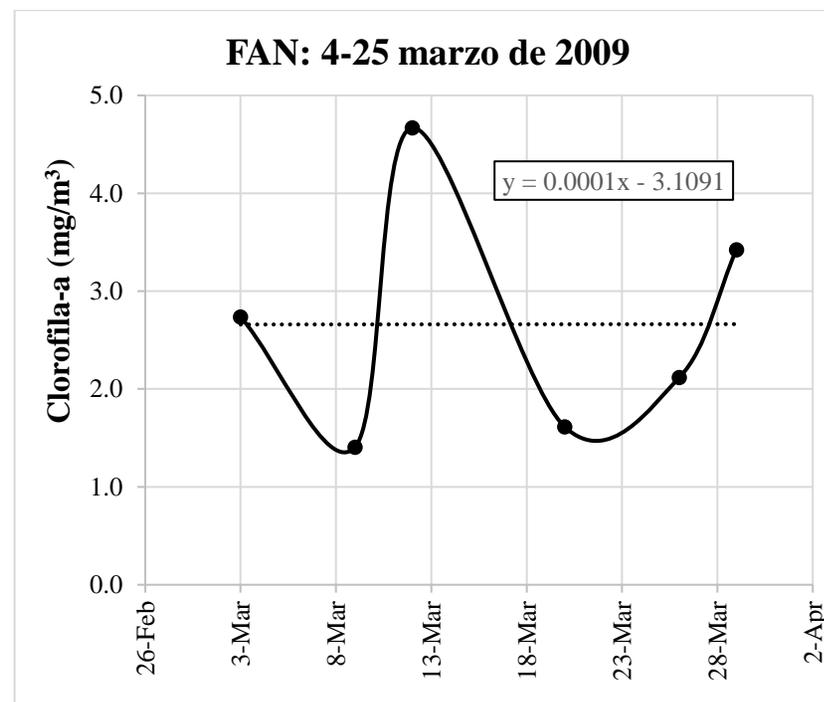
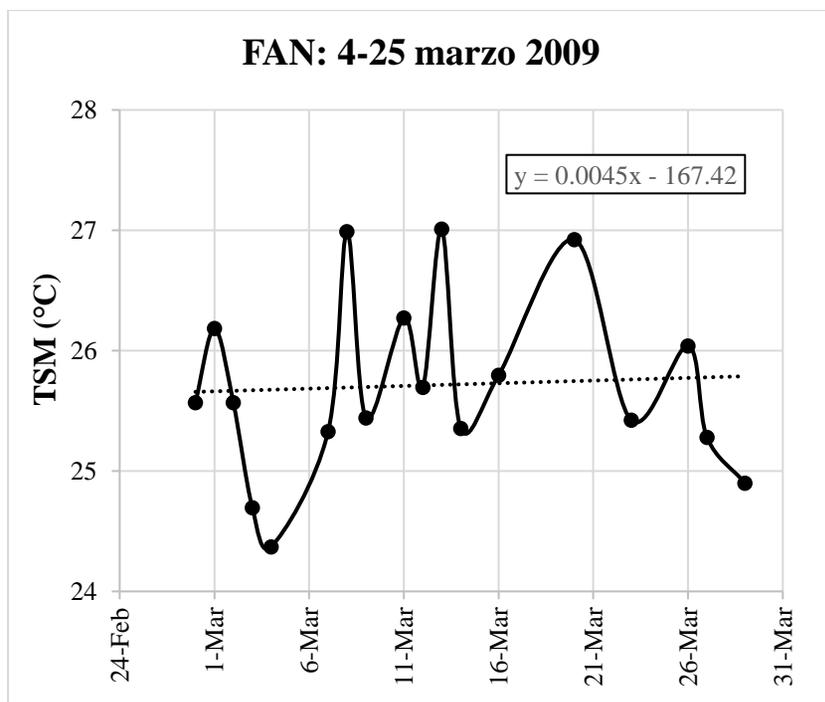


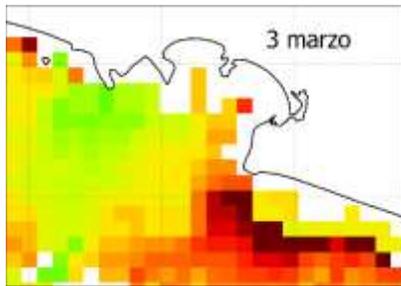
### 8.11 FAN ocurrido del 4 al 25 de marzo de 2009

Composición de especies: *Dinophysis caudata*, *Mesodinium rubrum* y *Levanderina fissa* (*Gyrodinium instriatum*)

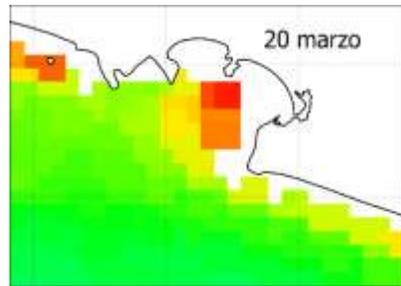
Rango de Cl-a de 1 a 10 días: 3.3 mg/m<sup>3</sup>

Rango de TSM de 1 a 10 días: 2.6°C

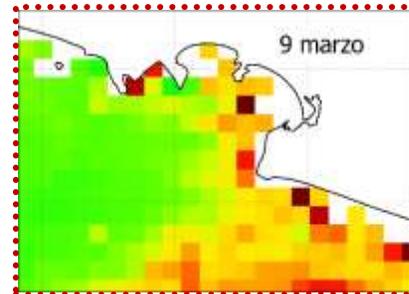




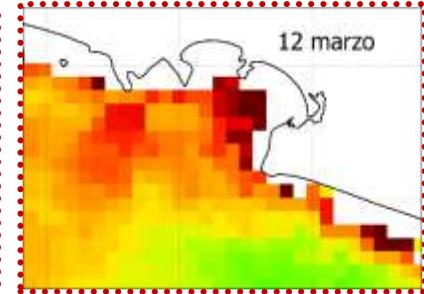
[Cl-a]=2.7 mg/m<sup>3</sup>



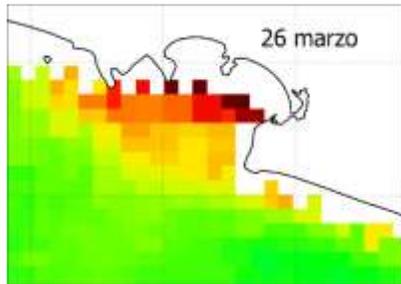
[Cl-a]=1.4 mg/m<sup>3</sup>



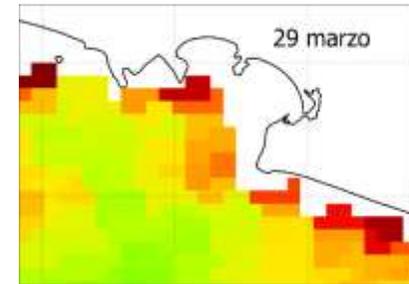
[Cl-a]=4.7 mg/m<sup>3</sup>



[Cl-a]=1.6 mg/m<sup>3</sup>

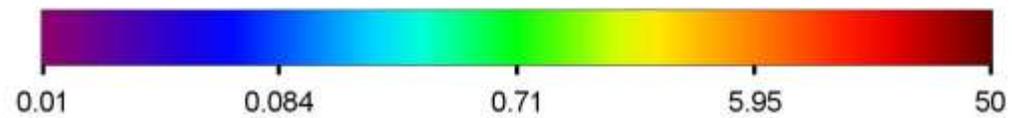


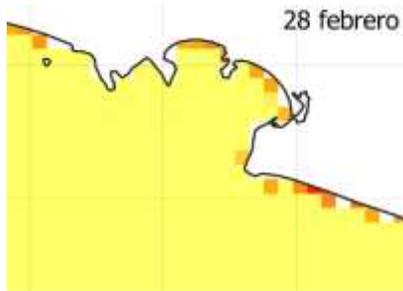
[Cl-a]=2.1 mg/m<sup>3</sup>



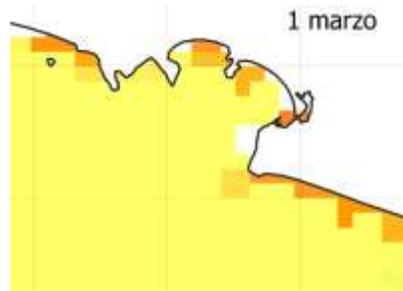
[Cl-a]=3.4 mg/m<sup>3</sup>

Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)

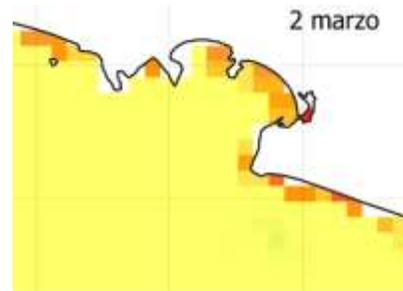




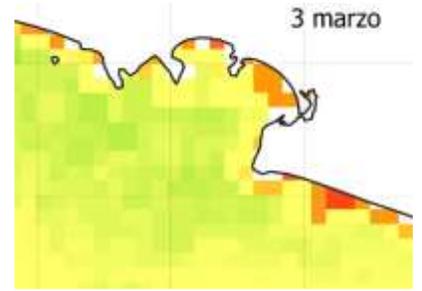
TSM=25.6°C



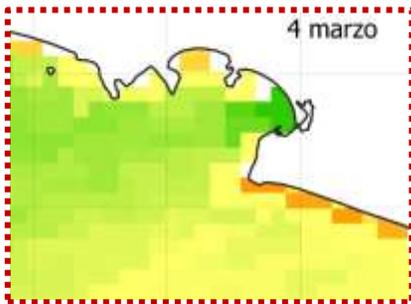
TSM=26.2°C



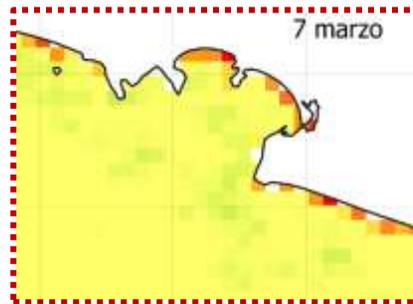
TSM=25.6°C



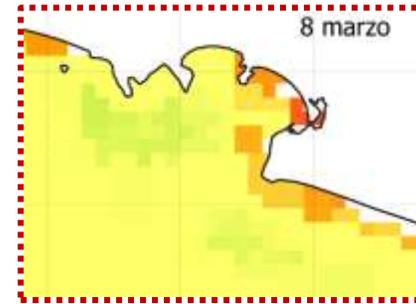
TSM=24.7°C



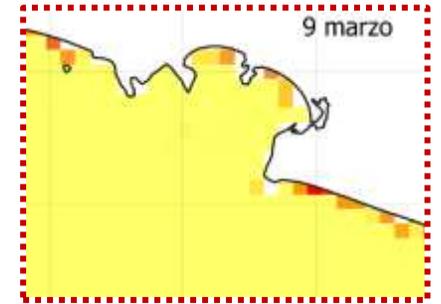
TSM=24.4°C



TSM=25.3°C

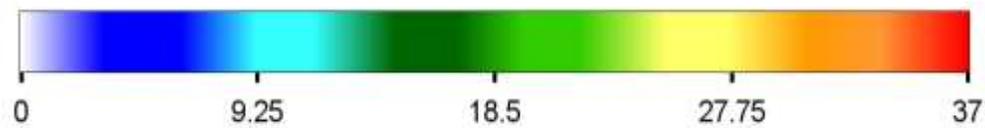


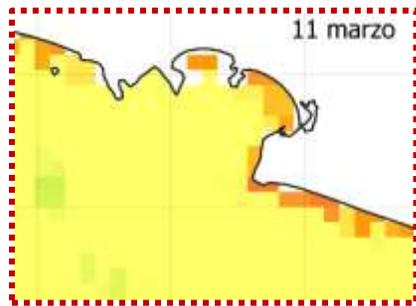
TSM=27°C



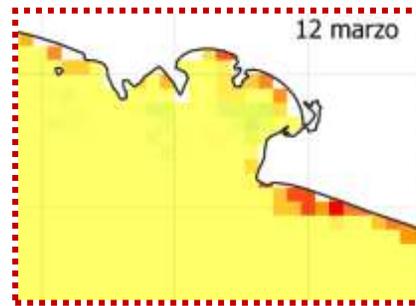
TSM=25.4°C

Temperatura Superficial del Mar (°C)





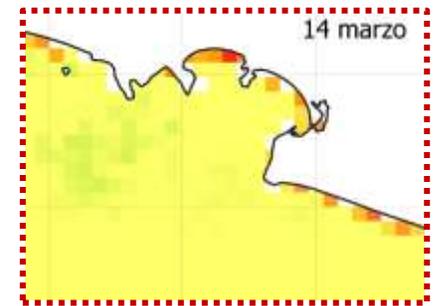
TSM=26.3°C



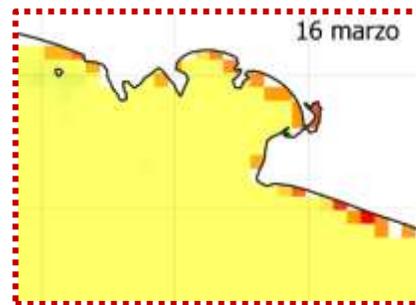
TSM=24.7°C



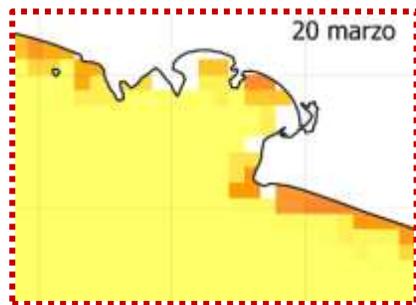
TSM=27°C



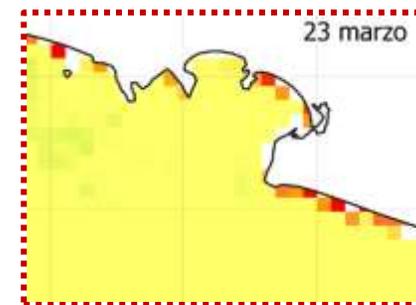
TSM=25.4°C



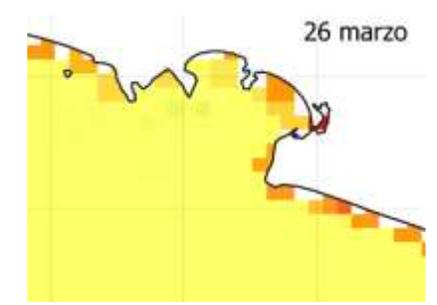
TSM=25.8°C



TSM=26.9°C

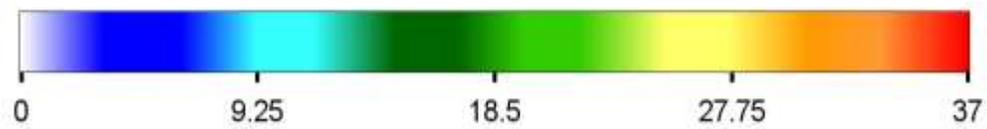


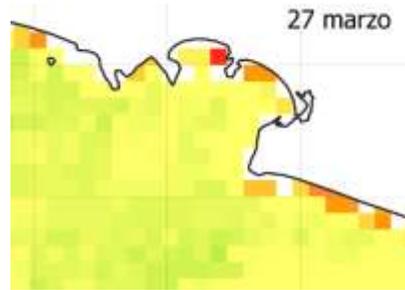
TSM=25.4°C



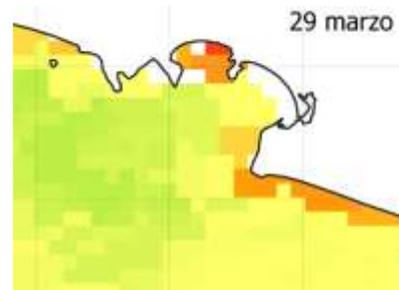
TSM=26°C

Temperatura Superficial del Mar (°C)



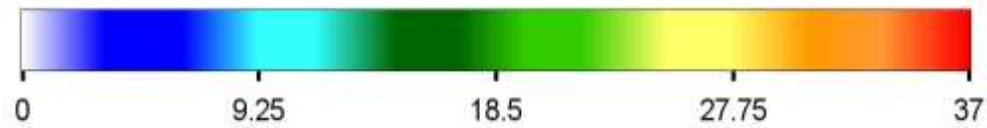


TSM=25.3°C



TSM=24.9°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

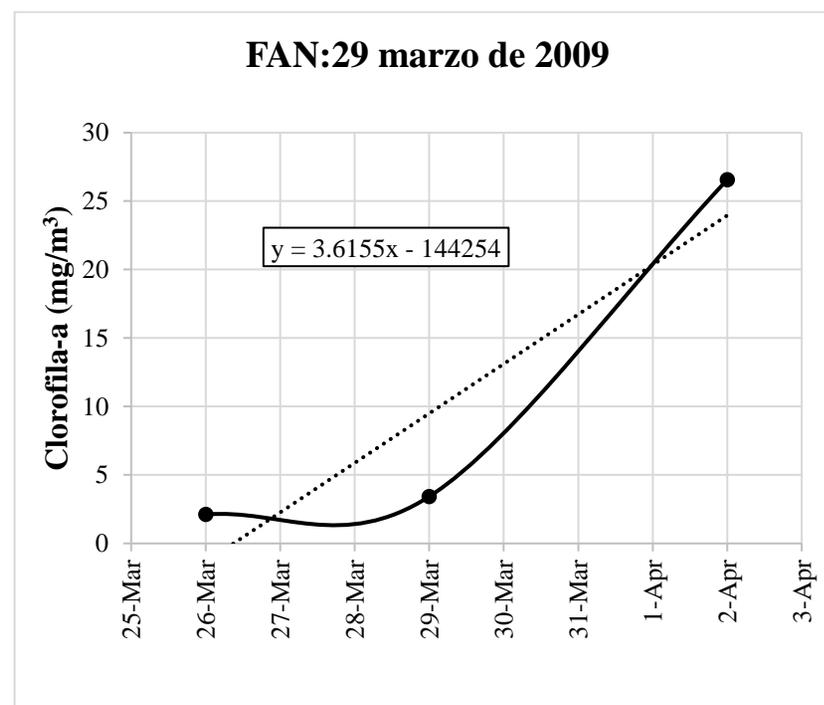
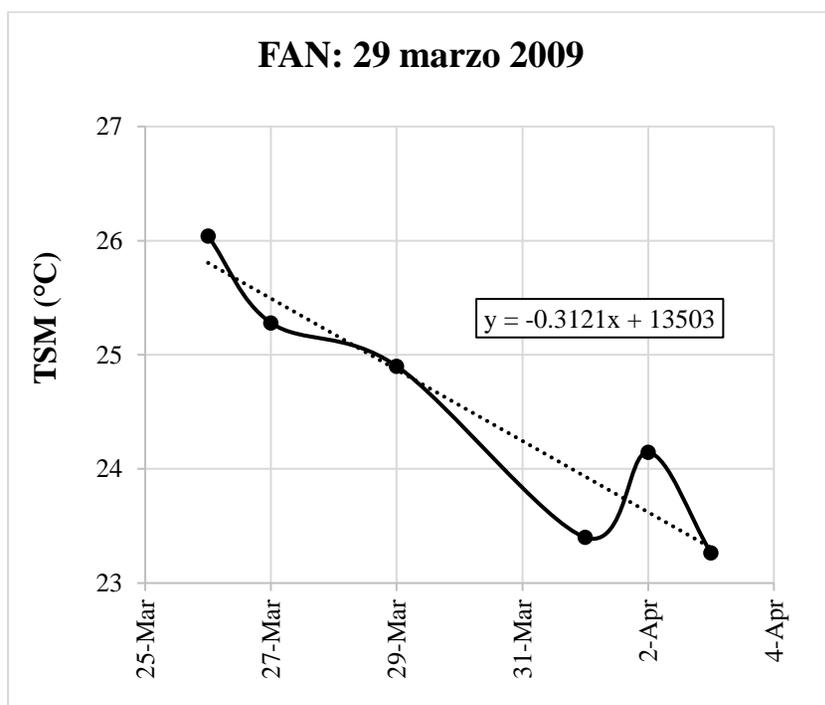


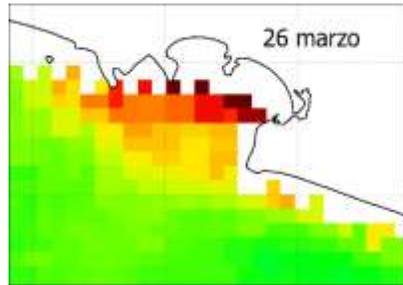
## 8.12 FAN ocurrido el 29 de marzo de 2009

Composición de especies: *Gymnodinium catenatum*

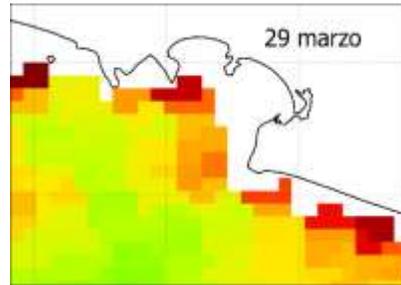
Rango de Cl-a de 1 a 10 días: 24.4 mg/m<sup>3</sup>

Rango de TSM de 1 a 10 días: 2.8°C

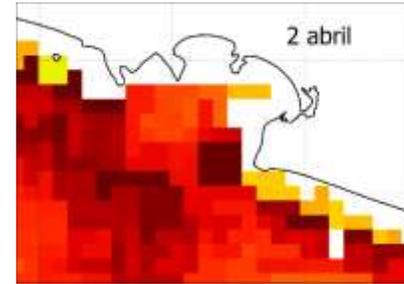




2.1 mg/m<sup>3</sup>

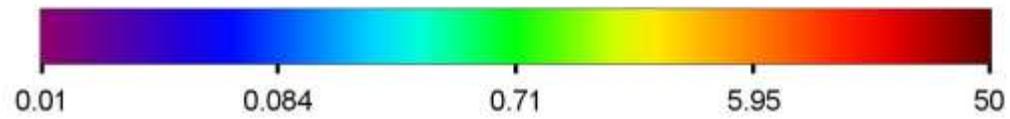


3.4 mg/m<sup>3</sup>



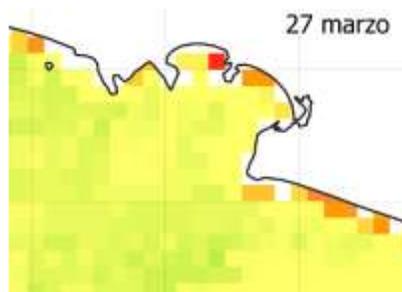
26.6 mg/m<sup>3</sup>

**Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)**

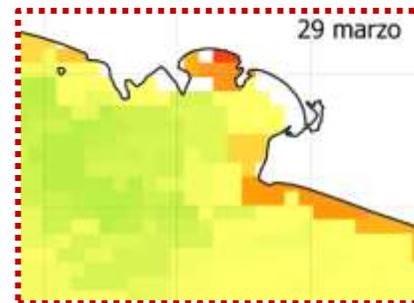




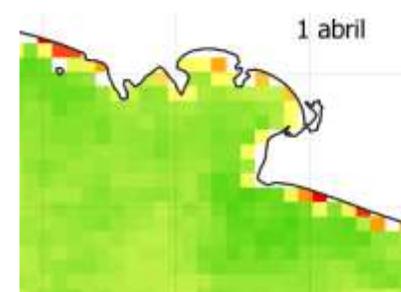
TSM=26°C



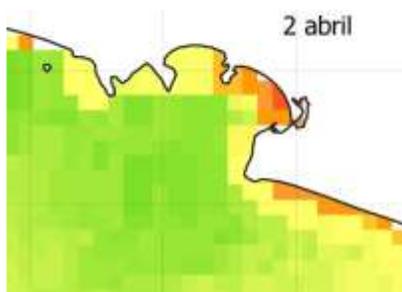
TSM=25.3°C



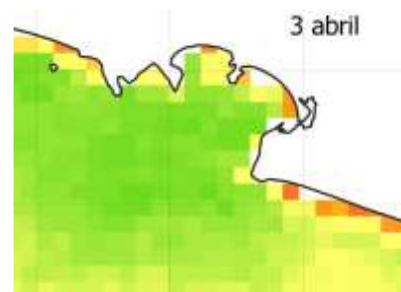
TSM=24.9°C



TSM=23.4°C

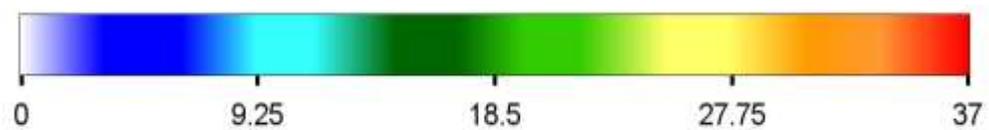


TSM=24.1°C



TSM=23.3°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

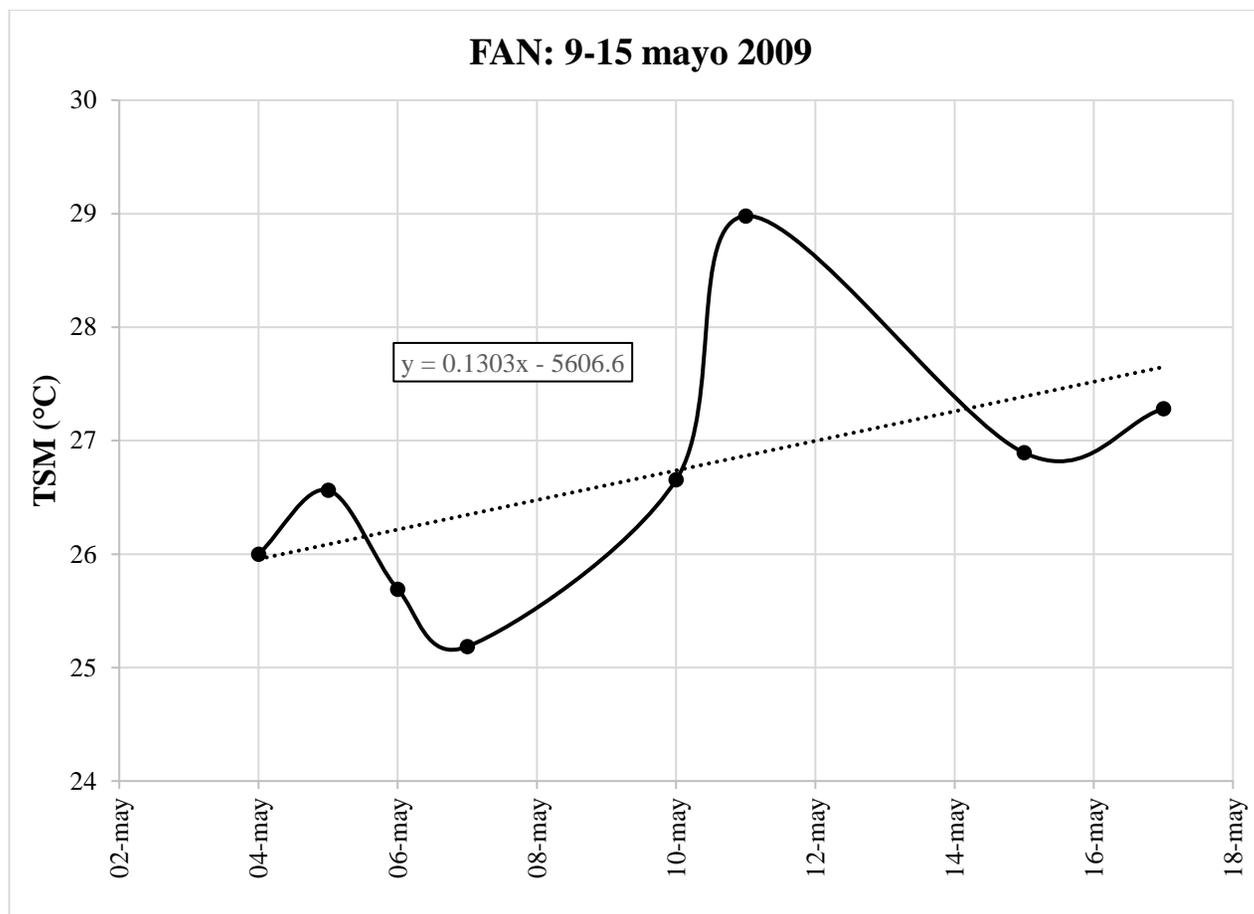


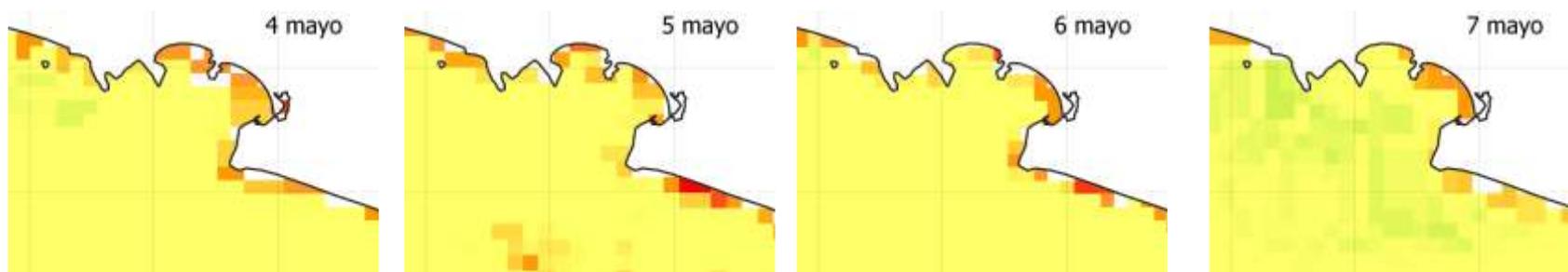
### 8.13 FAN ocurrido del 9 al 15 de mayo de 2009

Composición de especies: *Polykrikos hartmannii*, *Prorocentrum micans* y *Polykrikos schwartzii*

Rango de CI-a de 1 a 10 días: Sin imágenes disponibles

Rango de TSM de 1 a 10 días: 3.8°C



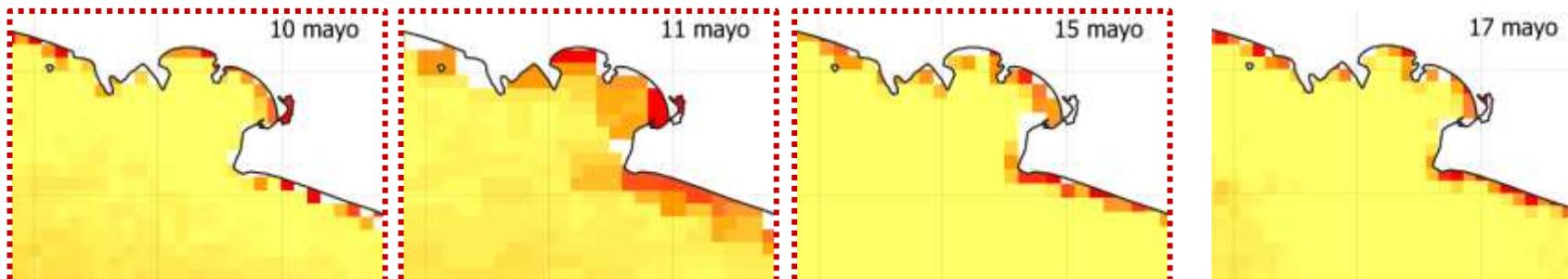


TSM=26°C

TSM=26.6°C TSM=27.3°C

TSM=25.7°C

TSM=25.2°C



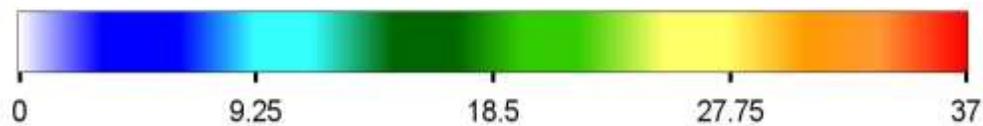
TSM=26.7°C

TSM=29°C

TSM=26.9°C

TSM=27.3°C

Temperatura Superficial del Mar (°C)

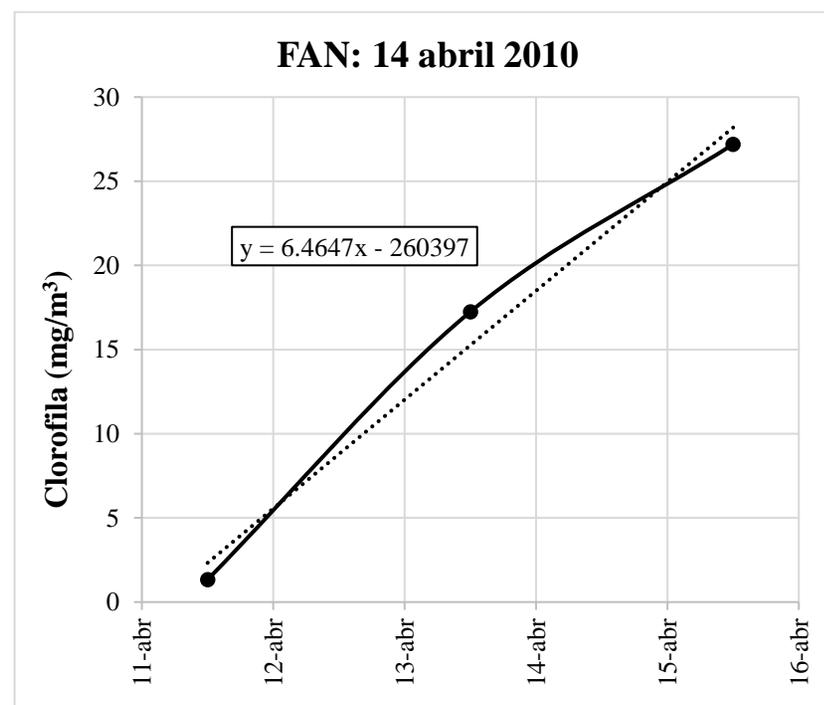
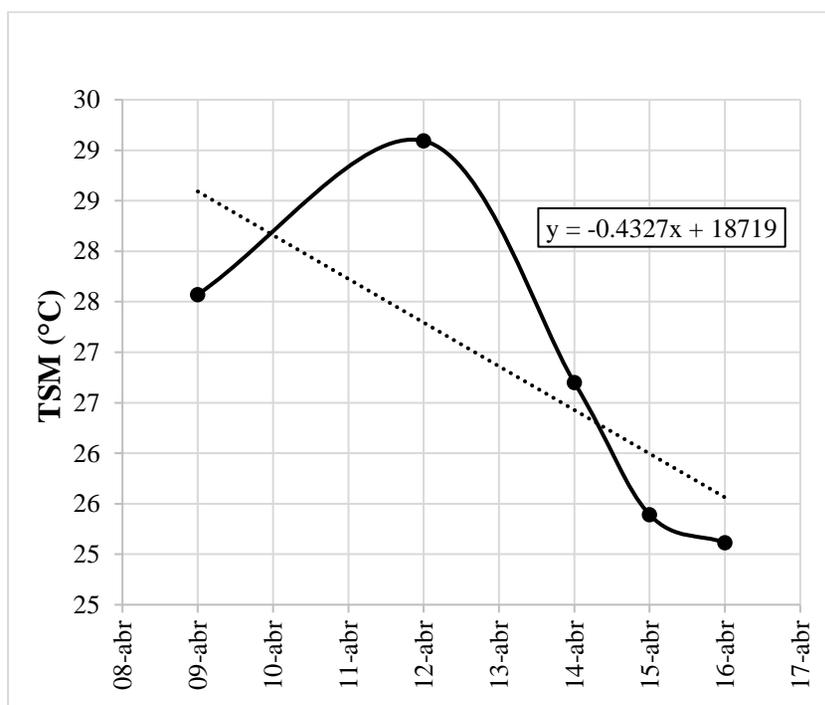


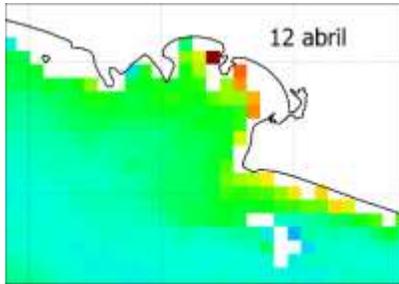
## 8.14 FAN ocurrido el 14 de abril de 2010

Composición de especies: *Mesodinium rubrum* y *Peridinium quadridentatum* (*Peridinium quinquecorne*)

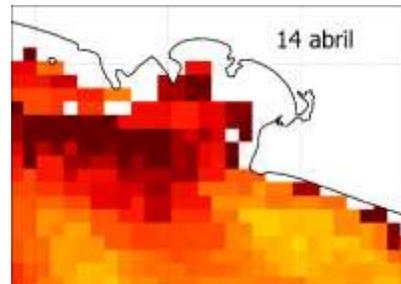
Rango de Cl-a de 1 a 10 días: 25.9 mg/m<sup>3</sup>

Rango de TSM de 1 a 10 días: 4°C

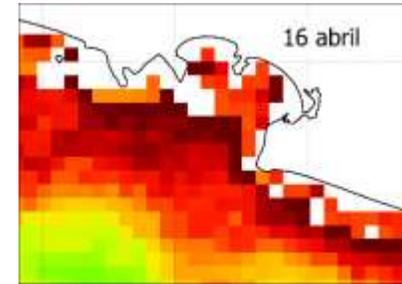




1.3 mg/m<sup>3</sup>

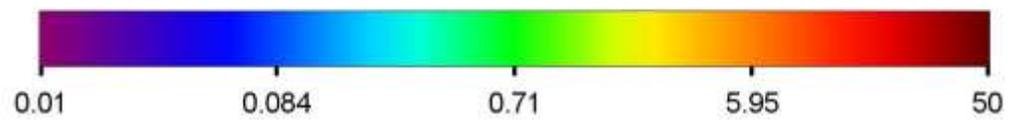


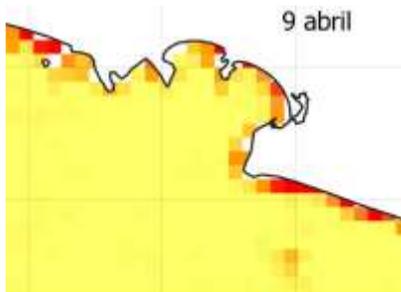
17.2 mg/m<sup>3</sup>



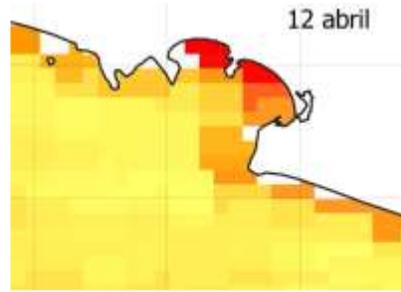
27.2 mg/m<sup>3</sup>

**Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)**

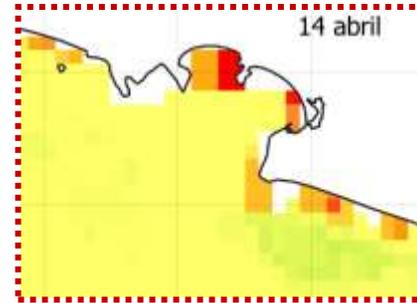




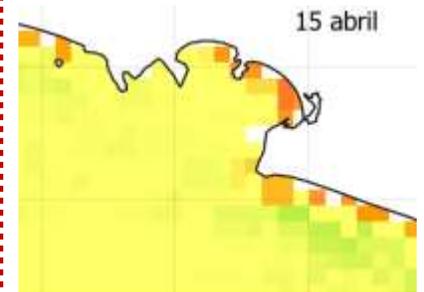
TSM=27.6°C



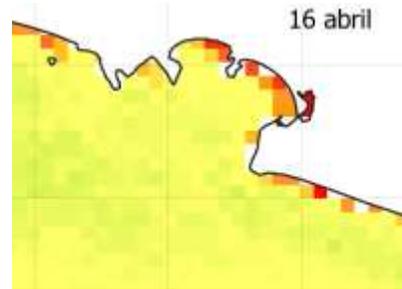
TSM=29.1°C



TSM=26.7°C

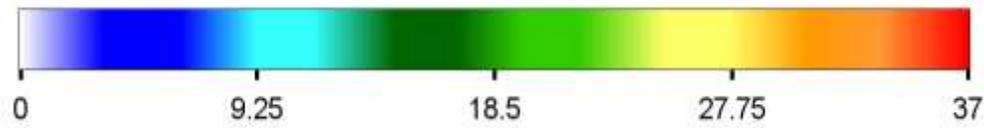


TSM=25.4°C



TSM=25.1°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

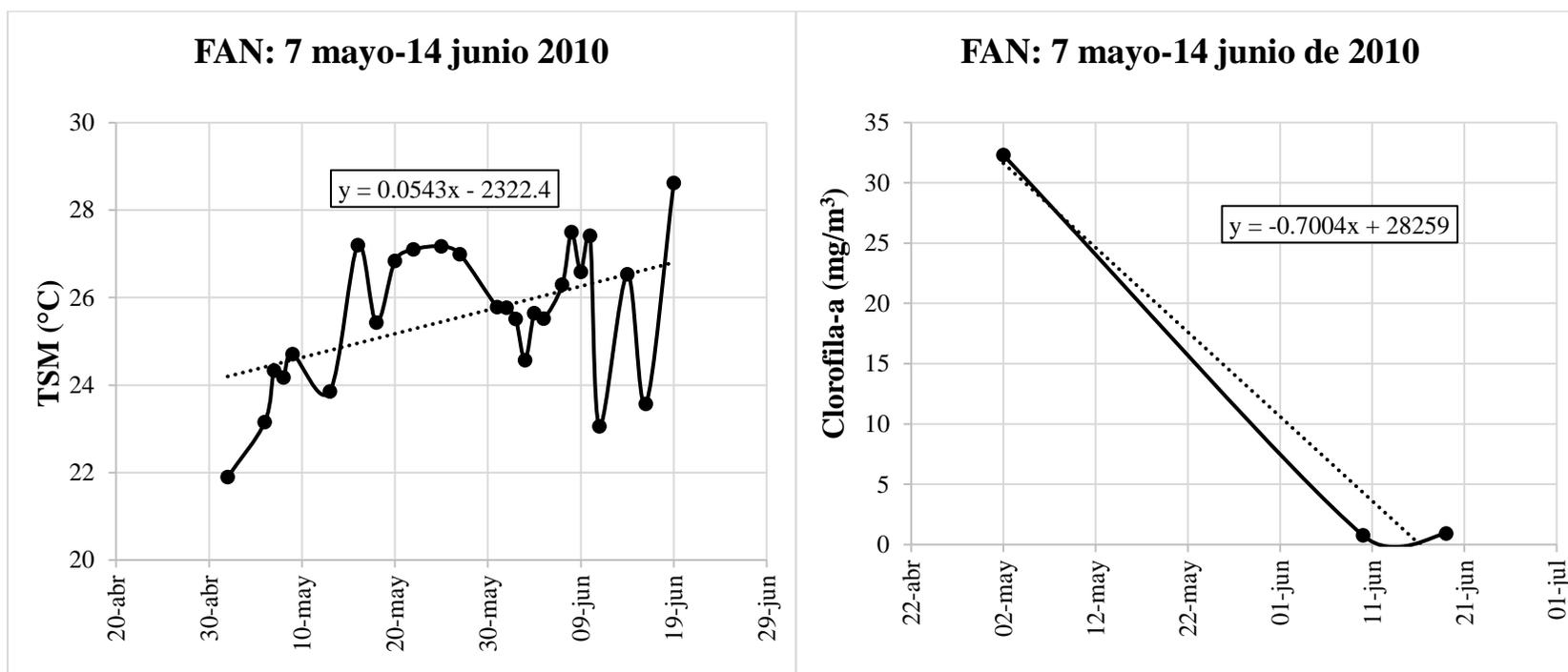


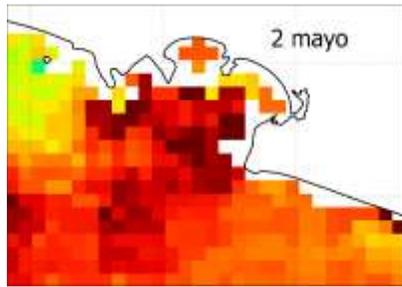
### 8.15 FAN ocurrido del: 7 mayo al 14 de junio de 2010

Composición de especies: *Gymnodinium catenatum*, Levanderina fissa (*Gyrodinium instriatum*), *Prorocentrum micans*, *Tripos furca* (*Ceratium furca*) y *Dinophysis* sp.

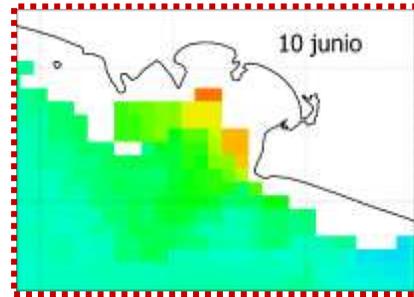
Rango de Cl-a de 1 a 10 días: 0.2 mg/m<sup>3</sup>

Rango de TSM de 1 a 10 días: 6.7°C

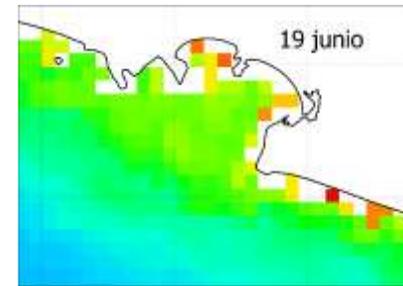




32.3 mg/m<sup>3</sup>

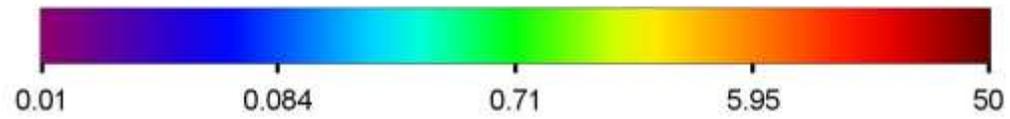


0.8 g/m<sup>3</sup>



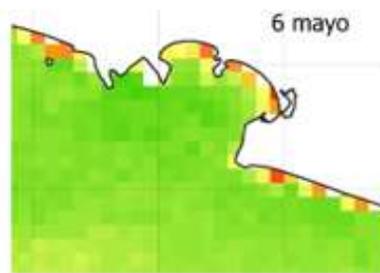
0.9 mg/m<sup>3</sup>

Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)

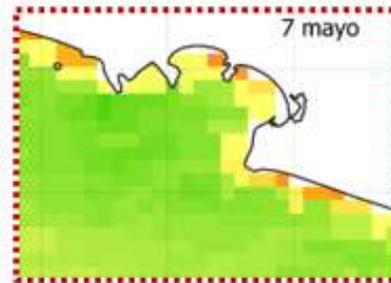




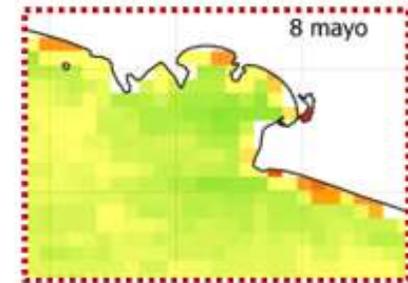
TSM=21.9°C



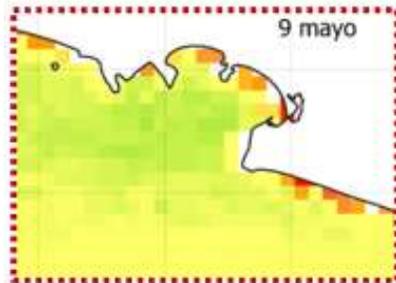
TSM=23.2°C



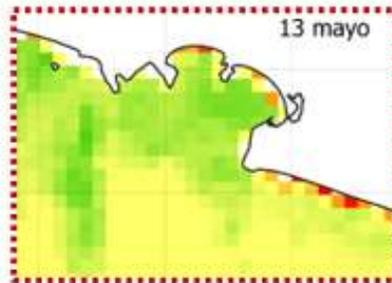
TSM=24.3°C



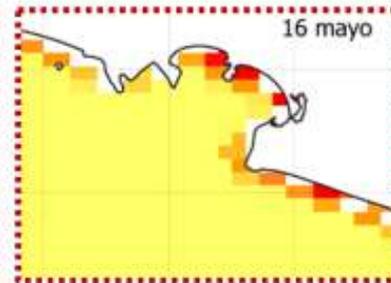
TSM=24.2°C



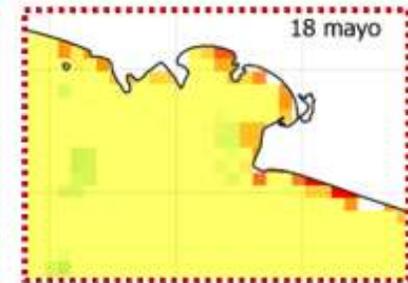
TSM=24.7°C



TSM=23.9°C

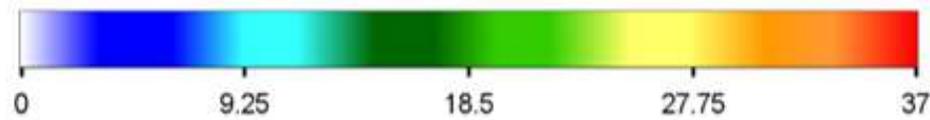


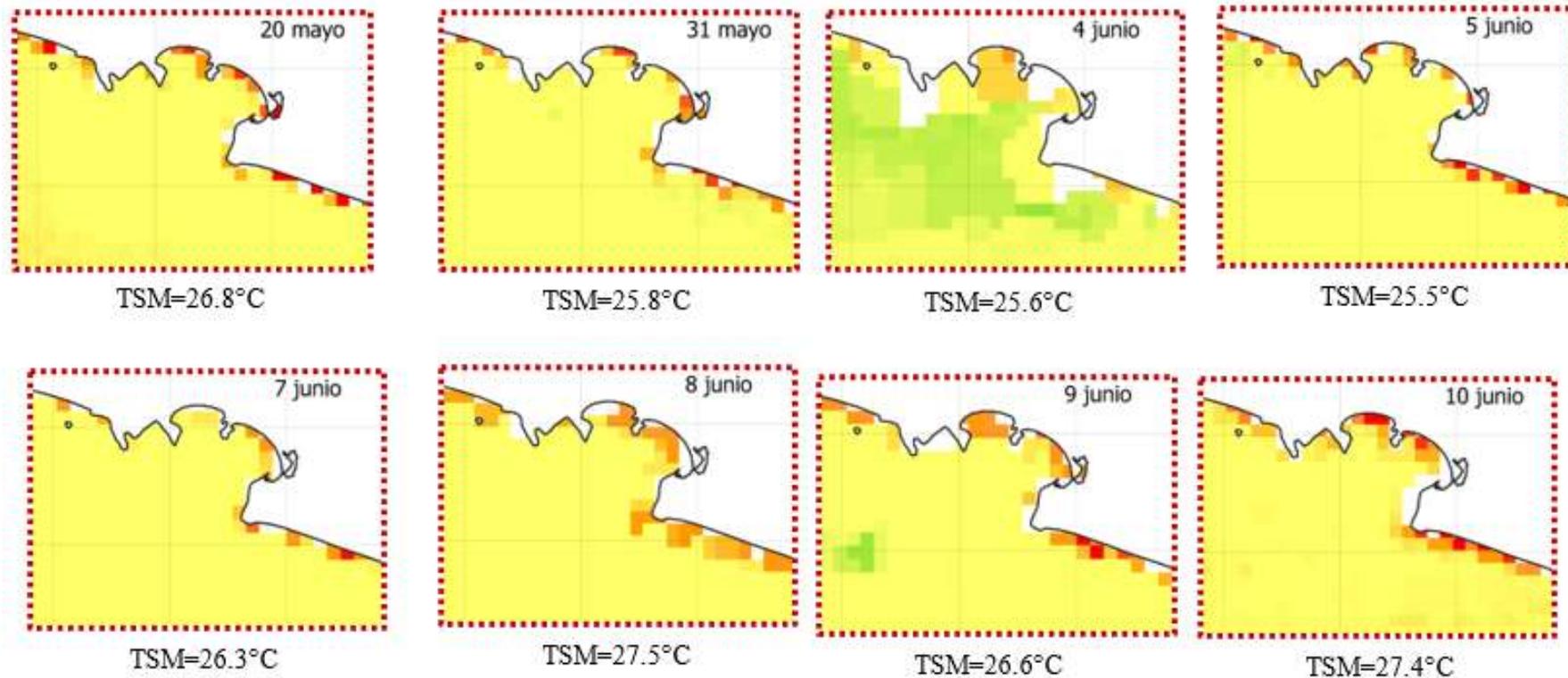
TSM=27.2°C



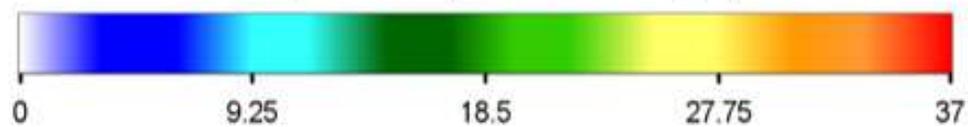
TSM=25.4°C

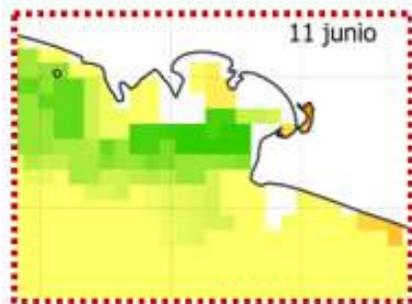
Temperatura Superficial del Mar (°C)



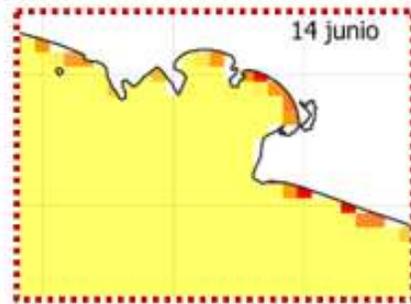


**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

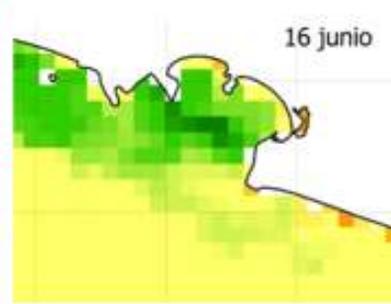




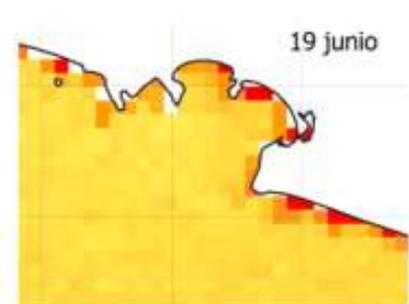
TSM=23.1°C



TSM=26.5°C

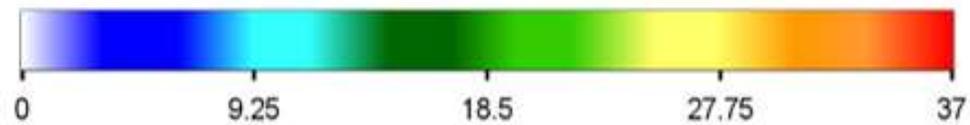


TSM=23.6°C



TSM=28.6°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

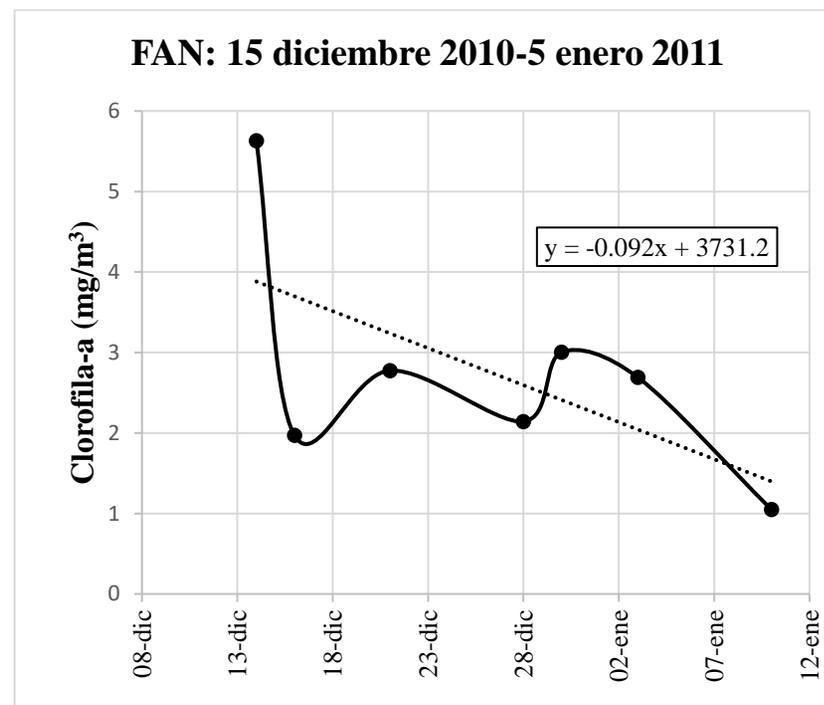
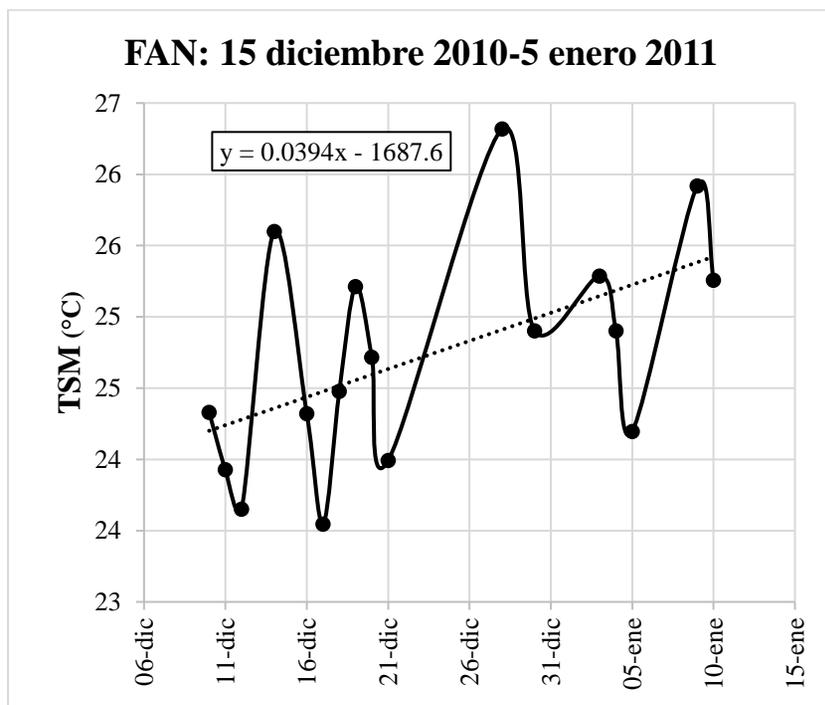


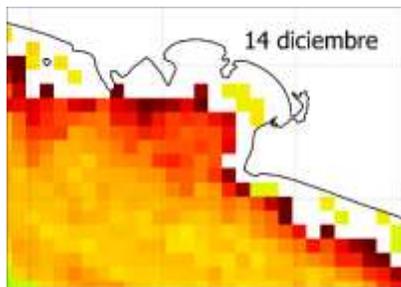
## 8.16 FAN ocurrido del 15 diciembre de 2010-5 enero de 2011

Composición de especies: *Gymnodinium catenatum*, *Pyrodinium bahamense* y *Mesodinium rubrum*

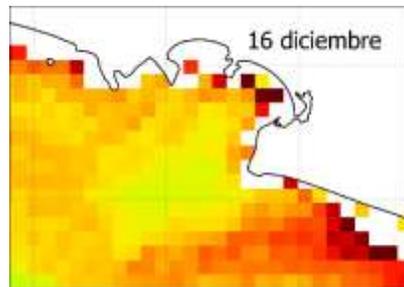
Rango de Cl-a de 1 a 10 días: 0.9 mg/m<sup>3</sup>

Rango de TSM de 1 a 10 días: 1.8°C

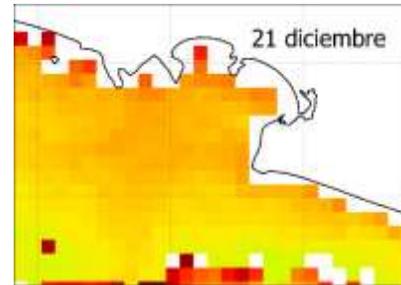




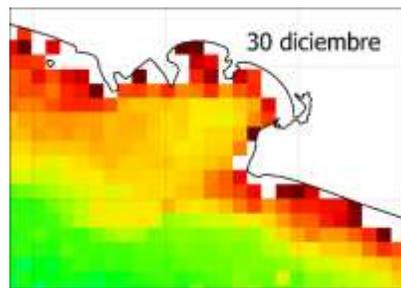
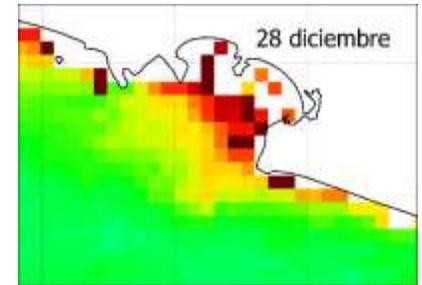
5.6 mg/m<sup>3</sup>



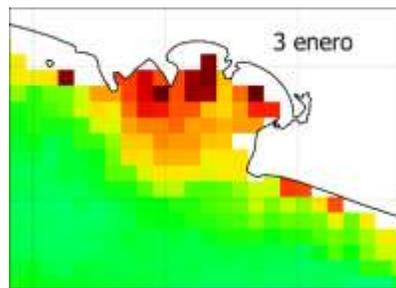
2 mg/m<sup>3</sup>



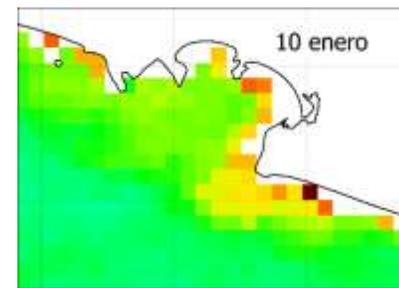
2.8 mg/m<sup>3</sup>



3 mg/m<sup>3</sup>

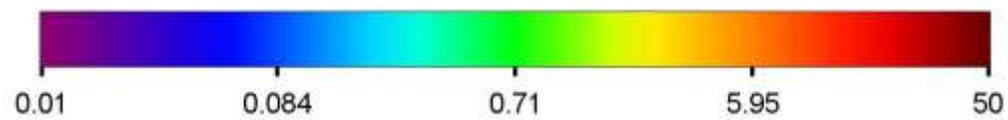


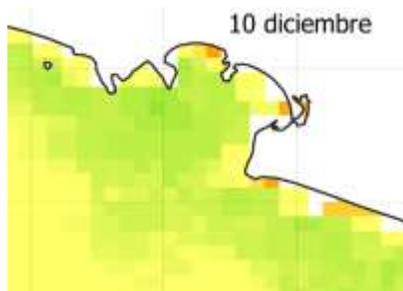
2.7 mg/m<sup>3</sup>



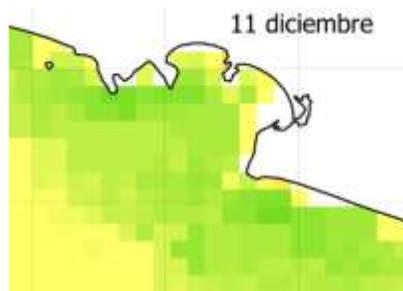
1 mg/m<sup>3</sup> 2.1 mg/m<sup>3</sup>

Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)

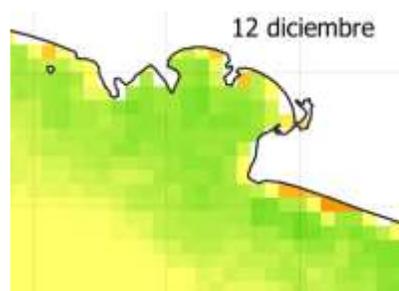




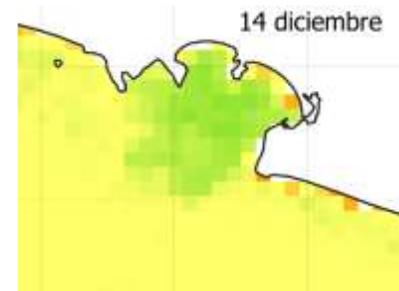
TSM=24.3°C



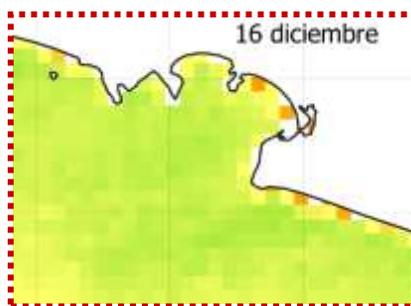
TSM=23.9°C



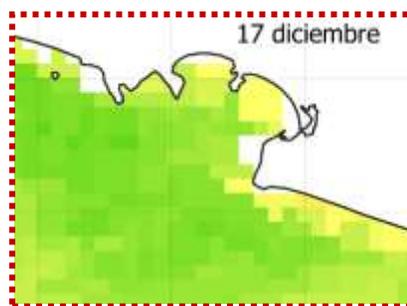
TSM=23.7°C



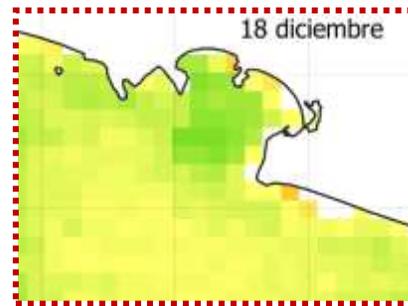
TSM=25.6°C



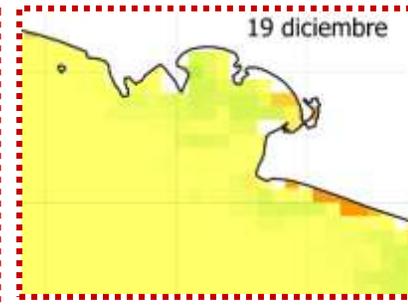
TSM=24.3°C



TSM=23.5°C

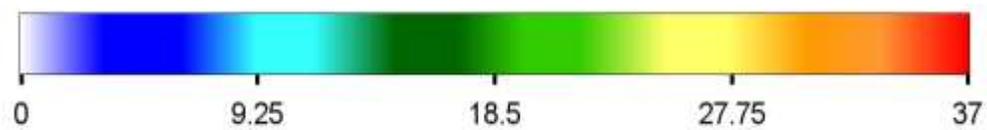


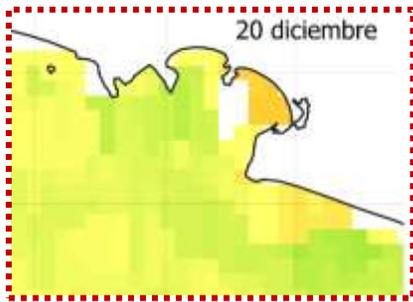
TSM=24.5°C



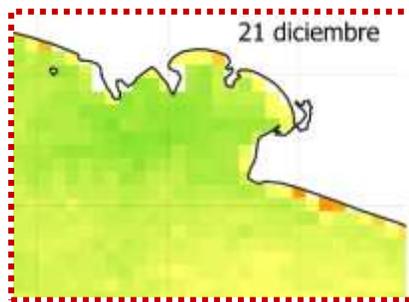
TSM=25.2°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

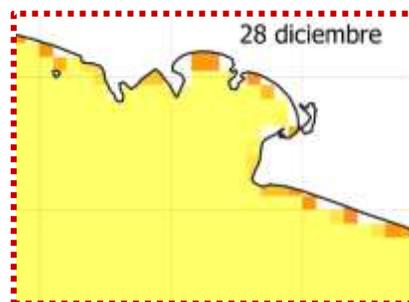




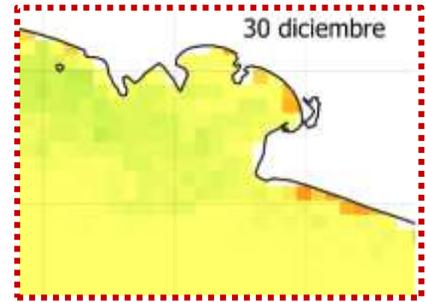
TSM=24.7°C



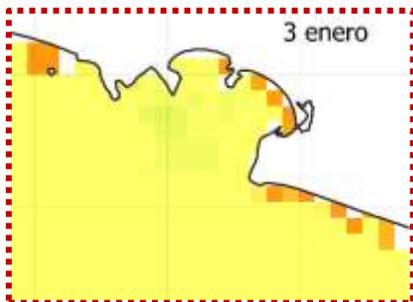
TSM=24°C



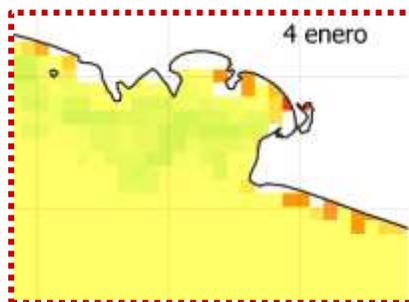
TSM=26.3°C



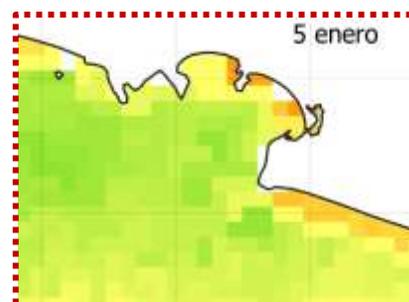
TSM=24.9°C



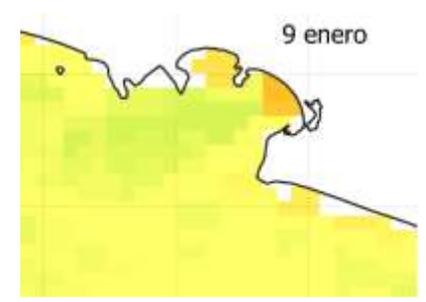
TSM=25.3°C



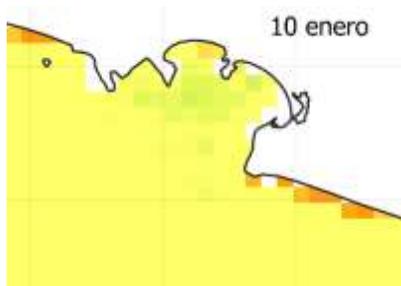
TSM=24.9°C



TSM=24.2°C

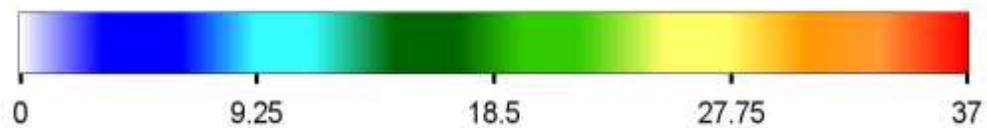


TSM=25.9°C



TSM=25.3°C

Temperatura Superficial del Mar (°C)

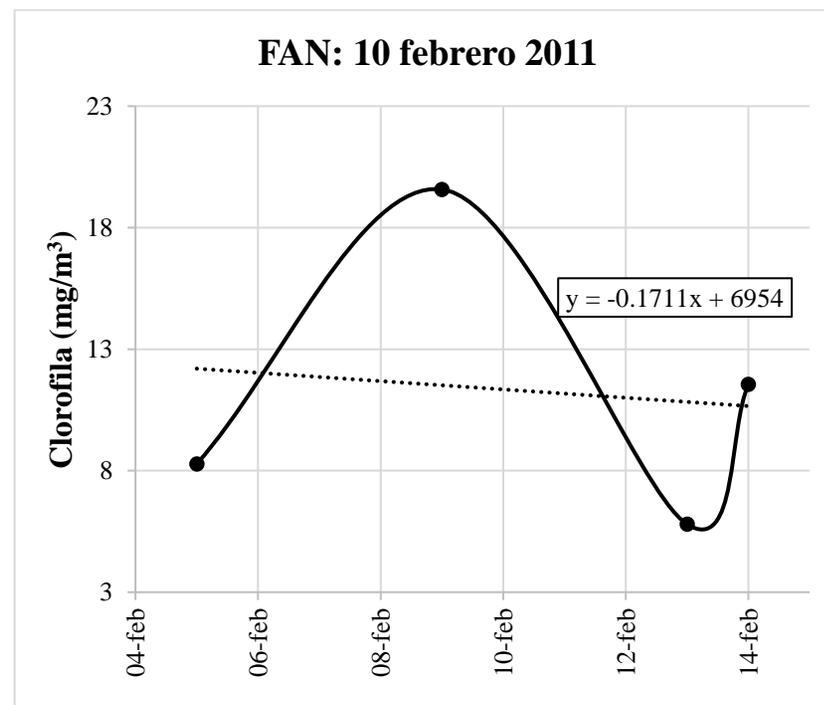
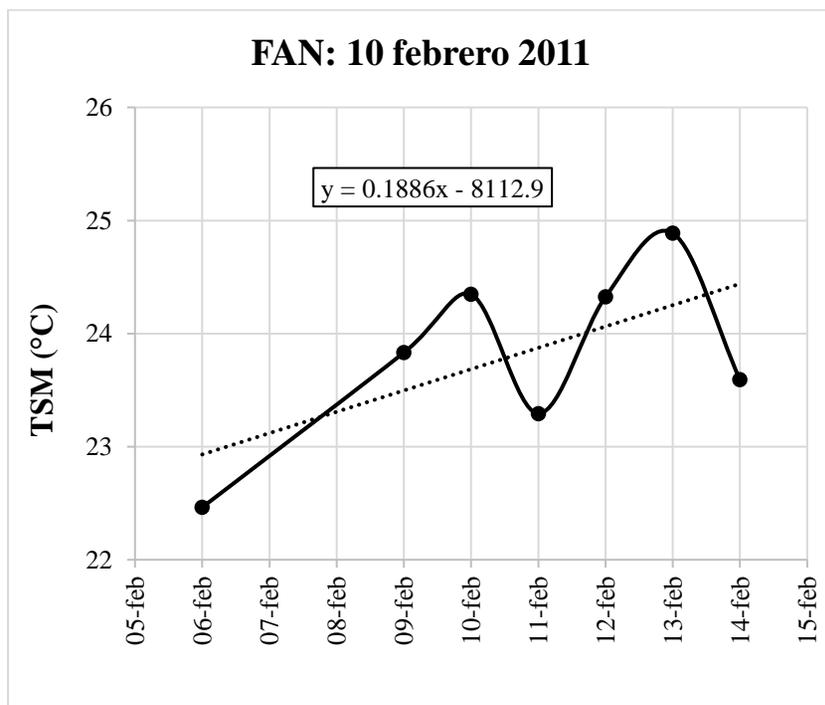


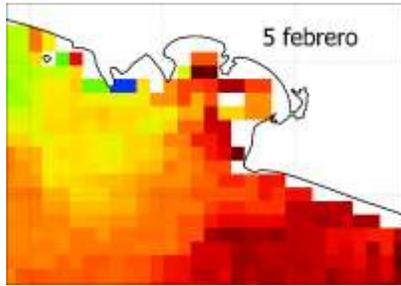
### 8.17 FAN ocurrido el 10 de febrero 2011

Composición de especies: *Mesodinium rubrum* y *Levanderina fissa* (*Gyrodinium instriatum*)

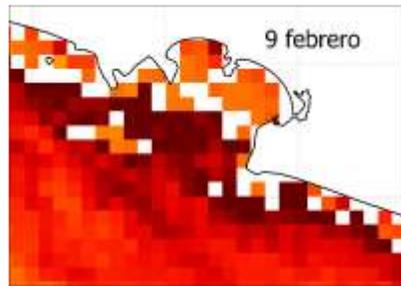
Rango de Cl-a de 1 a 10 días: 13.8 mg/m<sup>3</sup>

Rango de TSM de 1 a 10 días: 2.4°C

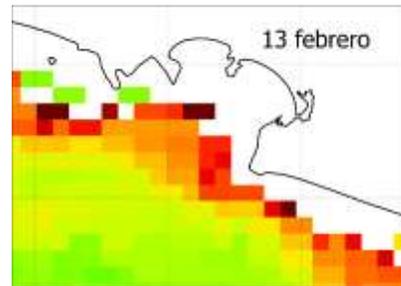




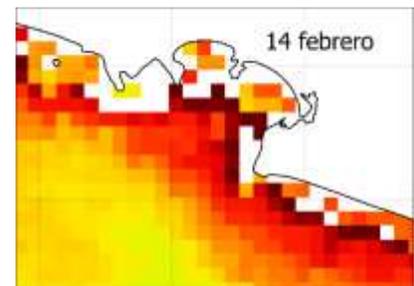
8.3 mg/m<sup>3</sup>



19.9 mg/m<sup>3</sup>

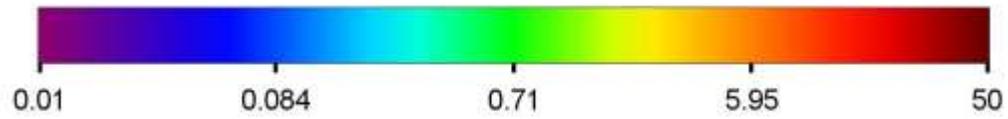


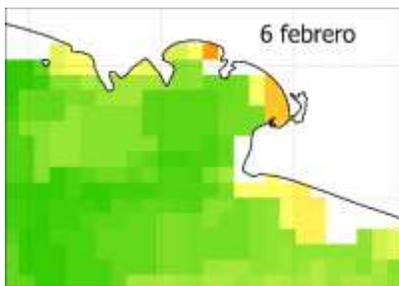
5.8 mg/m<sup>3</sup>



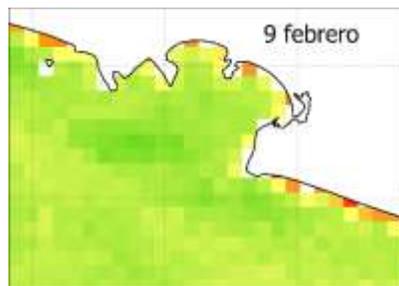
11.5 mg/m<sup>3</sup>

Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)

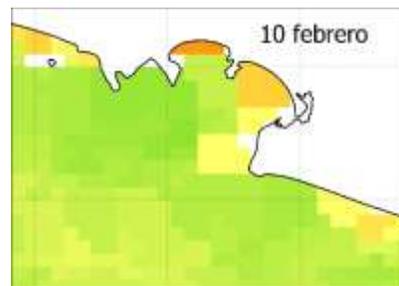




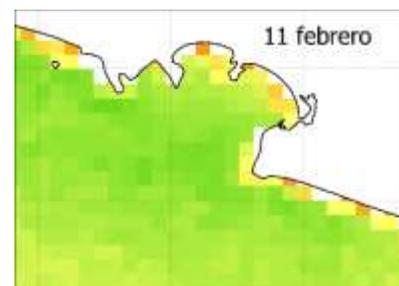
TSM=22.5°C



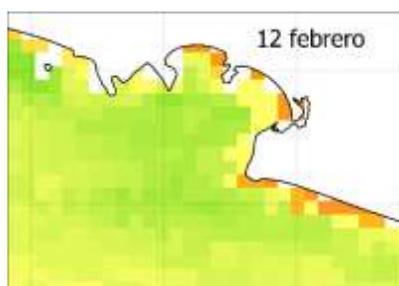
TSM=23.8°C



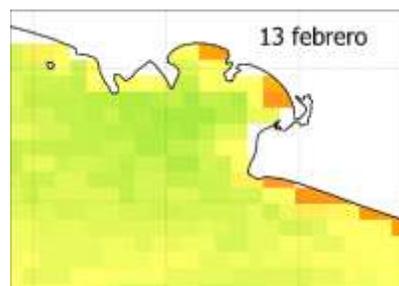
TSM=24.3°C



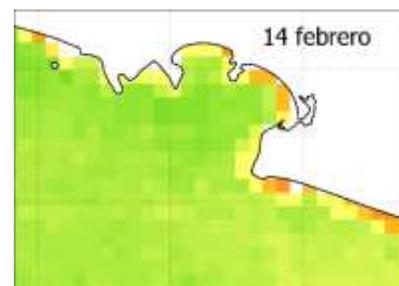
TSM=23.3°C



TSM=24.3°C

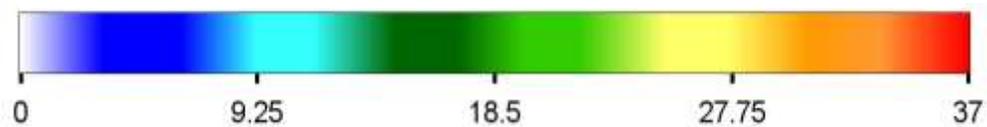


TSM=24.9°C



TSM=23.6°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

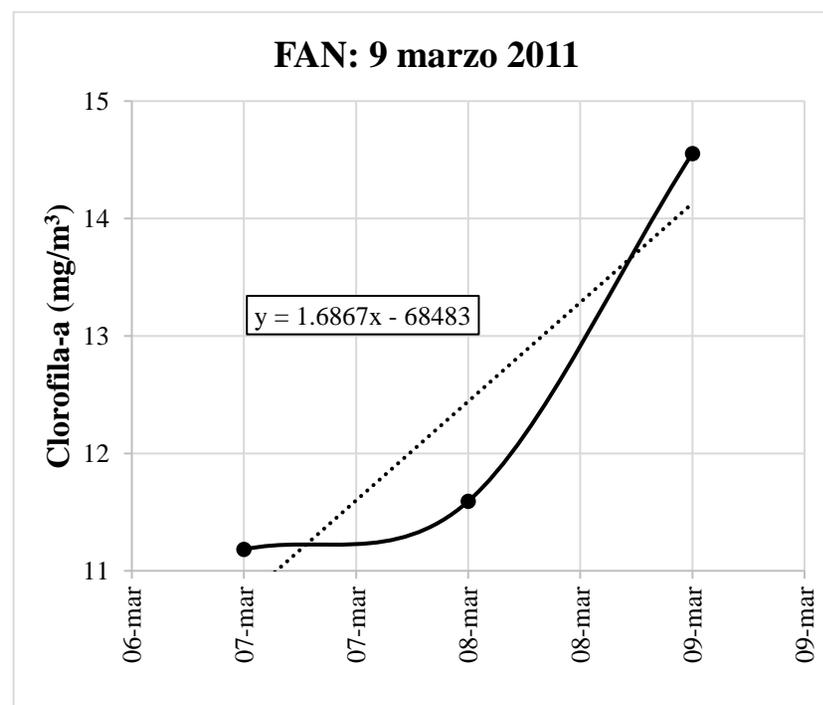
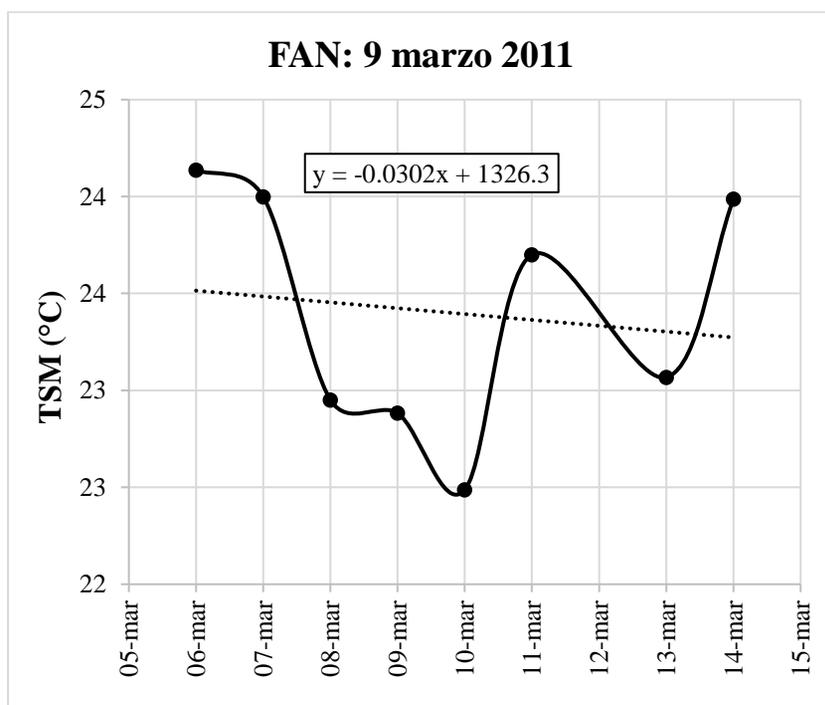


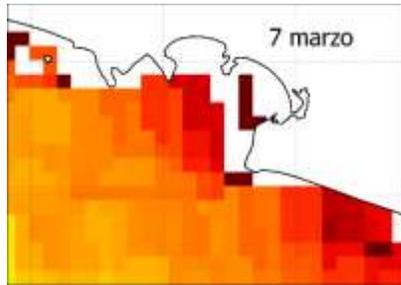
## 8.18 FAN ocurrido del 9 marzo 2011

Composición de especies: *Tripes divaricatus* (*Ceratium divaricatum*), *Nannochloropsis* sp. y *Mesodinium rubrum*

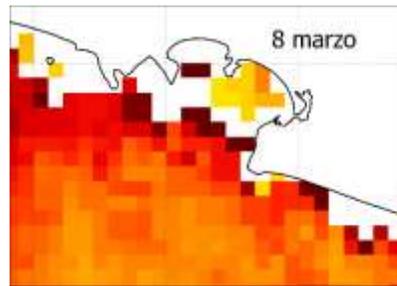
Rango de Cl-a de 1 a 10 días: 3.4 mg/m<sup>3</sup>

Rango de TSM de 1 a 10 días: 1.6°C

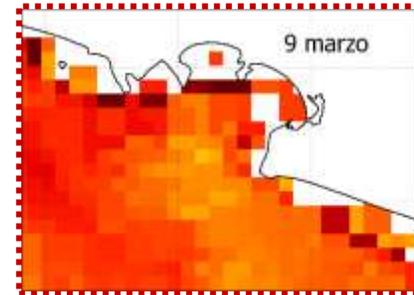




11.2 mg/m<sup>3</sup>

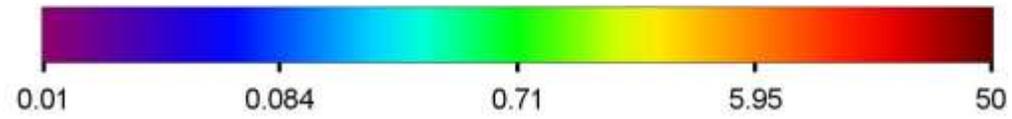


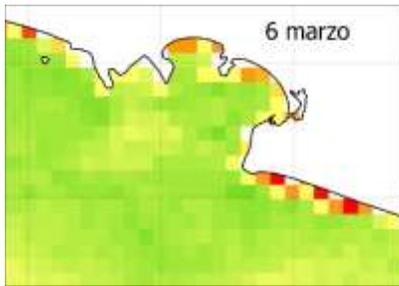
11.6 mg/m<sup>3</sup>



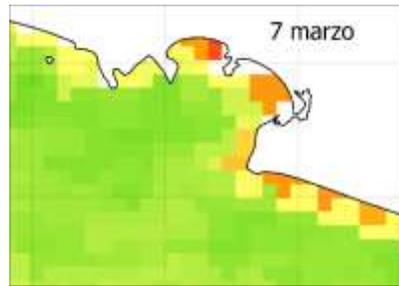
14.6 mg/m<sup>3</sup>

Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)

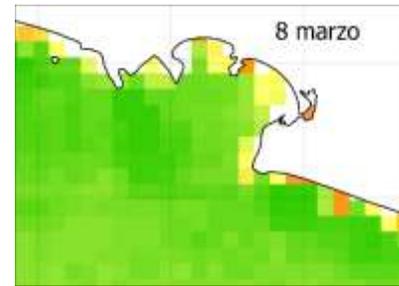




TSM=24.1°C



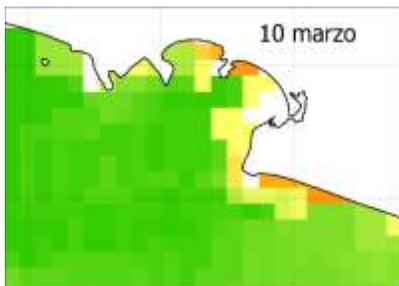
TSM=24°C



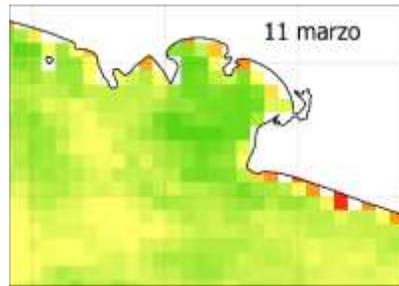
TSM=23°C



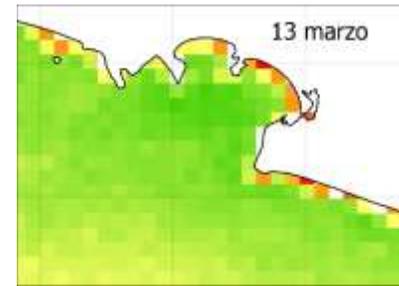
TSM=22.9°C



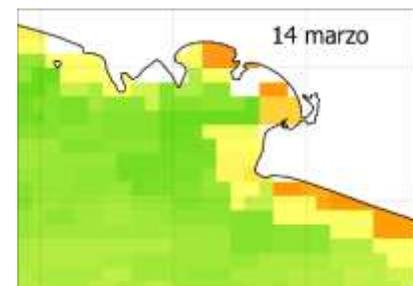
TSM=22.5°C



TSM=23.7°C

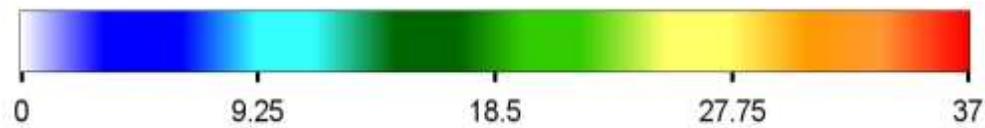


TSM=23.1°C



TSM=24°C

Temperatura Superficial del Mar (°C)

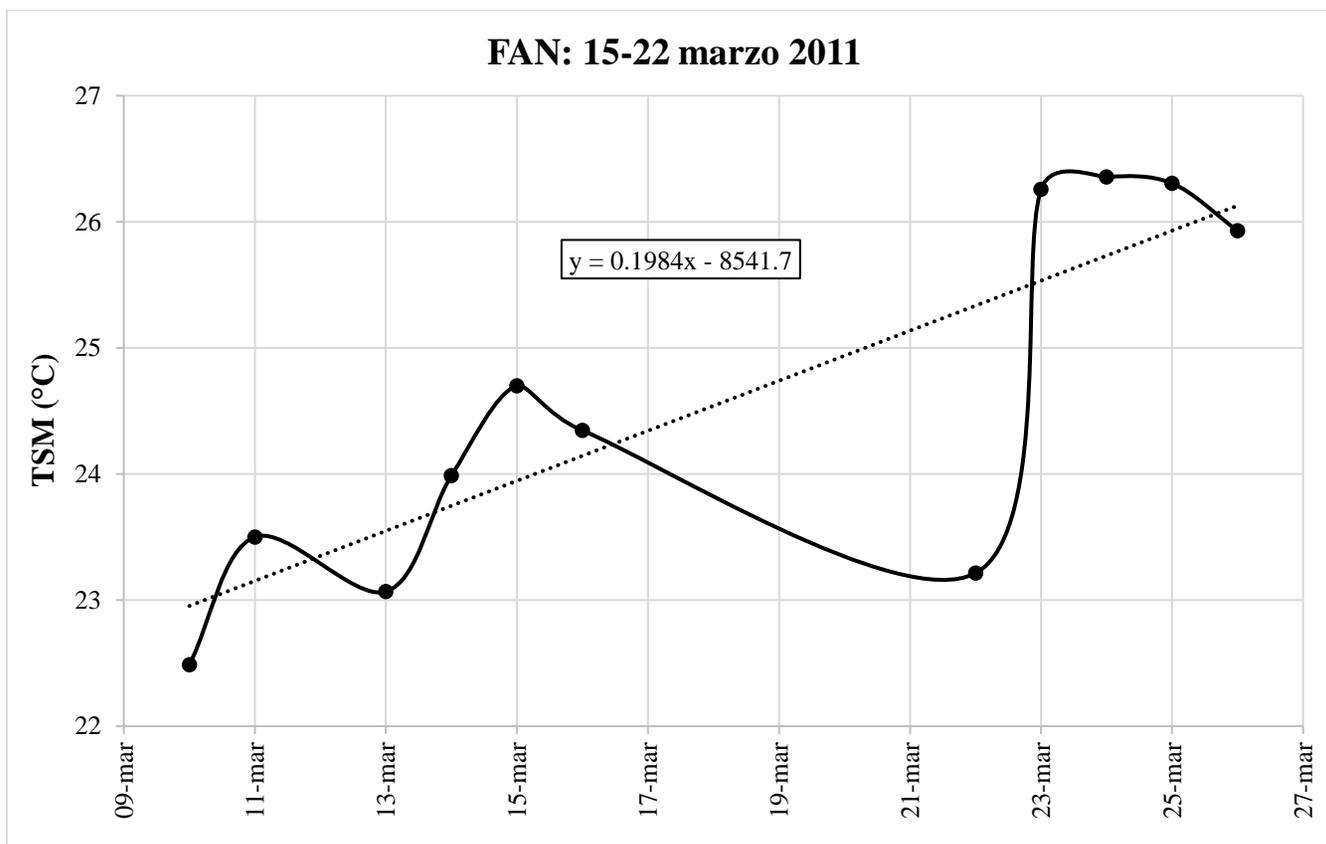


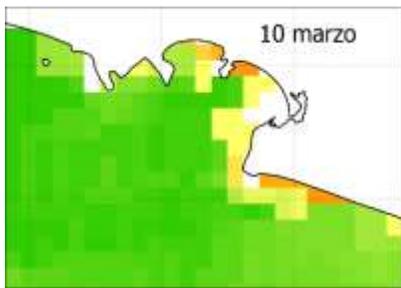
### 8.19 FAN ocurrido del 15 al 22 marzo 2011

Composición de especies: *Ceratium divaricatum* y *Mesodinium rubrum*

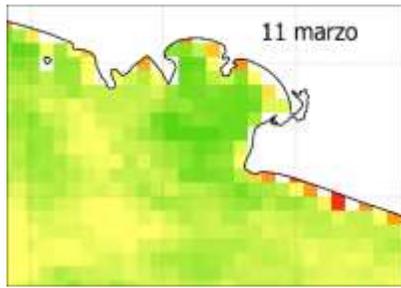
Rango de CI-a de 1 a 10 días: Sin imágenes disponibles

Rango de TSM de 1 a 10 días: 3.3°C

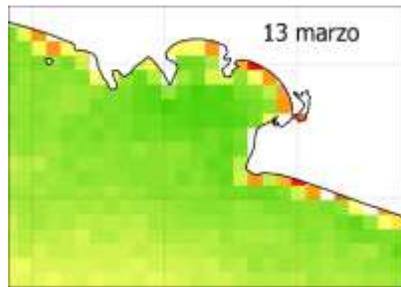




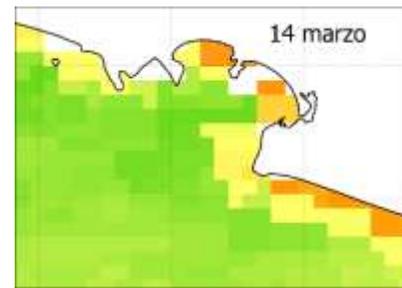
TSM=22.5°C



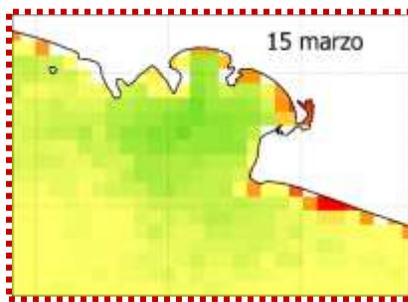
TSM=23.5°C



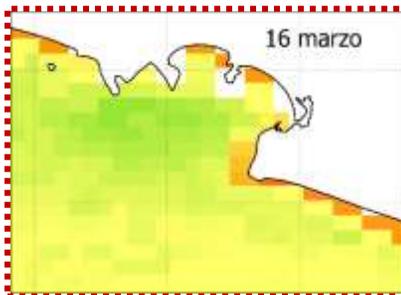
TSM=23.1°C



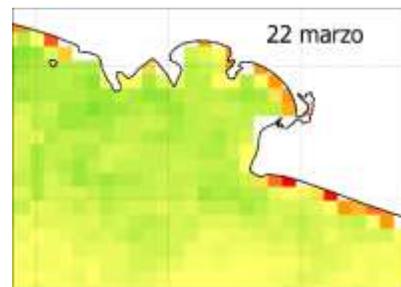
TSM=24°C



TSM=24.7°C



TSM=24.3°C

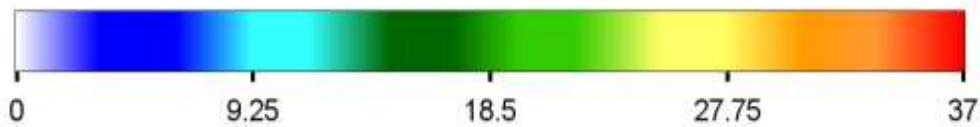


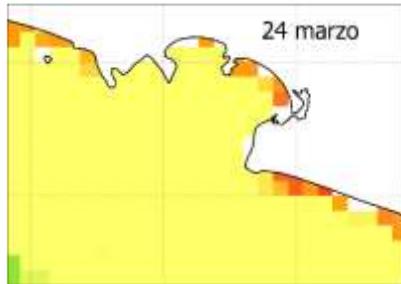
TSM=23.2°C



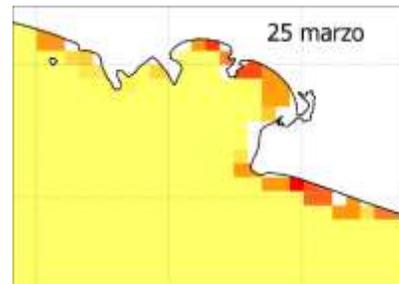
TSM=26.3°C

Temperatura Superficial del Mar (°C)

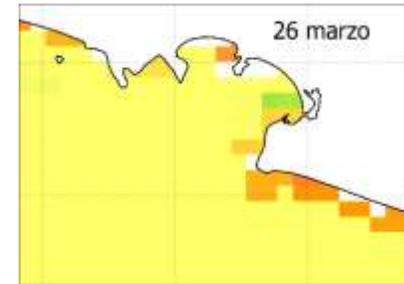




TSM=26.4°C

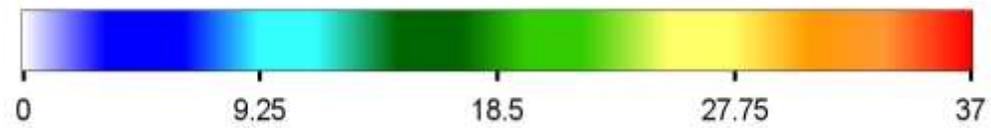


TSM=26.3°C



TSM=25.9°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

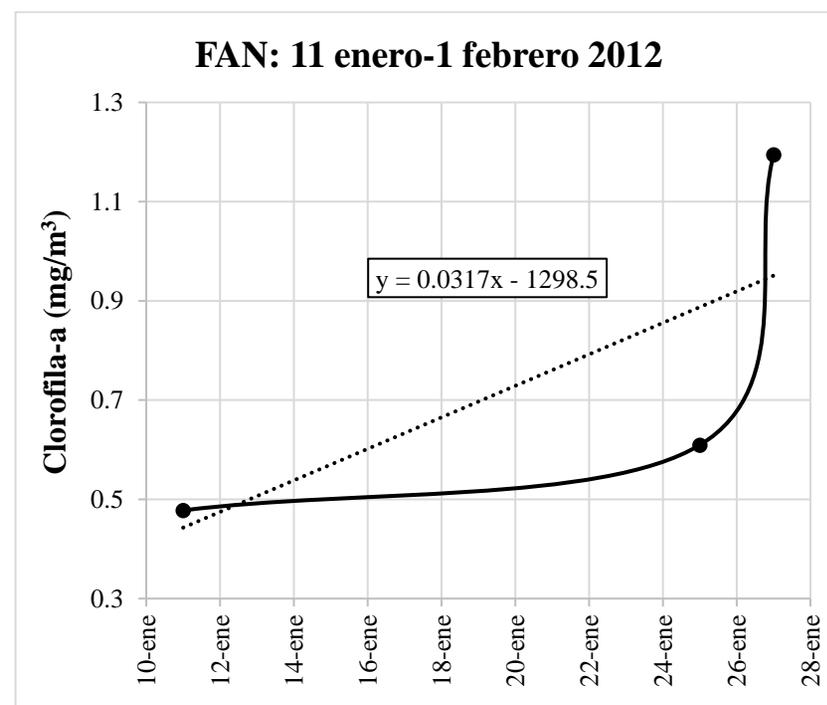
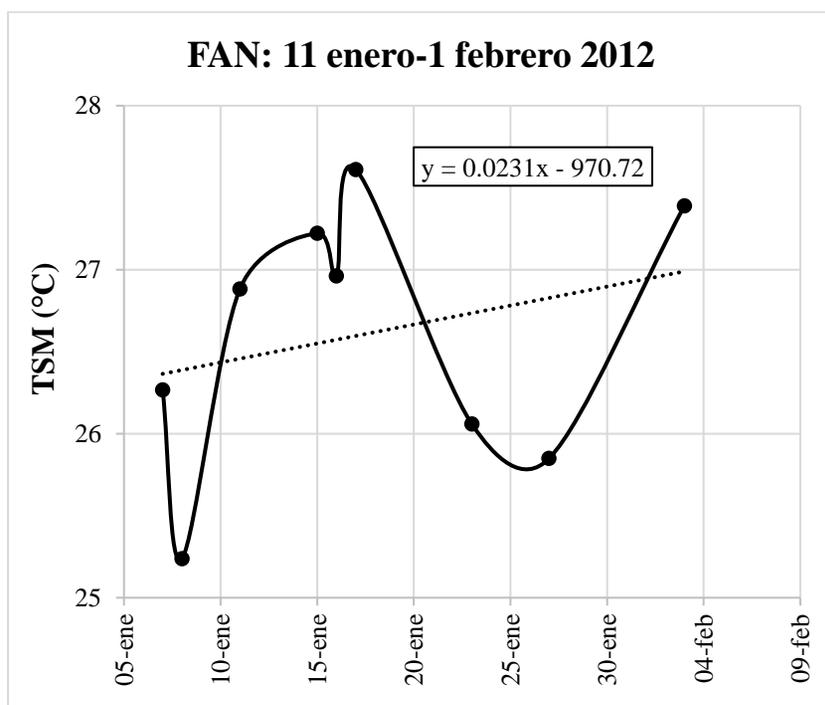


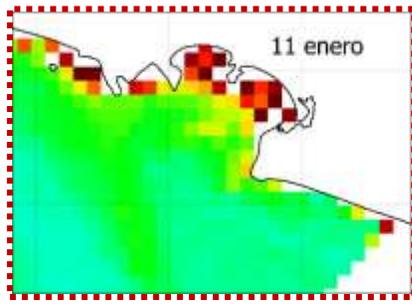
## 8.20 FAN ocurrido del 11 enero al 1 febrero de 2012

Composición de especies: *Gymnodinium catenatum* y *Margalefidinium polykrikoides*

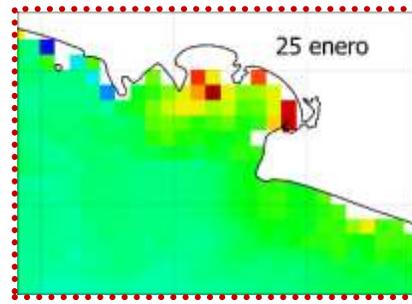
Rango de CI-a de 1 a 10 días: 0.6

Rango de TSM de 1 a 10 días: 2.4°C

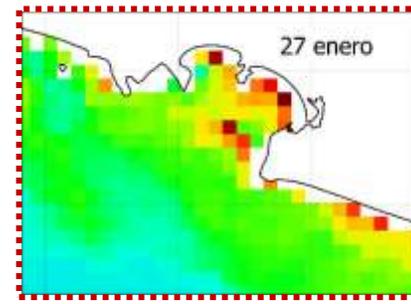




0.5 mg/m<sup>3</sup>

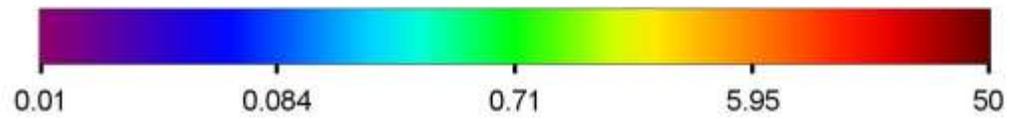


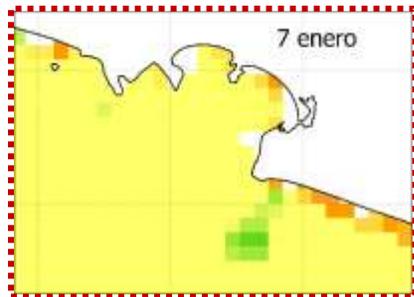
0.6 mg/m<sup>3</sup>



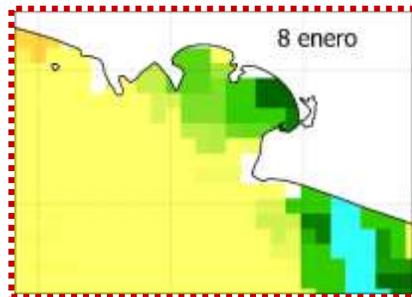
1.2 mg/m<sup>3</sup>

Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)

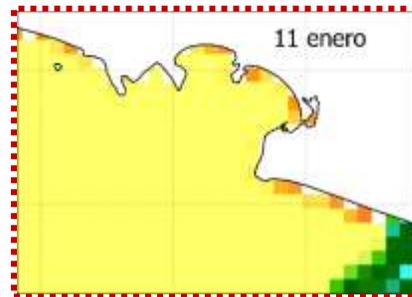




TSM=26.3°C



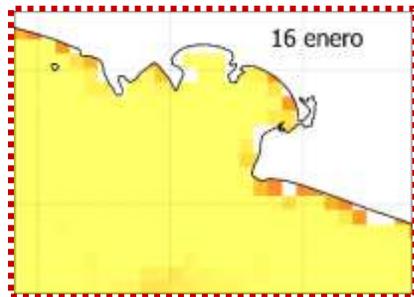
TSM=25.2°C



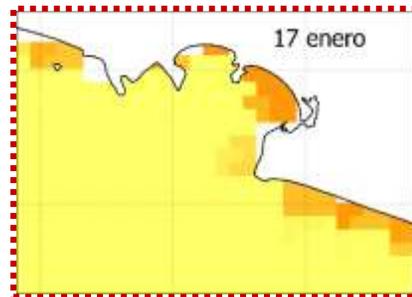
TSM=26.9°C



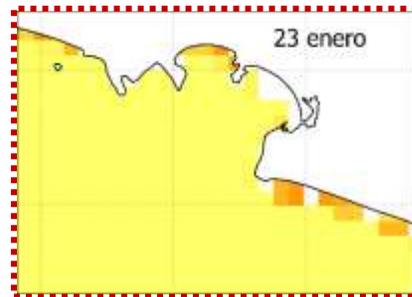
TSM=27.2°C



TSM=27°C



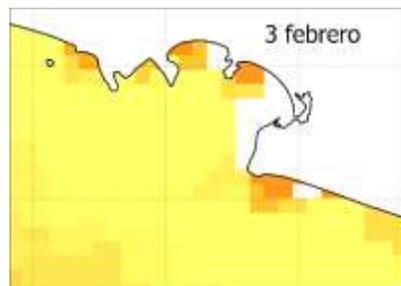
TSM=27.6°C



TSM=26.1°C

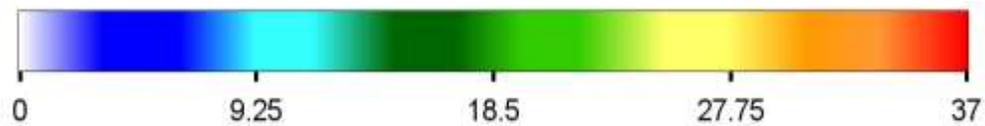


TSM=25.8°C



TSM=27.4°C

Temperatura Superficial del Mar (°C)

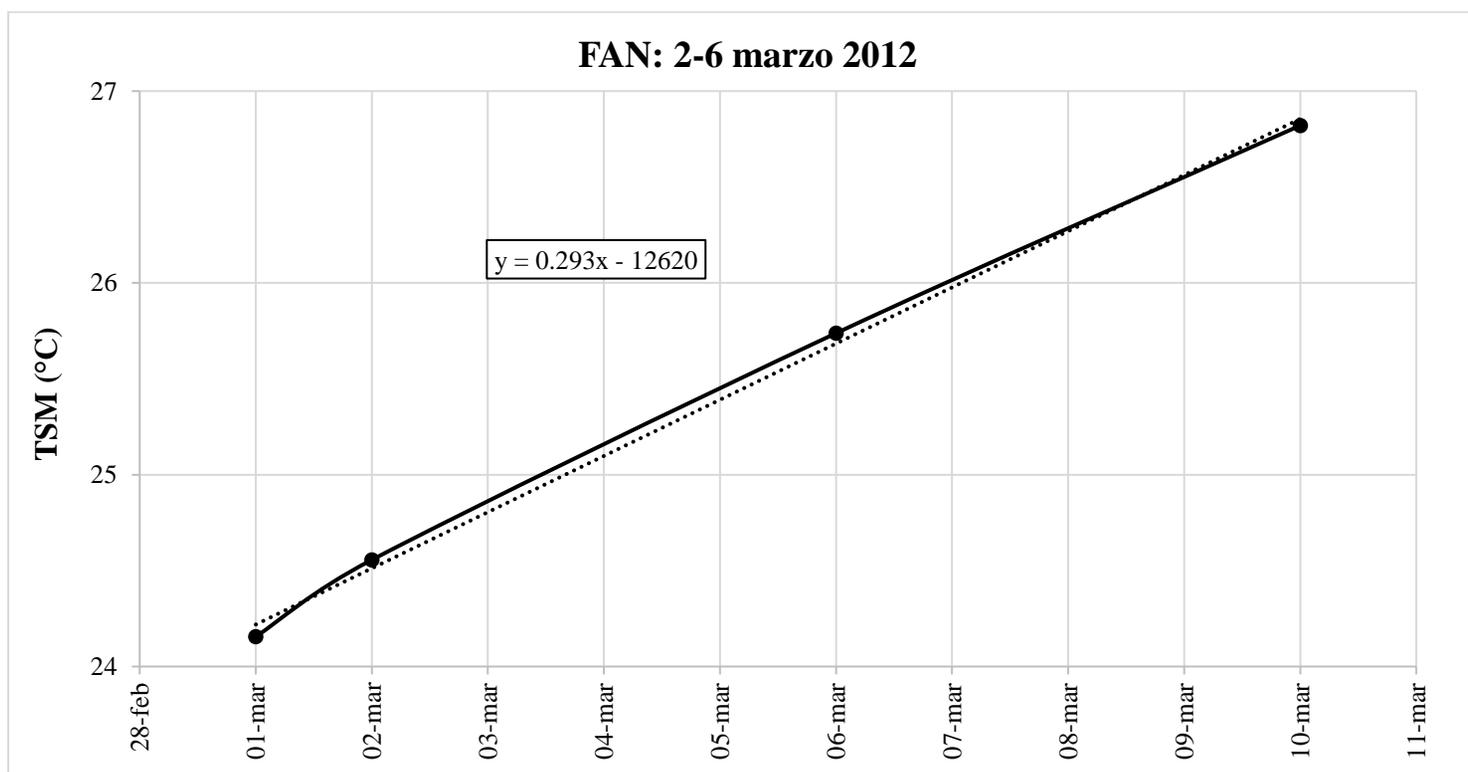


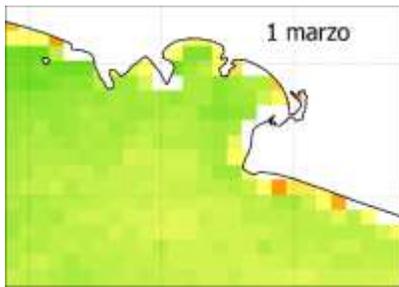
## 8.21 FAN ocurrido del 2 al 6 de marzo de 2012

Composición de especies: *Mesodinium rubrum*

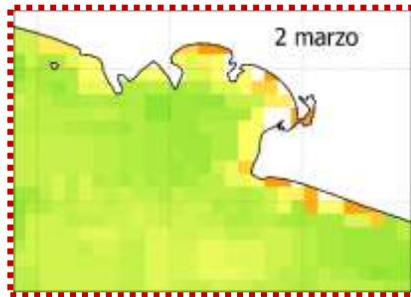
Rango de CI-a de 1 a 10 días: Sin imágenes disponibles

Rango de TSM de 1 a 10 días: 2.7°C

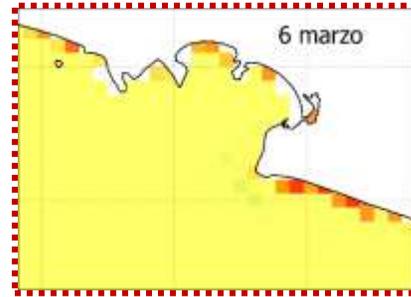




TSM=24.2°C



TSM=24.6°C

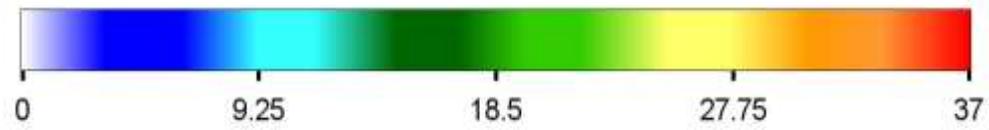


TSM=25.7°C



TSM=26.8°C

Temperatura Superficial del Mar (°C)

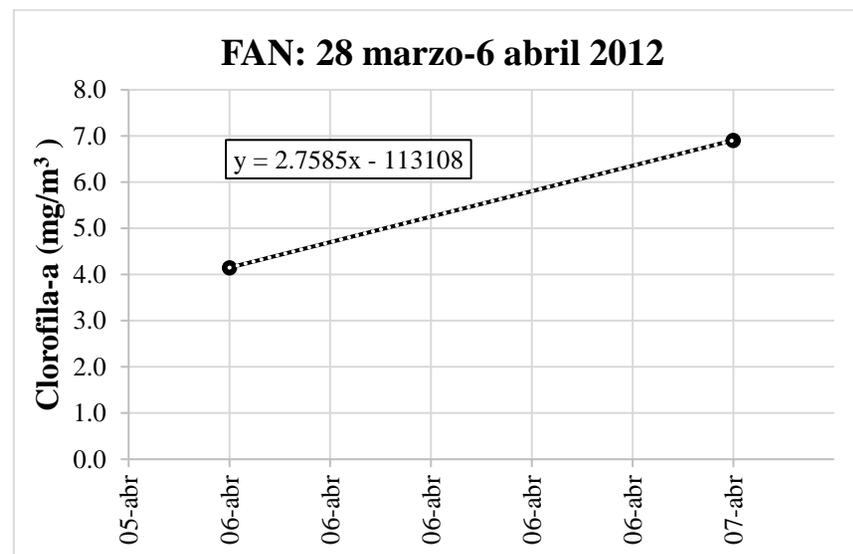
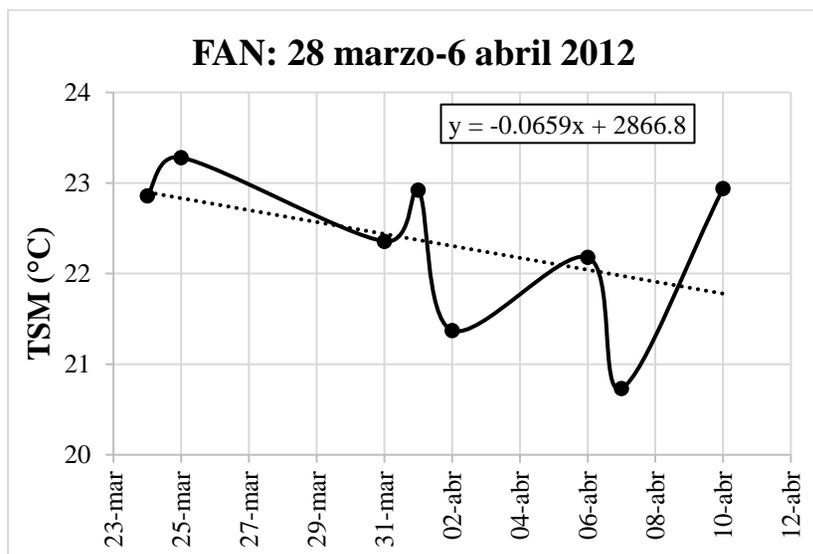


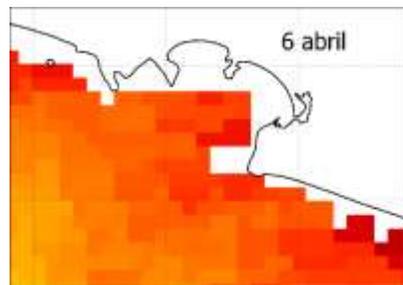
## 8.22 FAN ocurrido del 28 marzo al 6 de abril de 2012

Composición de especies: *Mesodinium rubrum*, *Protoperidinium* sp., *Chaetoceros* sp. y *Ceratium* sp.

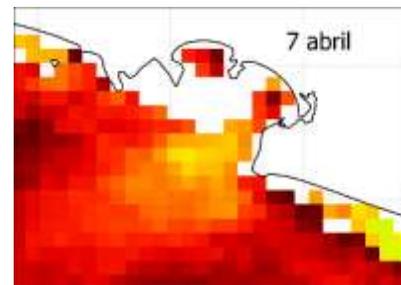
Rango de Cl-a de 1 a 10 días: 2.8 mg/m<sup>3</sup>

Rango de TSM de 1 a 10 días: 2.5°C



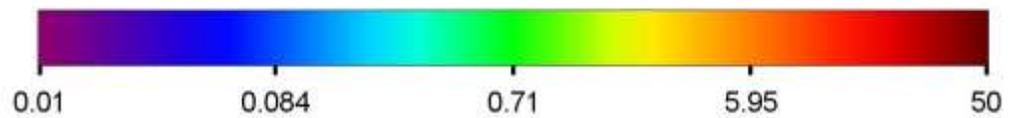


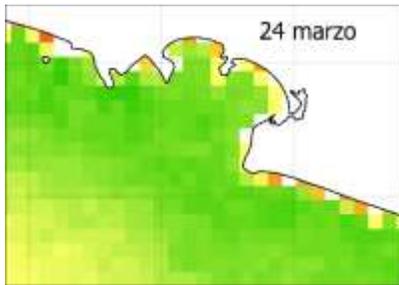
4.1 mg/m<sup>3</sup>



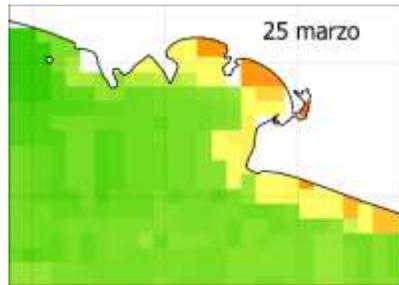
6.9 mg/m<sup>3</sup>

**Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)**

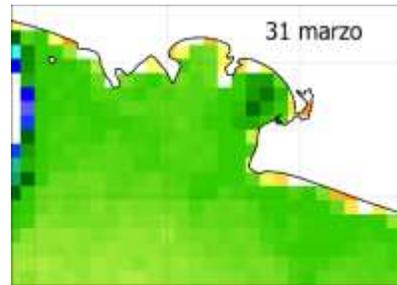




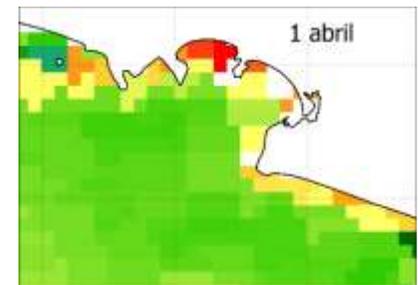
TSM=22.9°C



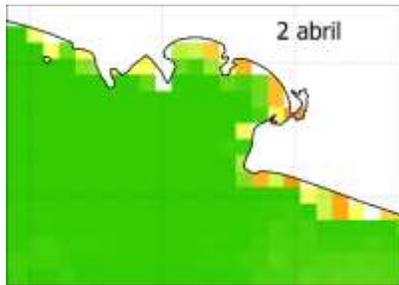
TSM=23.3°C



TSM=22.4°C



TSM=22.9°C



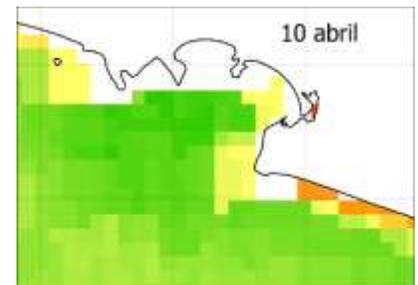
TSM=21.4°C



TSM=22.2°C

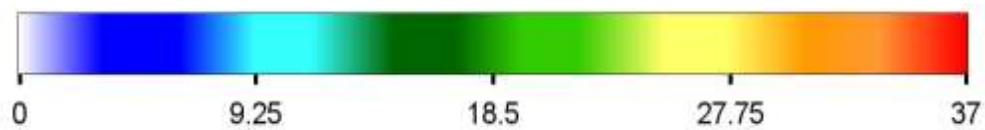


TSM=20.7°C



TSM=22.9°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

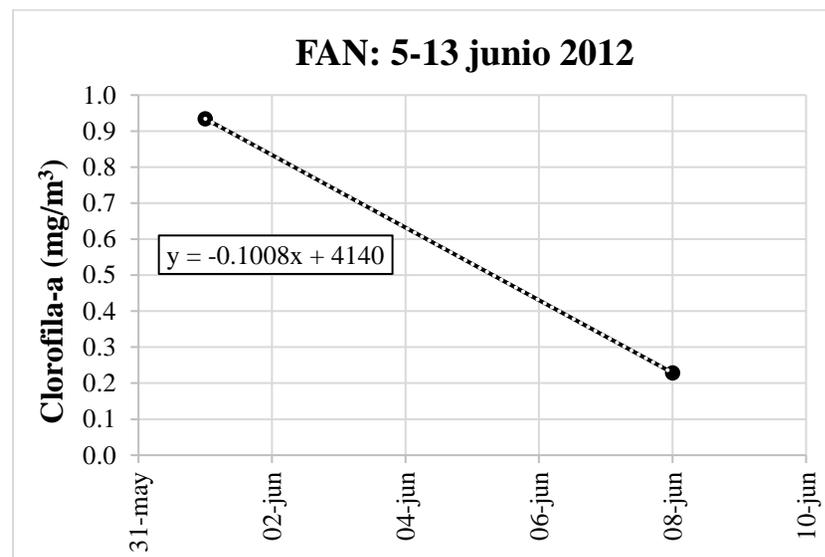
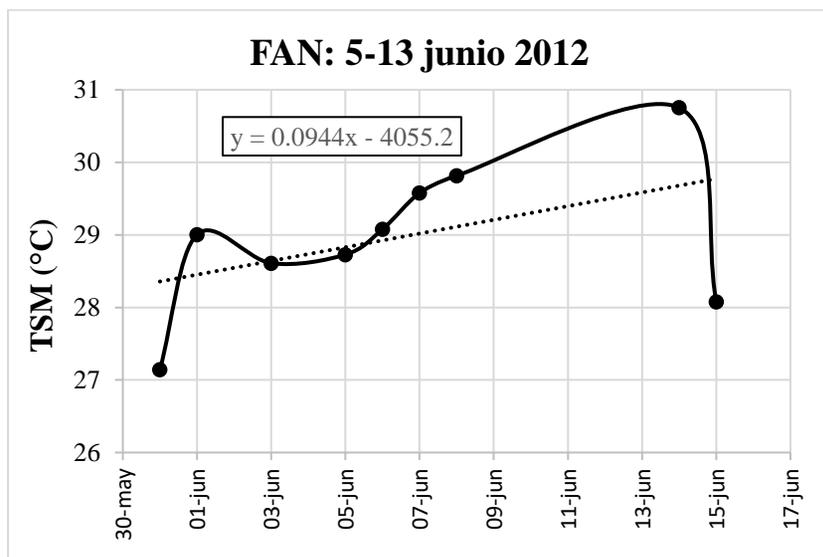


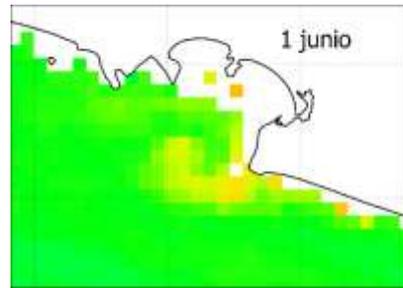
## 8.23 FAN ocurrido del 5 al 13 de junio de 2012

Composición de especies: *Lingulodinium polyedra*

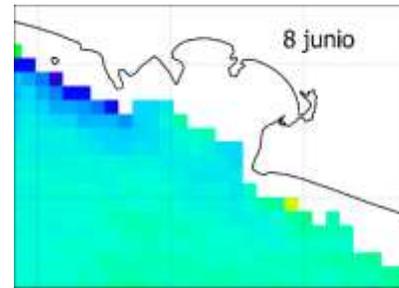
Rango de Cl-a de 1 a 10 días: 0.7 mg/m<sup>3</sup>

Rango de TSM de 1 a 10 días: 3.6°C



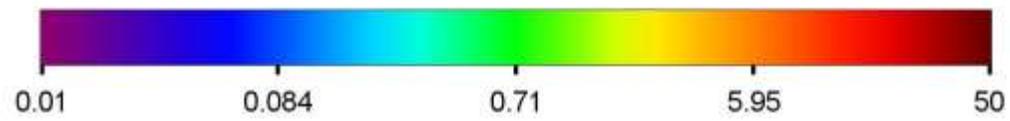


0.9 mg/m<sup>3</sup>



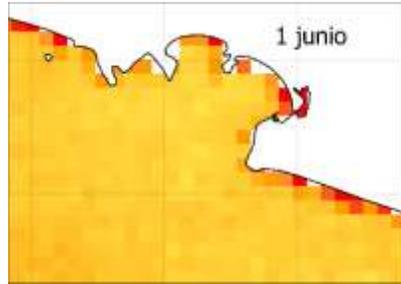
0.2 mg/m<sup>3</sup>

**Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)**

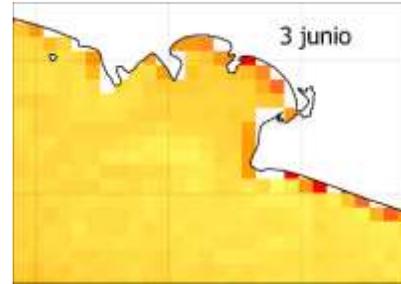




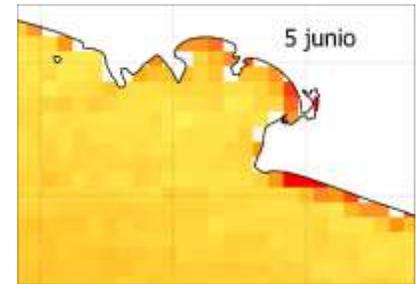
TSM=27.1°C



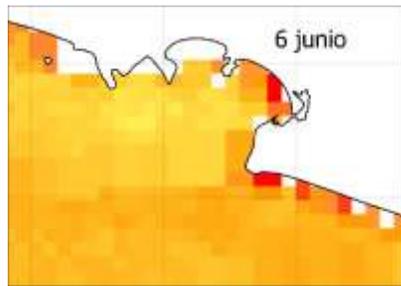
TSM=29°C



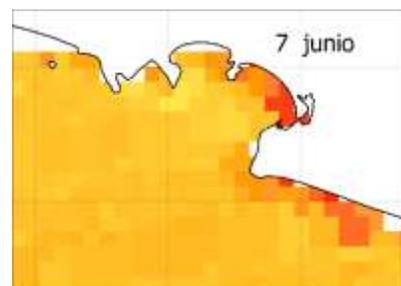
TSM=28.6°C



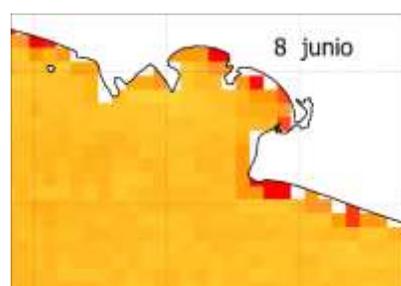
TSM=28.7°C



TSM=29.1°C



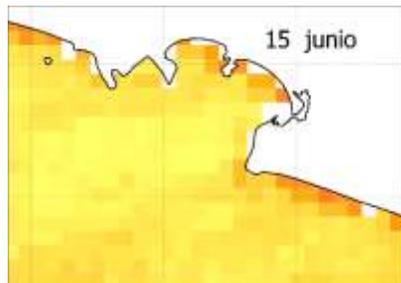
TSM=29.6°C



TSM=29.8°C

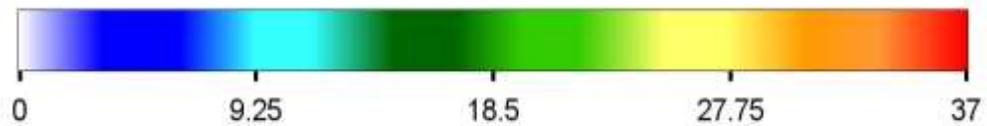


TSM=30.8°C



TSM=28.1°C

Temperatura Superficial del Mar (°C)

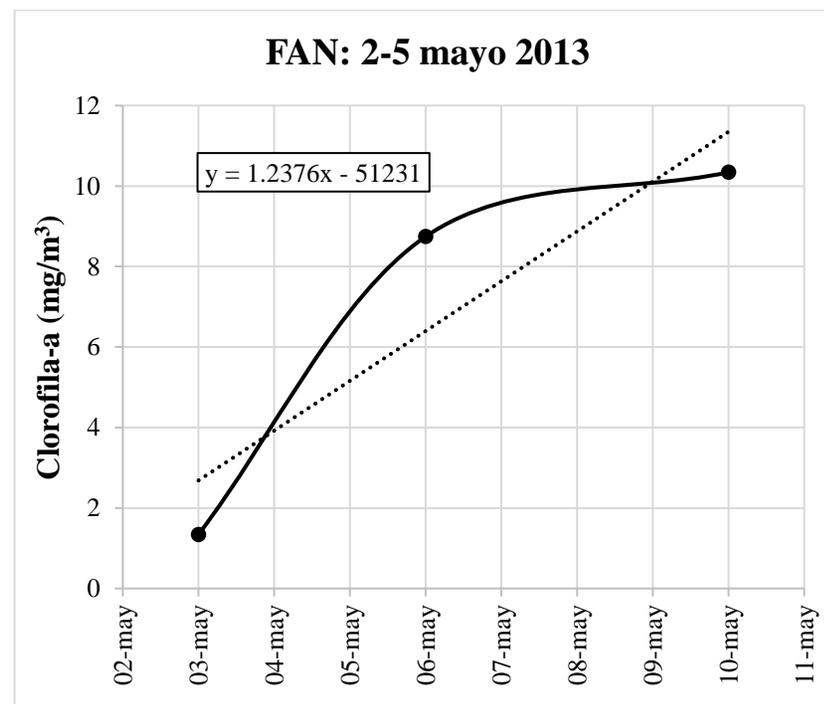
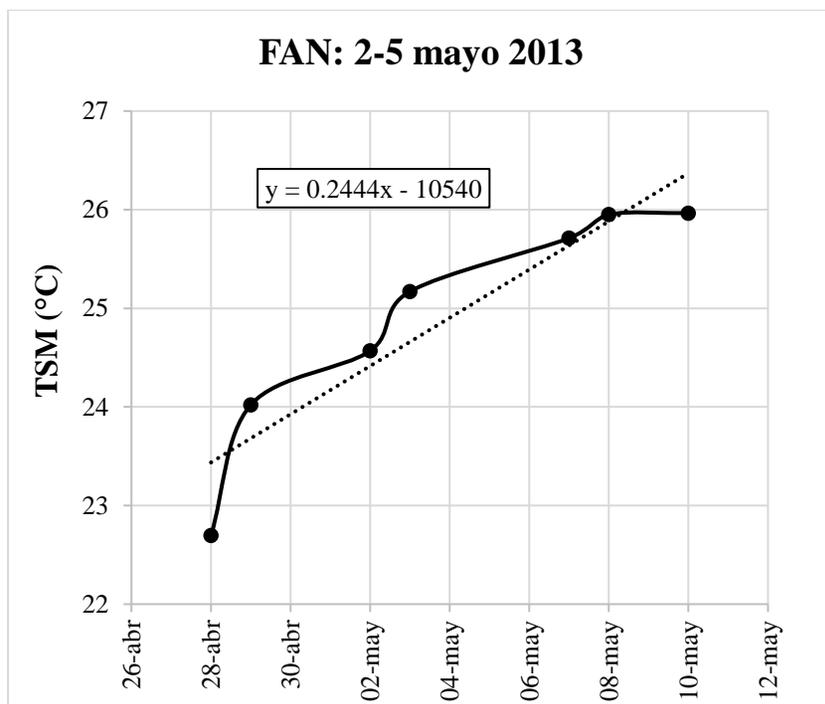


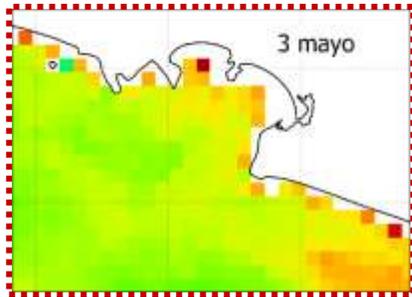
## 8.24 FAN ocurrido del 2 al 5 de mayo de 2013

Composición de especies: *Mesodinium rubrum* y *Scrippsiella* sp.

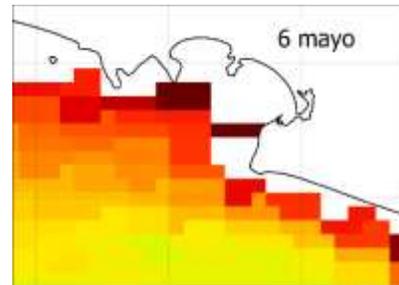
Rango de Cl-a de 1 a 10 días: 9 mg/m<sup>3</sup>

Rango de TSM de 1 a 10 días: 3.3°C

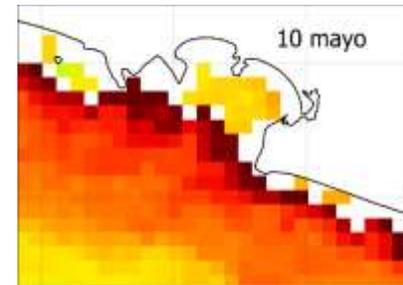




1.3 mg/m<sup>3</sup>

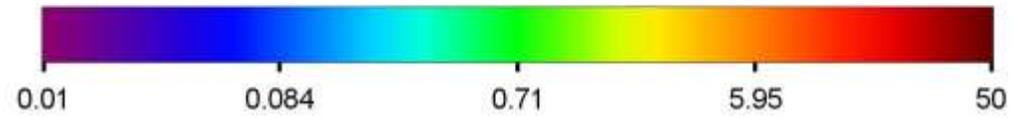


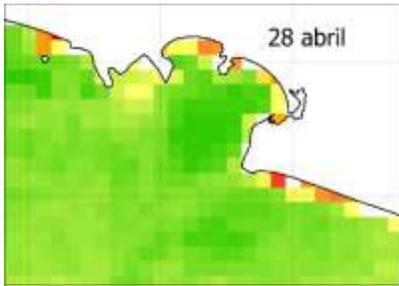
8.7 mg/m<sup>3</sup>



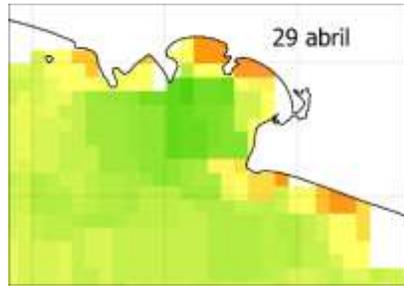
10.3 mg/m<sup>3</sup>

Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)

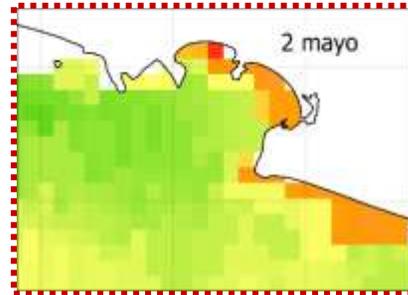




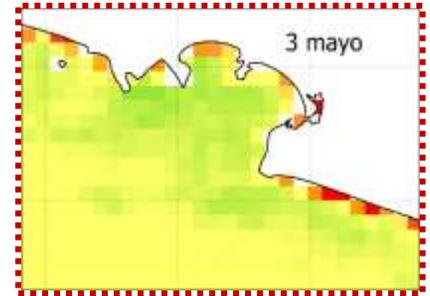
TSM=22.7°C



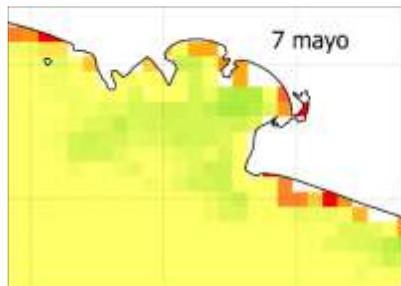
TSM=24°C



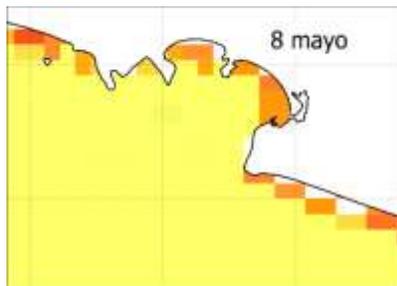
TSM=24.6°C



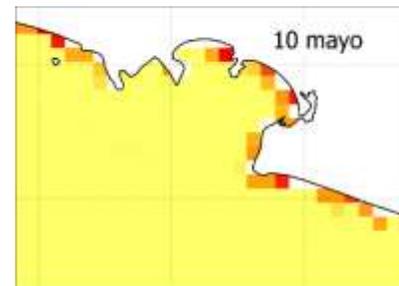
TSM=25.2°C



TSM=25.7°C

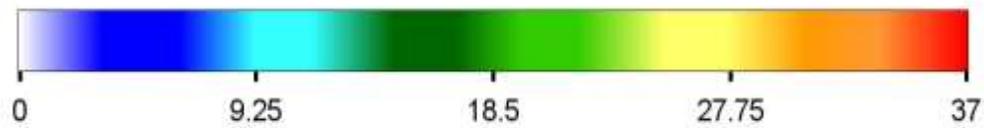


TSM=26°C



TSM=26°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

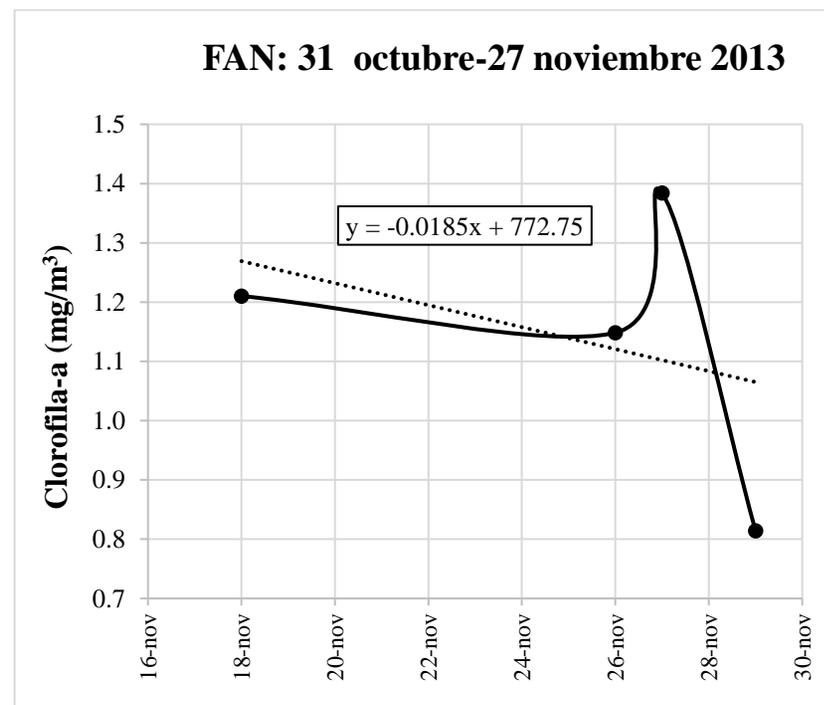
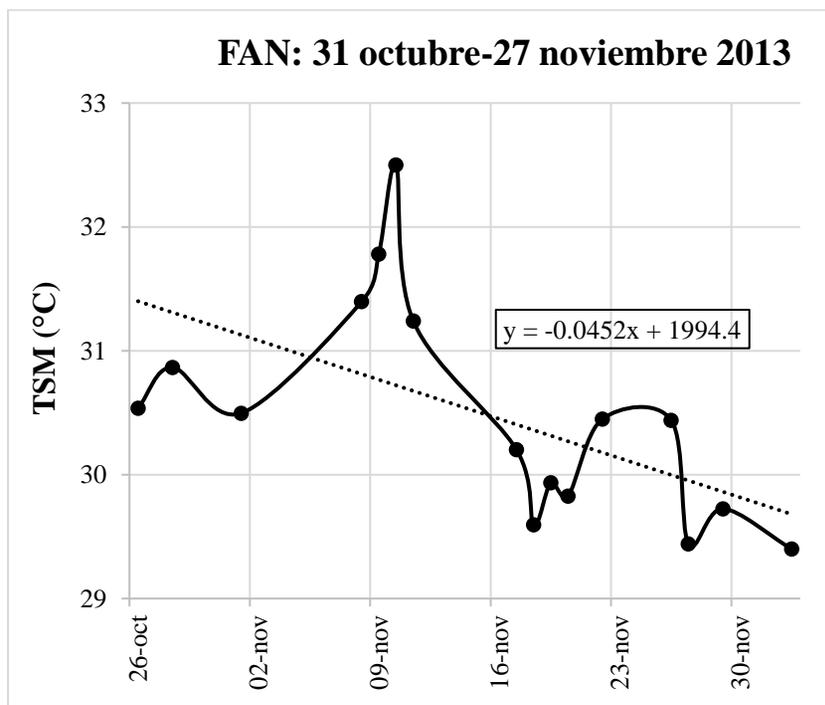


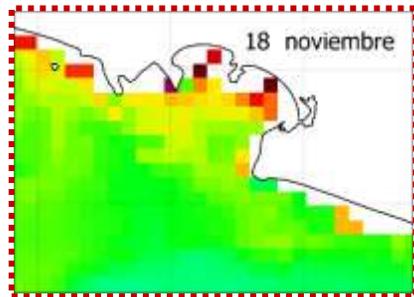
## 8.25 FAN ocurrido del 31 octubre-27 noviembre de 2013

Composición de especies: *Gymnodinium catenatum*, *Dinophysis* sp. y *Margalefidinium catenatum*

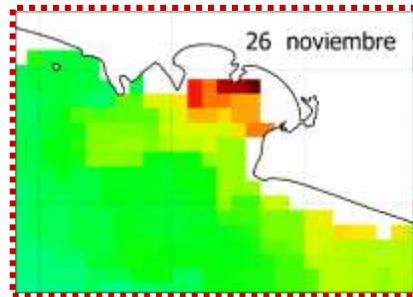
Rango de Cl-a de 1 a 10 días: 0.6 mg/m<sup>3</sup>

Rango de TSM de 1 a 10 días: 2.8°C

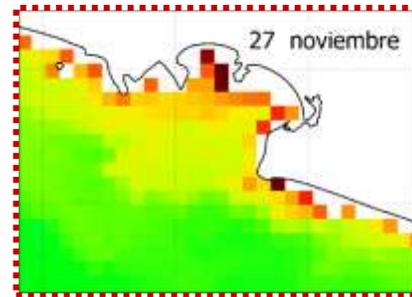




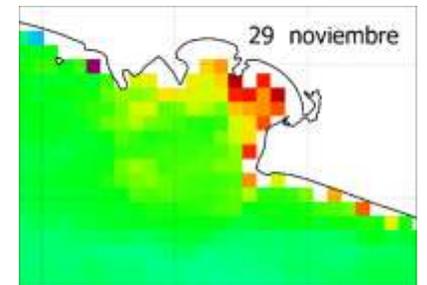
1.2 mg/m<sup>3</sup>



1.1 mg/m<sup>3</sup>

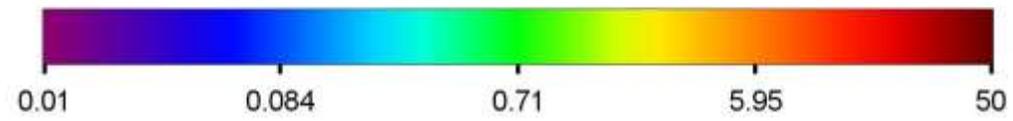


1.4 mg/m<sup>3</sup>



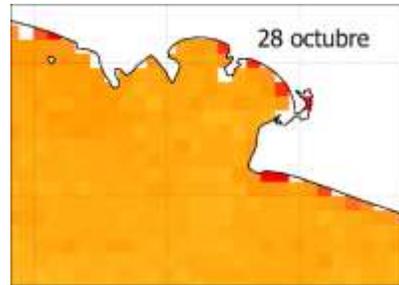
0.8 mg/m<sup>3</sup>

**Concentración de clorofila-a (mg/m<sup>3</sup>)**





TSM=30°C



TSM=30.4°C



TSM=30°C



TSM=30.9°C



TSM=31.3°C



TSM=32°C

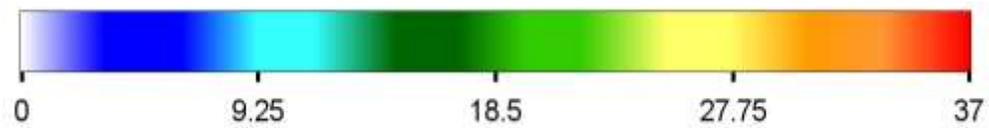


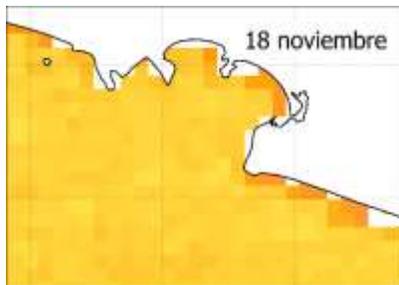
TSM=30.7°C



TSM=29.7°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

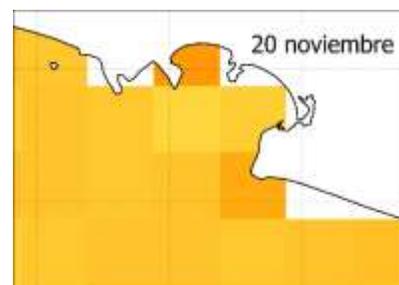




TSM=29.1°C



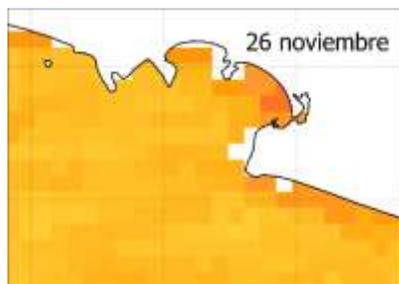
TSM=29.4°C



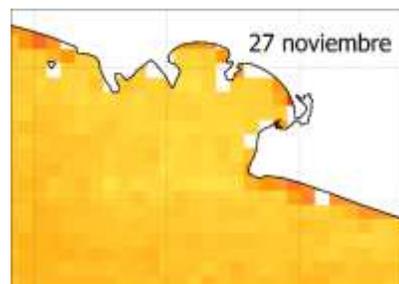
TSM=29.3°C



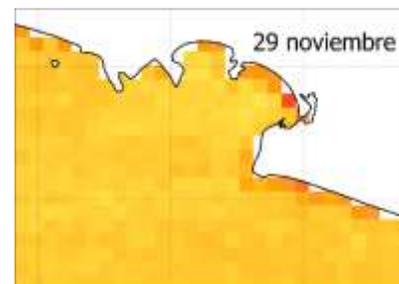
TSM=30°C



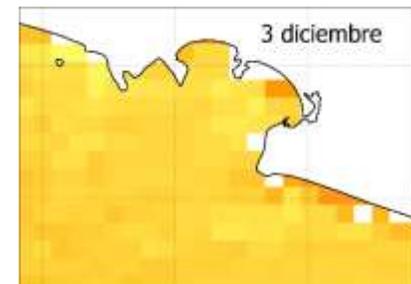
TSM=29.9°C



TSM=28.9°C



TSM=29.2°C



TSM=28.9°C

**Temperatura Superficial del Mar (°C)**

