



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES HISTÓRICAS
ASOCIADAS A LOS FLORECIMIENTOS DE ALGAS NOCIVAS EN EL
SECTOR COSTERO DE LA REGIÓN DE LOS LAGOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

MARÍA ESPERANZA CEA MARTÍNEZ

PROFESORA GUÍA:
CAROLINA MERUANE NARANJO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER
ANA LUCÍA PRIETO SANTA

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
POR: MARÍA ESPERANZA CEA MARTÍNEZ
FECHA: 2018
PROF. GUÍA: CAROLINA MERUANE NARANJO

CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES HISTÓRICAS ASOCIADAS A LOS FLORECIMIENTOS DE ALGAS NOCIVAS EN EL SECTOR COSTERO DE LA REGIÓN DE LOS LAGOS

Las floraciones de algas nocivas (FAN) corresponden a la reproducción explosiva de microalgas que conlleva efectos negativos a diferentes sectores como la pesca, turismo, salud, entre otros. Estas algas pertenecen a la microflora planctónica capaces de liberar toxinas que causan efectos negativos. Por ejemplo, los dinoflagelos tienen veneno paralizante (VPM) o diarreico (VDM) y las diatomeas veneno amnésico (VAM). Los factores que favorecen su crecimiento son de diversa índole, por una parte se le atribuye al traslado de moluscos, cambio climático y fuentes antropogénicas; y por otro, a factores físicos y químicos como la lluvia, el viento, la luz, los nutrientes y la temperatura. En Chile, los eventos de FAN se han visto con mayor frecuencia y amplitud geográfica durante las últimas décadas, por lo que resulta razonable caracterizar las condiciones ambientales históricas asociadas a estos eventos en un sector particularmente sensible del país como la región de Los Lagos.

Para lo anterior, en base a una revisión bibliográfica se elaboró un modelo conceptual para representar el crecimiento del fitoplancton en la zona de estudio, en donde se identificaron los forzantes del sistema. Posteriormente, se recopilaron los registros de estos forzantes en los servicios públicos del Estado de Chile, los que se analizaron en detalle para la fecha de ocurrencia de los FAN. Estas fechas se determinaron mediante una revisión de la información publicada en la prensa local y los registros históricos de la Seremi de Salud de la región. Luego se analizó un evento ocurrido el año 2016, evento particularmente intenso y con importantes consecuencias socio ambientales. A partir de este análisis, se definieron 3 hipótesis que podrían explicar la ocurrencia de FAN en la región de estudio: 1) la ocurrencia de tormentas y el consecuente aumento del caudal de los ríos afluentes, podría traer condiciones favorables a los florecimientos de microalgas, debido al arrastre de nutrientes desde el continente hacia la costa; 2) los fuertes vientos provocarían mezcla vertical de la capa superficial con la capa profunda, por lo que los nutrientes de esta última se elevarían favoreciendo el florecimiento de microalgas; 3) los FAN de la zona se desarrollan en años que predomina El Niño debido al aumento de la temperatura superficial del mar (TSM). Estas hipótesis se chequearon a través del análisis de los demás eventos.

De este análisis, se obtuvo que existe una relación de los forzantes caudal y viento con el aumento de la clorofila a; sin embargo, no se puede declarar qué forzante es más influyente en el sistema, debido a que en general se intensifican de forma simultánea durante una tormenta, y como resultado se observa un aumento o mantención de clorofila en el sistema. Dado lo anterior, se puede decir que la primera y segunda hipótesis podrían estar en lo cierto, pero se requieren mediciones para identificar el peso de cada forzante. En cuanto a la tercera hipótesis planteada, se puede decir que no está del todo correcta, debido a que se encontró que el 88% de los casos se desarrolla bajo El Niño o en transición La Niña a El Niño, los florecimientos de algas se desarrollan mayoritariamente en años de transición a El Niño o bajo este fenómeno, en donde la TSM es mayor que el promedio histórico.

A los tres pilares de mi vida: Hilda, Macarena y Natalia.

Agradecimientos

En mi paso por la facultad quisiera agradecer principalmente a las personas que estuvieron conmigo, sin su apoyo no hubiera sido posible.

En primer lugar, quisiera agradecer a mi familia: mi madre Hilda, quien ha dado todo por sus hijas, y mis hermanas, Macarena y Natalia, sinceramente no podría tener mejores hermanas. Las tres con su amor, palabra y ejemplo me han enseñado prácticamente todo lo que sé. Sin su apoyo mi paso por la universidad (y vida) hubiera sido tremendamente diferente. A mis sobrinos: Pedro, Blanca, Pía y Edmundo quienes me contagian de su inmensa alegría y cariño. A mis cuñados: Mauricio y Pedro por su inmenso apoyo y la certeza de sus palabras.

También quisiera agradecer enormemente a la profe Carolina, por la extraordinaria cantidad de tiempo dedicada a mi trabajo, infinita paciencia y excelente disposición a enseñar, resolver dudas y guiar. Su apoyo fue fundamental e hizo que todo fuera más simple. Al profe Beto por su buena disposición y correcciones al trabajo.

Además, quisiera agradecer a mis amigos que son parte esencial de mi vida. A la Pau, (MADCLH7) mi amiga del alma, gracias por tu apoyo y el simple hecho de estar SIEMPRE. A la Diana gracias por el apañe y la confianza. A mis civiles: Pipon, Dani, Ro, Alo, Diego y Pame, gracias por los almuerzos, carretes, antisuicidios, paseos civiles, días de estudio, conversaciones entre clase, en fin... todas las vivencias compartidas. A las Lolitas por incluirme en su maravilloso grupo. Son mujeres excepcionales, por lo que me honra compartir con Uds. y agradezco su soporte femenino dentro de esta facultad. A los civiles post-intercambio: Feña y Max, gracias por su amistad durante mis últimos años de u. A los cabros de la pecera por el constante ánimo durante esta última etapa, mención honrosa al Borat, Dimi y Meli. A la Jacque por la buena onda y alegría que entrega al tercero. Hicieron que recuerde con cariño mi paso por la u.

Finalmente me gustaría simplemente agradecer a Beauchef, donde conocí personas maravillosas con fines comunes a los míos, me resulta imposible nombrarlas en su totalidad. Igualmente agradezco el continuo aprendizaje que me entregó en diversos ámbitos.

Tabla de contenido

CAPÍTULO 1	: INTRODUCCIÓN	1
1.1	MOTIVACIÓN	1
1.2	OBJETIVOS	3
1.2.1	<i>General</i>	3
1.2.2	<i>Específicos</i>	3
1.3	ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	3
CAPÍTULO 2	: REVISIÓN DE ANTECEDENTES	4
2.1	DEFINICIÓN DE FAN	4
2.2	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	4
2.2.1	<i>Temperatura y salinidad</i>	6
2.2.2	<i>Oxígeno disuelto, pH y nutrientes</i>	6
2.2.3	<i>Clorofila a</i>	7
2.2.4	<i>Síntesis de la información de calidad de aguas</i>	8
2.3	FAN EN LOS LAGOS	8
2.4	EVENTO VERANO-OTOÑO 2016	9
2.5	IMÁGENES MODIS	11
CAPÍTULO 3	: METODOLOGÍA	13
3.1	MODELO CONCEPTUAL	13
3.2	OBTENCIÓN DE LOS REGISTROS DE PARÁMETROS Y FECHAS FAN	15
3.2.1	<i>Parámetros</i>	15
3.2.2	<i>Fechas FAN</i>	18
3.3	ANÁLISIS DE LOS DATOS	19
3.3.1	<i>Caudales</i>	19
3.3.2	<i>Velocidad del viento</i>	20
3.3.3	<i>Temperatura superficial del mar</i>	21
3.3.4	<i>Oxígeno disuelto y nutrientes</i>	22
3.3.5	<i>Clorofila a</i>	23
3.4	BÚSQUEDA DE PATRONES	25
CAPÍTULO 4	: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
4.1	CARACTERIZACIÓN DEL EVENTO VERANO-OTOÑO 2016	28
4.2	CARACTERIZACIÓN DEL RESTO DE LOS EVENTOS	33
4.2.1	<i>Evento 2009</i>	34
4.2.2	<i>Evento 2006</i>	39
4.2.3	<i>Evento 2002</i>	43
CAPÍTULO 5	: CONCLUSIONES	50
	BIBLIOGRAFÍA	52
	ANEXOS	57

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Rangos de concentración de clorofila en los canales australes (Ramirez & Pizarro, 2005).....	7
Tabla 2.2: Resumen de las principales características de la calidad de aguas de la zona de estudio (Elaboración propia).	8
Tabla 2.3: Resultados de análisis de toxicidad positivos (Modificado de Instituto de Salud Pública de Chile, 2013).	11
Tabla 2.4: Nivel de procesamiento de los productos de MODIS (Muñoz, 2018).	12
Tabla 3.1: Parámetros y sus respectivas fuentes de información (Elaboración propia).	15
Tabla 3.2: Valores coeficientes para OCx. (Adaptado de Nasa, 2018).	18
Tabla 3.3: Respuesta Solicitud N° 3522 Folio AO002T0001493 (Seremi de Los Lagos, 2017)..	19
Tabla 3.4: Resumen fechas FAN encontradas en la prensa (Elaboración propia en base a datos de Emol y La estrella de Chiloé).	19
Tabla 3.5: Resumen de los parámetros analizados y sus estaciones.	25
Tabla 4.1: Fechas de FAN a estudiar (Modificado de SEREMI de Los Lagos y prensa nacional).	26
Tabla 4.2: Promedio mensual clorofila a porcentual (Elaboración propia en base a imágenes MODIS mensuales de clorofila a).	28
Tabla 4.3: Caracterización de la fecha de las tormentas del evento 2016.	31
Tabla 4.4: Resumen carácter niño/niña/transición del año FAN.	34
Tabla 4.5: Caracterización de la fecha de las tormentas del evento 2009.	35
Tabla 4.6: Caracterización de la fecha de la tormenta del evento 2006.	40
Tabla 4.7: Resumen de las forzantes y variable de estado para cada tormenta.	46
Tabla 4.8: Criterios para definir intensidad de los forzantes.	47
Tabla 4.9: Resumen de combinaciones para todos los eventos.	48
Tabla 4.10: Porcentajes de ocurrencia para las combinaciones de forzantes existentes.	48

Índice de Figuras

Figura 1.1: Foto satelital de la zona de estudio (Modificado de Google Maps).....	2
Figura 2.1: Imagen satelital de la zona de estudio (Modificado de Google Maps).....	5
Figura 2.2: Topografía submarina del área entre Puerto Montt y el golfo Corcovado (Rodrigo, 2006).....	5
Figura 2.3: Esquema de los diferentes tipos de estructuras de salinidad y temperatura para los canales y fiordos australes chilenos (Sievers, 2006).	6
Figura 2.4: Ciclo de vida Alexandrium, Dinoflagelado con enquistamiento (1) banco de quistes, fuente de un futuro florecimiento. Etapa de germinación (2). División celular (3), meiosis. Formación de gametos (4) inicio de la reproducción sexual. Fusión y formación de cigoto (5) para posterior enquistamiento (Sellner et al., 2003).	9
Figura 2.5: Moluscos contaminados por marea roja Chiloé 2016 (BBC Mundo, 2016).....	10
Figura 3.1: Esquema de las etapas principales de la metodología (Elaboración propia).	13
Figura 3.2: Esquema del Modelo Conceptual que rige el florecimiento de algas nocivas (Elaboración propia).	15
Figura 3.3: Imagen satelital de estaciones fluviométricas de las cuales se descargó información (Modificado de Google Maps).	16
Figura 3.4: Imagen satelital de estaciones velocidad de viento (Modificado de Google Maps)...	17
Figura 3.5: Serie de tiempo de caudales para las estaciones: Río Chamiza ante río Chico, Río Chico ante río Chamiza, Río Puelo y Río Grande (Elaboración propia en base a datos de DGA).	20
Figura 3.6: Serie de tiempo de velocidades de viento para las estaciones: Butalcura, Canelos, Tara y Huyar (Elaboración propia en base a datos de INIA).....	21
Figura 3.7: Serie de tiempo de velocidad del viento estación Tepual (Elaboración propia en base a datos del DMC).	21
Figura 3.8: Serie de tiempo de temperatura superficial del mar para las estaciones: Castro, Ancud, Melinka y Puerto Montt (Elaboración propia en base a datos del SHOA).....	22
Figura 3.9: Series de tiempo de nitrato, nitrito, fosfato y oxígeno disuelto en las estaciones Castro y Puerto Montt (Elaboración propia en base a datos del proyecto P.O.A.L.).	23
Figura 3.10: Imagen MODIS mensual de clorofila a para diciembre del 2016. (Elaboración propia en base a imágenes MODIS mensuales de clorofila a).	24
Figura 3.11: Imagen MODIS diaria de clorofila a, 16 de noviembre del 2008. (Elaboración propia en base a imágenes MODIS diarias de clorofila a).	24
Figura 4.1: Concentración porcentual de clorofila a mensual desde el 2002 hasta 2016 (Elaboración propia en base a imágenes MODIS mensuales de clorofila a).....	27
Figura 4.2: Concentración porcentual de clorofila a mensual. Los valores indican el máximo y mínimo de clorofila durante el mes para la serie de años del 2002 al 2016, en rojo se ve la media del mes (Elaboración propia en base a imágenes MODIS mensuales de clorofila a).	27
Figura 4.3: Vista anual evento verano-otoño 2016. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).	29
Figura 4.4: Evento verano-otoño 2016, vista noviembre-abril. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).	30
Figura 4.5: Imágenes MODIS de clorofila a diarias para diferentes fechas del evento 2016. En rojo oscuro se resaltan las zonas con concentraciones iguales o mayores a 10 mg/m ³ de clorofila a.	32
Figura 4.6: Anomalía de Temperatura Superficial del Mar el niño 3.4 histórico, remarcado evento 2016. (Modificado de (Earth Institute, Columbia University, 2017)).	33

Figura 4.7: Anomalía de Temperatura Superficial del Mar el niño 3.4 histórico, remarcando total de los eventos (Modificado de Earth Institute, Columbia University, 2017).	34
Figura 4.8: Evento 2009, vista anual. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).....	36
Figura 4.9: Evento 2009, vista noviembre-abril. En gris se destacan los eventos de importancia (Fuente: Elaboración propia).	37
Figura 4.10: Imágenes MODIS de clorofila a diarias para diferentes fechas del evento 2009. En rojo oscuro se resaltan las zonas con concentraciones iguales o mayores a 10mg/m ³ de clorofila a.	38
Figura 4.11: Imágenes MODIS de clorofila a diarias para diferentes fechas del evento 2009. En rojo oscuro se resaltan las zonas con concentraciones iguales o mayores a 10mg/m ³ de clorofila a.	39
Figura 4.12: Evento 2006, vista anual. En gris se destacan los eventos de importancia (Fuente: Elaboración propia).	41
Figura 4.13: Evento 2006, vista noviembre-abril. En gris se destacan los eventos de importancia (Fuente: Elaboración propia).	42
Figura 4.14: Evento 2002, vista anual. En gris se destacan los eventos de importancia (Fuente: Elaboración propia).	44
Figura 4.15: Evento 2002, vista noviembre-abril. En gris se destacan los eventos de importancia (Fuente: Elaboración propia).	45
Figura 4.16: Combinaciones de forzantes divididas por el comportamiento de la clorofila a para el mes de la tormenta.	49

Capítulo 1: Introducción

1.1 Motivación

Las floraciones de algas nocivas (FAN) afectan con regularidad las costas del extremo austral de Chile. Su frecuencia y amplitud geográfica ha ido en aumento durante las últimas décadas (Lembeye, 2006) llegando a la zona de estudio, la región de Los Lagos, ubicada en el extremo austral del país como se ve en la Figura 1.1.

Se define como FAN a los eventos de carácter tóxico o nocivo producidos por microalgas, *Dinophysis acuta* y *Alexandrium catenella*, las cuales, a su vez, producen veneno diarreico de mariscos (VDM) y veneno paralizante de mariscos (VPM) (Clément et al., 1999). Causando efectos negativos tanto en sectores productivos como el turismo, la acuicultura, las actividades pesqueras, como en la salud pública (Clément & Lembeye, 1994). En algunos casos estos eventos se conocen como marea roja y constituyen eventos naturales en todos los océanos.

La eutroficación costera corresponde a la acumulación de residuos orgánicos en el litoral marino que causa la proliferación de ciertas algas. Dentro de las causas de ésta se cree que está el traslado de moluscos, transporte de quistes en aguas de lastre de barcos, el cambio climático y fuentes antropogénicas (Clément et al., 1999). Lembeye (2006) también establece que algunos factores físicos y químicos particulares que favorecen la producción de microalgas son los nutrientes, la temperatura, la luminosidad y las corrientes marinas. Por otra parte, Clément et al., (1999) indican que estos fenómenos dependen de la relación de diferentes factores biológicos, químicos y físicos, cuyo actuar es distinto en el tiempo y el espacio.

A pesar de lo anterior, en Chile no se tiene un plan para prevenir los FAN. El Plan Nacional Sobre Floraciones de Algas Nocivas en Chile de 1999, es el más actual del país y tiene como necesidad de investigación “desarrollar modelos predictivos de las floraciones nocivas, basadas en principios físicos, químicos y biológicos” (Clément et al., 1999). Además, el Programa Nacional de Vigilancia y Control de las Intoxicaciones por Fenómenos Algales Nocivos (“Marea Roja”) de 2008, declara que los programas implementados a nivel regional deben tener como objetivo principal la protección de la salud.

Lo anterior sumado a que es sabido que las floraciones de algas nocivas responden a una serie de condiciones ambientales, parece razonable entonces caracterizar las condiciones ambientales históricas asociadas a estos eventos en el sector costero de la región de Los Lagos.

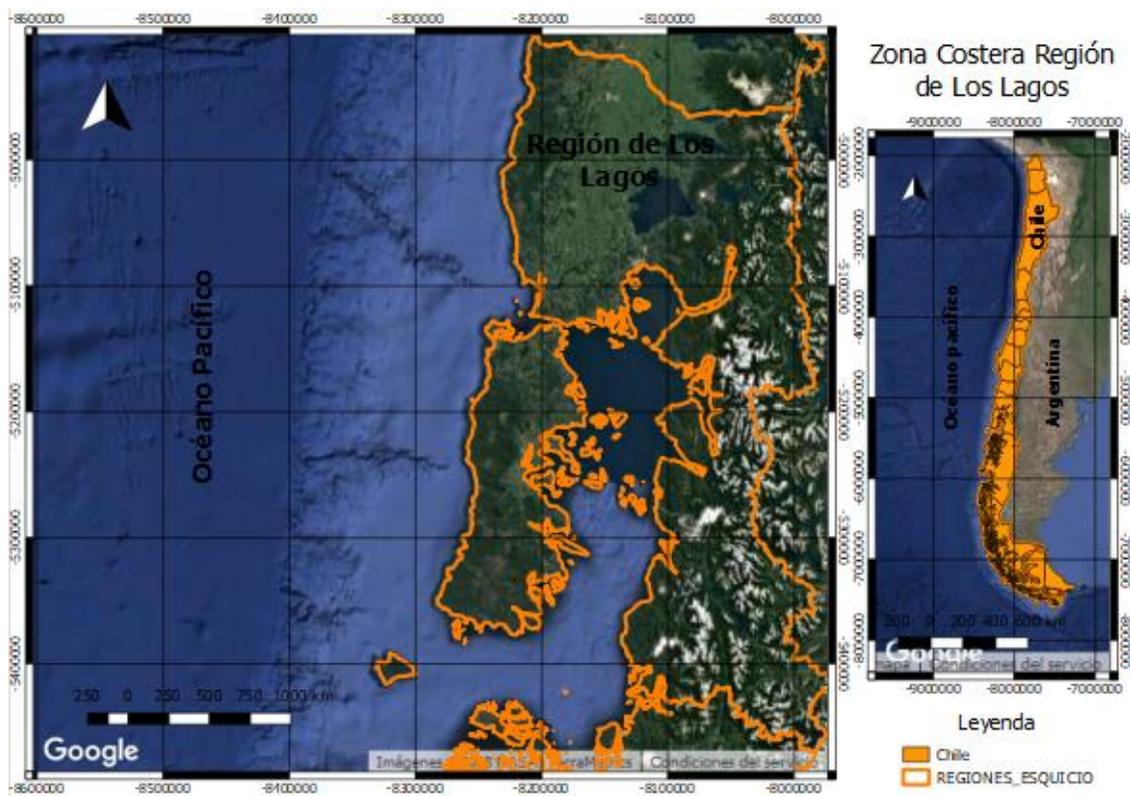


Figura 1.1: Foto satelital de la zona de estudio (Modificado de Google Maps).

1.2 Objetivos

1.2.1 General

El objetivo general de esta memoria es estudiar y caracterizar las condiciones ambientales históricas en la zona costera de la región de Los Lagos, para determinar los forzantes ambientales que modulan los florecimientos de algas nocivas.

1.2.2 Específicos

Las tareas a realizar para alcanzar el objetivo general corresponden a:

- 1) Revisión bibliográfica con el fin de formular un modelo conceptual de crecimiento de microalgas en la zona costera de la región de Los Lagos.
- 2) Recopilar información histórica de los forzantes ambientales a estudiar.
- 3) Estudiar los registros históricos de florecimiento de algas nocivas en la región de Los Lagos en base a: diarios locales, redes sociales, servicios públicos del Estado de Chile.
- 4) Caracterizar las condiciones ambientales que desencadenan el bloom de algas e identificar él o los forzantes que modulan esta respuesta.

1.3 Organización del documento

El informe se compone de cinco capítulos, a continuación se da una breve descripción del contenido de cada uno:

- Capítulo 1. Introducción: Se presenta la motivación para realizar esta memoria, el objetivo general y los específicos y la estructura del informe.
- Capítulo 2. Revisión de antecedentes: En este capítulo se expone la revisión de antecedentes, dándole énfasis a la descripción de los florecimientos de algas nocivas, la zona de estudio, su relación con los FAN y la descripción del evento verano-otoño 2016.
- Capítulo 3. Metodología: Se explica el modelo conceptual a utilizar, la forma en que se obtuvieron y analizaron los datos para determinar los forzantes que se estudian, finalizando con una explicación del proceso de búsqueda de patrones.
- Capítulo 4. Resultados y discusión: Primero se exponen los resultados del evento verano otoño 2016 donde se plantean 3 hipótesis que se verifican mediante la revisión de los demás eventos importantes, analizando en profundidad cada uno de ellos.
- Capítulo 5. Conclusiones: Se dan a conocer las principales conclusiones con respecto a los forzantes estudiados y a las hipótesis plantadas en el capítulo anterior.

Capítulo 2: REVISIÓN DE ANTECEDENTES

2.1 Definición de FAN

La expresión Floración Algal Nociva (FAN) o Harmful Algal Bloom (HAB) en inglés, se utiliza para la reproducción de microalgas cuyos efectos son dañinos para diferentes sectores, como por ejemplo: las explotaciones de acuicultura y turismo de las zonas costeras, los organismos acuáticos y la salud humana. El término anterior se obtiene de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO (1992) y es atribuible a cualquier proliferación de microalgas, cuando ésta traiga consigo un efecto negativo a pesar de no tener una concentración celular elevada (Comité Oceanográfico Nacional, Comisión Nacional del Medio Ambiente y Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile., 1999).

De acuerdo a Salgado (2011) existen tres tipos de FAN. Los primeros, provocados generalmente por diatomeas, los cuales causan daños físicos (asfixia debido a la elevada concentración de mucus). Por otro lado, están los FAN generados por especies no tóxicas que debido a sus elevadas concentraciones pueden agotar el oxígeno y los nutrientes (Smayda, 1997), además contienen pigmentos que cambian el color del agua (rojo, café, verde, pardo). En último caso están los provocados por especies tóxicas que secretan toxinas, las cuales contaminan a los mariscos pudiendo provocar daños a la salud humana.

Las microalgas que producen FAN son parte de la microflora planctónica cuyo efecto nocivo se puede deber principalmente a toxinas. Como es el caso de los dinoflagelados, culpables de los venenos paralizante (VPM), diarreico (VDM) y las diatomeas encargadas del amnésico (VAM). Estos venenos pueden entrar en la cadena trófica por medio de organismos marinos cuya labor consta en filtrar microalgas, un ejemplo de ellos son los mariscos bivalvos, si estos son consumidos por humanos originan daños a la salud e incluso la muerte (Lembeye, 2006).

Existen diversos factores que favorecen la proliferación de microalgas determinando el desarrollo de una FAN. Estos factores se pueden dividir en dos grandes grupos: a) mecanismos físicos (lluvia, vientos, estratificación de la columna de agua) que benefician la aglomeración de células en sectores definidos del océano, y b) aumento del crecimiento biológico de microalgas inducido por temperatura, luz, salinidad y nutrientes (Suárez & Guzmán, 1999). Por su parte Sellner et al. (2003) atribuyen dos factores primordiales a estos eventos: procesos naturales como la surgencia y la escorrentía y la carga antropogénica que puede llevar a eutroficación.

2.2 Caracterización de la zona de estudio

La zona de estudio corresponde al sector costero de la décima región de los Lagos, Chile. Esta región se ubica entre los 40,0° S y los 44,5° S, desde el límite con la República Argentina hasta el Océano Pacífico (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2017).

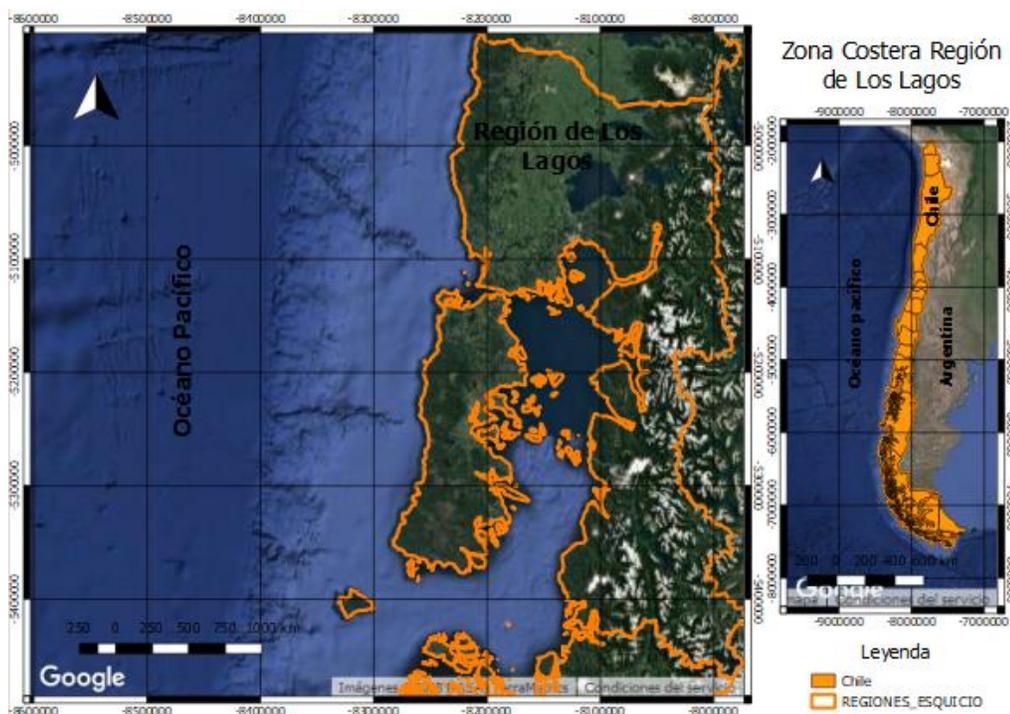


Figura 2.1: Imagen satelital de la zona de estudio (Modificado de Google Maps).

En la Figura 2.2 se presentan los sectores de interés como el seno de Reloncaví, el golfo de Ancud, el estero Comau, el estero Riñihue, el golfo Corcovado, la boca del Huafo, entre otros. Además se aprecian las zonas más profundas del área destacadas en color azul, sus profundidades son mayores a los 300 m y corresponden a los sectores del Seno de Reloncaví y golfo de Ancud. En el área se producen depresiones angostas o canales con direcciones noroeste-sureste (Rodrigo, 2006).

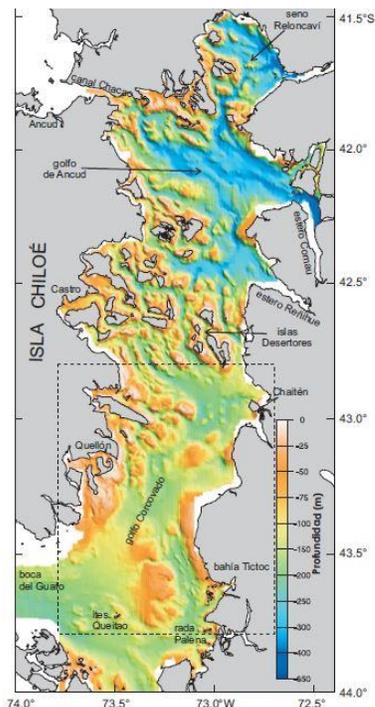


Figura 2.2: Topografía submarina del área entre Puerto Montt y el golfo Corcovado (Rodrigo, 2006).

2.2.1 Temperatura y salinidad

Los fiordos, golfos y canales presentan diferentes estructuras de temperatura en la columna de agua. Debido a las condiciones de borde, por una parte, del océano cuya principal forzante es la radiación y por otra las condiciones estuarinas que, dependiendo de la época, aportan agua dulce y más fría (invierno) o agua dulce más cálida (verano). También existen casos de intrusión, donde agua más profunda con otras características térmicas, se superpone a niveles intermedios provocando cambios a la columna de agua (Sievers, 2006).

Generalmente la temperatura se distribuye a lo largo de la vertical en dos capas, la profunda con una distribución casi uniforme de temperatura y la capa superior, de aproximadamente 20-30 m de profundidad, donde la temperatura varía entre una serie de máximos y mínimos como resultado de diversos factores. Estos factores corresponden a aportes de aguas a diferentes temperaturas provenientes de ríos y glaciares, precipitaciones, escurrimiento costero, radiación solar, advección de aguas oceánicas, mezcla vertical por el viento (Sievers, 2006).

La salinidad también se estructura en dos capas, al igual que la temperatura. Una capa superficial de 15-20 m, donde la salinidad es baja alcanzando valores menores a 1 psu en condiciones extremas. Posteriormente se encuentra una haloclina que divide ambas capas, la salinidad en la capa profunda va aumentando, aunque existen casos donde se ven condiciones homosalinas (Sievers, 2006).

A continuación, se muestran los diferentes perfiles de salinidad y temperatura definidos por Sievers (2006) para los diferentes canales y fiordos australes chilenos.

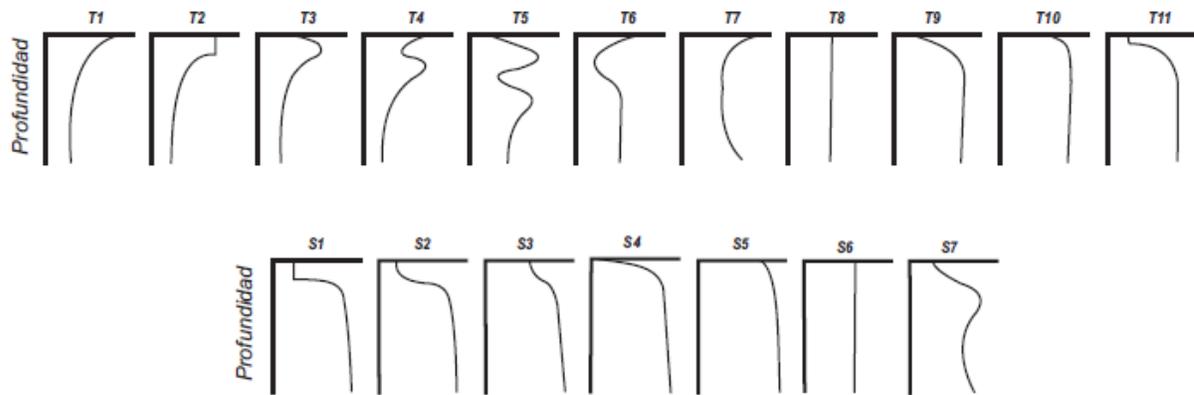


Figura 2.3: Esquema de los diferentes tipos de estructuras de salinidad y temperatura para los canales y fiordos australes chilenos (Sievers, 2006).

2.2.2 Oxígeno disuelto, pH y nutrientes

El oxígeno presenta, por lo general, una estructura de dos capas. Una superficial hasta los 30-50 m con un 100-130% de saturación, 5-8 ml/l y pH alto de 8-8,3 y otra capa profunda con concentraciones de oxígeno menores llegando a valores de 3-4 ml/l, 40-50% de saturación, a la vez el pH también es menor 7,4-7,7. Existe un alto gradiente de oxígeno disuelto y pH entre ambas capas, lo que origina la presencia de una oxivlina y pHclina de intensidad variable (Silva, 2006).

Para el caso de los nutrientes, fosfato y nitrato, también se tiene dos capas con la presencia de fosfoclina y nitratoclina respectivamente, entre las capas. En la superficial se encuentra baja concentración de ambos nutrientes (0-0,076 mg/l de fosfato y 0-0,496 mg/l de nitrato), en la capa profunda, de los 75 m al fondo, las concentraciones aumentan (0,114-0,228 mg/l de fosfato y 0,744-1,488 mg/l de nitrato) (Silva, 2006).

De acuerdo a Silva (2006) en la zona profunda de fiordos y canales se ubican las mayores concentraciones de fosfato y nitrato, además de valores bajos de pH y oxígeno disuelto. Valores altos de fosfato y nitrato, 0,19 y 1,24 mg/l respectivamente, se encuentran en la zona norte de los esteros Reñihue y Comau.

El amonio se presenta en tres capas, una superficial con bajas concentraciones (<0,0085 mg/l), una subsuperficial desde los 25-100 m donde se tienen las mayores concentraciones de este nutriente (0,0085-0,0425 mg/l) y finalmente una capa profunda con bajas concentraciones (< 0,0034 mg/l) donde incluso se tienen concentraciones bajo el nivel de detección (Silva, 2006).

El silicato tiene un comportamiento similar al fosfato y nitrato donde existen dos capas, una superficial con bajas concentraciones (0-0,736 mg/l) y una profunda con concentraciones mayores (0,736-2,21 μ M), también se genera una silicoclina entre capas debido al rápido aumento de este nutriente con la profundidad. Pero en las zonas con aporte importante de agua dulce proveniente de ríos o glaciales, es decir en canales, senos, fiordos, golfos y esteros, se forma una delgada capa superficial con alta concentración de este nutriente (1,84-9,2 mg/l), de esta forma se tiene una estructura con tres capas. Luego de esta delgada capa se tiene una de 2 a 5 m de espesor con concentraciones mínimas (0,368-0,92 mg/l) restante de la capa superficial oceánica, luego las concentraciones vuelven a aumentar con la profundidad (Silva, 2006).

Con respecto a las fuentes del fosfato, y nitrato se puede decir que la más contribuyente corresponde al mar en sí mismo, pues las aguas dulces provenientes de glaciales, ríos y lluvias son pobres en estas concentraciones (0 a 0,114 mg/l de fosfato y 0 a 0,124 mg/l de nitrato). Distinto es al hablar del silicato ya que las aguas dulces son ricas en este nutriente (3,68 a 13,8 mg/l) por lo que se consideran un aporte significativo a la capa superficial (Silva, 2006).

2.2.3 Clorofila *a*

En primer lugar, se expone la Tabla 2.1 donde se muestran los rangos según las concentraciones de clorofila *a* en canales australes:

Tabla 2.1: Rangos de concentración de clorofila en los canales australes (Ramírez & Pizarro, 2005)

Clasificación	Clorofila <i>a</i> [mg/m ³]
Muy baja	≤0,5
Baja]0,5-1,5]
Moderada]1,5-5]
Alta]5-10]
Muy alta	>10

Las zonas del seno Reloncaví y golfo de Ancud presentan concentraciones abundantes de clorofila que van desde 1,5 a 5 mg/m³ ubicadas en los primeros 25 m de columna de agua. Mientras que el golfo Corcovado presenta concentraciones bajas (Ramírez y Pizarro 2005).

2.2.4 Síntesis de la información de calidad de aguas

En base a la información descrita en las subsecciones anteriores, en la Tabla 2.2 se resumen las características de la columna de agua propia de la zona de estudio.

Tabla 2.2: Resumen de las principales características de la calidad de aguas de la zona de estudio (Elaboración propia).

Parámetro	Capa Superficial		Capa Profunda	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
OD	8 ml/l	5 ml/l	4 ml/l	3 ml/l
Temperatura	Variable con máximos y mínimos		Homotermal	
Salinidad	Baja ~ 1spu		En aumento	
Fósforo	Baja ~ 0-0,8 μM		Alta 1,2-2,4 μM	
Nitrógeno	Baja 0-8 μM		Alta 12-24 μM	
Amonio	3 capas. Intermedia con mayor concentración ~0,5-2,5 μM			

2.3 FAN en Los Lagos

Según Clément et al. (2006) la existencia de la microalga *Pseudochattonella verruculosa* (*Dictyochophyceae*) no es novedad en las costas chilenas. Esta alga fue analizada por primera vez el 2004 y como floración el 2005, 2009 y 2011, donde abarcó un área limitada a la región de Los Lagos (Mardones et al., 2010).

Desde 1972 se conoce la existencia de *Alexandrium catenella* y su toxicidad. Desde ese entonces las concentraciones de VPM se han difundido por los canales y fiordos del sur de Chile, comenzando en el sur de Magallanes (55°S) hasta el centro-sur de la isla de Chiloé (41°S). Las floraciones más importantes de esta especie han ocurrido entre las regiones de Aysén y Los Lagos en los años 2002, 2006 y 2009 (Comisión Marea Roja, 2016). Siendo el evento del 2002 el primero de la región de Los Lagos (Molinet et al., 2016), aunque las mayores concentraciones de *A. catenella* (de 6.000 células ml^{-1}) se registraron en el año 2009 donde mayoritariamente abarcó la región de Aysén y el extremo sur de la isla de Chiloé (Mardones et al., 2010).

Suárez y Guzmán (1999) establecen que son dos las especies tóxicas que mayoritariamente reproducen FAN en Chile, estas son del género *Alexandrium* y *Dynophysis*. Estas últimas son aproximadamente 2000 especies (60 tóxicas) de forma esferoidal y con diámetro de 5 milésimas de milímetro a 2 mm, tienen dos flagelos que al coordinarse dan su movimiento en espiral, otras características de esta especie son: 1) tener un ciclo de vida con fases móviles y en reposo, 2) ser fotosintéticos, 3) elaborar floraciones mono-específicas y 4) ser estuarinos o neríticos. Los dinoflagelados son autótrofos y heterótrofos, por lo que son un grupo concerniente a fitoplancton y a microzooplancton (Saldado, 2011; Schnepf & Elbrächter, 1999).

Con respecto al ciclo de vida de esta especie se puede decir que la forma reproductiva más importante es la división asexual; sin embargo, también se le atribuye la reproducción sexual (Salgado, 2011; Joyce, 2004).

A continuación, se describe brevemente el ciclo de vida de los dinoflagelados. En condiciones ambientales desfavorables provocan el inicio de la reproducción sexual y la formación de gametos (Salgado, 2011; Persson et al., 2008), posteriormente se forma una célula biflagelada longitudinalmente (planocigoto) que pierde sus flagelos transformándose en un quiste de resistencia bentónico (hipnocigoto), estos sedimentan formando bancos de quistes que son la fuente de futuras floraciones, en esta etapa entran al periodo de latencia obligatorio (PLO) (Salgado, 2011; Montresor & Marino, 1996; Kremp, 2000) donde maduran (Salgado, 2011; Von Stosch, 1973; Blackburn et al., 1989) y no germinan aunque se presenten las condiciones ambientales favorables (Hallegraeff et al., 1998). Eventualmente, germinan en su estado quiescente donde esperan las condiciones adecuadas para su exquistamiento y conversión a gran célula diploide (planomeiocito), la cual se reproduce asexualmente por división meiótica comenzando el ciclo nuevamente.

A la vez, el ciclo de la especie *Alexandrium catenella* consta de las mismas etapas ya que también pertenece a la familia de los dinoflagelados. En la Figura 2.4 se expone un esquema con el ciclo de vida de esta especie.

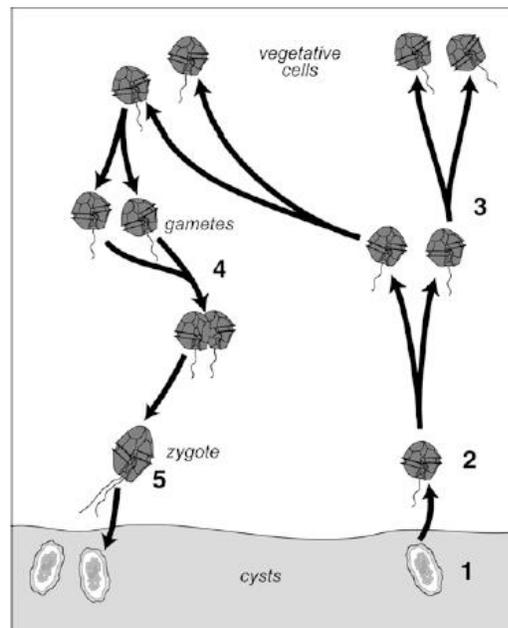


Figura 2.4: Ciclo de vida *Alexandrium*, Dinoflagelado con enquistamiento (1) banco de quistes, fuente de un futuro florecimiento. Etapa de germinación (2). División celular (3), meiosis. Formación de gametos (4) inicio de la reproducción sexual. Fusión y formación de cigoto (5) para posterior enquistamiento (Sellner et al., 2003).

2.4 Evento verano-otoño 2016

En el verano del 2016, específicamente, ocurrieron dos eventos sucesivos que causaron daños económicos y sociales en la región de Los Lagos. Las pérdidas de las floraciones resultaron en muerte de peces silvestres y cultivados, junto con moluscos contaminados con VPM. Pescadores de peces y mariscos, artesanales e industriales sufrieron graves daños financieros, provocando agitación social en toda zona (Anderson & Rensel, 2016). “Marea roja de algas tóxicas en Chile es segundo caso mayor del mundo” corresponde al titular de la noticia de la revista Aqua, indicando que es “el segundo fenómeno de floración de algas nocivas más grande

a nivel mundial después del de la costa oeste de Estados Unidos en 2015”. El biólogo marino experto en toxinas de la Universidad Católica del Norte, Gonzalo Álvarez, declaró el suceso como inédito dado que normalmente los eventos se localizaban en el mar interior del archipiélago de Chiloé o en los canales y fiordos, además el evento se propagó hasta la región de Los Ríos (Deutsche Welle, 2016).



Figura 2.5: Moluscos contaminados por marea roja Chiloé 2016 (BBC Mundo, 2016)

Dado lo anterior, queda en evidencia la relevancia de este evento en la zona de estudio, a la vez al ser un evento reciente se tiene bastante información. Por lo que describirlo en más detalle resulta fundamental para el estudio.

A lo largo de este evento se desarrollaron dos floraciones de diferentes microalgas. El primero emplazado en el mes de febrero donde se detectó una floración de *Pseudochatonella verruculosa*, la cual provocó una masiva mortandad de salmones en la región de Los Lagos. Luego, a fines del mismo mes se presenta una floración del dinoflagelado tóxico *Alexandrium catenella* que llega por primera vez a la región de Los Ríos. Además, se debe mencionar que a principios de abril, en Chiloé y otras zonas de la región, se detectaron mortalidades de peces, moluscos bivalvos y aves (Comisión Marea Roja, 2016).

Este evento se conoce como el más significativo de la región de Los Lagos debido a su extensión geográfica, magnitud e impacto socio-productivo. Como ya se menciona, son dos las especies responsables: *Pseudochatonella verruculosa* y *Alexandrium catenella*, que produjeron una masiva mortandad de salmones y el cierre preventivo de la extracción de mariscos, respectivamente. Este cierre incluyó a las regiones de Aysén, Los Lagos y Los Ríos por las altas concentraciones de VPM (Comisión Marea Roja, 2016).

La floración de *Alexandrium catenella* comprendió geográficamente desde el centro de la región de Aysén hasta la región de Los Ríos, a diferencia de floraciones anteriores este evento se desarrolló por la zona de la costa expuesta de Chiloé, constituyendo el primer registro en Chile de esta especie en aguas exteriores. Los primeros rastros de este evento se presentaron en noviembre y diciembre del 2015, localizándose en la zona centro-norte de Aysén. Pero en enero y principalmente febrero,

se encontraron concentraciones de *A. catenella* altas al sur de la isla de Chiloé. El evento no dejó de presentar niveles importantes de abundancia en ciertas localidades a pesar que en marzo su intensidad parecía disminuir (Comisión Marea Roja, 2016).

A continuación, se muestra la Tabla 2.3 donde se tienen los límites de los análisis de toxicidad, superior a estos o para el caso de VDM cuando resulta positivo es que se está en presencia de un molusco intoxicante.

Tabla 2.3: Resultados de análisis de toxicidad positivos (Modificado de Instituto de Salud Pública de Chile, 2013).

Tipo de veneno	Resultado análisis
VPM	$\geq 80 \mu\text{g}/100 \text{ g} = 80 \text{ g STX eq.}/100 \text{ g}$
VAM	$\geq 20 \mu\text{g}/100 \text{ g} = 20 \text{ g STX eq.}/100 \text{ g}$
VDM	Positivo

A finales del verano e inicio de otoño las concentraciones de VPM aumentaron significativamente en la costa Sur de la isla de Chiloé, donde a principios de enero las concentraciones eran apenas detectables (34 g STX eq./100g) pero en marzo se tuvieron concentraciones elevadas llegando a máximos de 657 g STX eq./100 g en el canal Yelcho. Durante la última quincena de marzo y la primera de abril parecía que el fenómeno iba en retroceso, pero sólo se mantuvo. Durante abril en la costa sur-este de Chiloé las concentraciones de VPM disminuyeron a diferencia de la costa sur-oeste donde se tienen registros de concentraciones de hasta 840 g STX eq./100 g carne. La concentración de VPM en el mes de abril aumentó exponencialmente, tanto que a fines de este mes los registros de abundancia celular de *A. catenella*, con escala del IFOP, se elevaron de “muy abundante” a “hiper abundante”. Esta abundancia llega a la región de Los Ríos y comienza a descender a mediados de mayo (Comisión Marea Roja, 2016).

Dado lo anterior, se evidencian dos etapas de florecimiento de *A. catenella*. La primera de carácter estival, desarrollada desde la zona centro de Aysén a finales del 2015, llegando hasta el sur de Chiloé a principios de marzo. La segunda etapa otoñal, se genera en el norte de Aysén los primeros días de abril y se extiende hasta la región de Los Ríos, es la primera vez que se ve un evento de este tipo en esa región del Pacífico (Comisión Marea Roja, 2016).

2.5 Imágenes MODIS

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) es un tipo de imagen obtenida por dos satélites diferentes Terra (EOS AM-1) lanzado en 1999 por la NASA y Aqua (EOS PM-1) lanzado por la misma institución el 2002. Ambos rodean la tierra cada dos días, Terra va de norte a sur pasando por el ecuador en la mañana mientras que Aqua va en sentido contrario, por lo que cruza el ecuador en la tarde. Estos satélites utilizan 36 bandas espectrales que se mueven en una longitud de onda de 0,4 μm a 14,4 μm gracias a las cuales adquieren los datos para sus productos (NASA, 2017).

MODIS corresponde a un conjunto variado de imágenes con post-procesamiento, es decir, los datos de radiancia se someten a procesos llamados algoritmos bajo los cuales se logra obtener o corregir información adicional. Sus productos se dividen según dos grandes criterios, el primero corresponde al tipo de parámetro extraído, tales como temperatura superficial del mar, carbono inorgánico particulado, evapotranspiración, clorofila *a*, agua precipitable, cobertura nival, entre otros. El segundo criterio es el nivel de procesamiento Tabla 2.4 (Muñoz Retamal, 2018).

Tabla 2.4: Nivel de procesamiento de los productos de MODIS (Muñoz, 2018).

Procesamiento	Descripción
Level 0	Datos MODIS en bruto. En su resolución original y ordenados temporalmente.
Level 1	Observaciones Level 0 a los cuales se les aplica algoritmos radiométricos para producir irradiancia en la resolución original de MODIS. Se almacena la geolocalización de los datos, calibración de los datos, etc.
Level 2	Parámetros geofísicos son recuperados del Level 1 mediante la aplicación de algoritmos para parámetros geofísicos. Los datos están en la misma resolución y localización que en el Level 1.
Level 3	Correcciones geométricas al Level 2, el cual ha sido puesto en grilla y han sido temporalmente sobrepuestas. Los datos son definidos sobre un sistema de coordenadas conocidos.
Level 4	Son datos que se generan a través de modelos o análisis de resultados de los parámetros en un Level inferior.

La detección de niveles anómalos de clorofila *a* por medio de la aplicación de datos de percepción remota es un método relativamente nuevo y que podría indicar un FAN (Stumpf et al., 2003; Miller et al., 2006; Gohin et al., 2008; Shutler et al. 2012).

Capítulo 3: Metodología

En este capítulo se describe la metodología utilizada para caracterizar las condiciones ambientales históricas asociadas a los FAN, de acuerdo a las siguientes etapas:



Figura 3.1: Esquema de las etapas principales de la metodología (Elaboración propia).

3.1 Modelo Conceptual

En esta sección del informe se especificarán las posibles forzantes y sus relaciones con el sistema (floreCIMIENTO de algas nocivas) en base a la literatura existente.

El resultado de este modelo corresponde al crecimiento de fitoplancton, que representa la variable de estado medida por medio de la clorofila *a*. Para desencadenar este crecimiento, por otra parte, se requiere una serie de forzantes que se pueden dividir en físicos y fisicoquímicos.

En la sección 2.3 se estableció que la reproducción asexual de las algas comienza bajo condiciones ambientales favorables, estas se explican por medio de la literatura y corresponden a: nutrientes, oxígeno disuelto y temperatura. Muestra de esto es la migración del fitoplancton a la nitratoclina debido al agotamiento de nitrato en la parte superior de la columna de agua (Durham & Stocker, 2012), o el hecho que algunas capas finas de fitoplancton se desarrollan bajo concentraciones de nutrientes específicas (Ryan et al., 2010) o que el afloramiento de nutrientes impulsa las tasas de crecimiento localizadas de fitoplancton generando una distribución irregular de él (Lévy, 2008).

A la vez, en la sección 2.2 se establece que tanto el oxígeno disuelto como los nutrientes se encuentran estratificados en la zona de estudio, siendo las concentraciones del primero mayores en la zona superior, hecho inverso al caso de los nutrientes cuyas altas concentraciones tienen lugar en la capa profunda. Iriarte et al. (2007) establecen que en la zona de estudio las concentraciones de nitrato y amonio en la superficie son bajas sugiriendo que se debe a la

mezcla con el agua proveniente de los estuarios aledaños de escasa concentración (Silva, 2006) y/o la absorción propia del fitoplancton.

La disponibilidad de nutrientes depende directamente de la estratificación (Zalzal, 2018; Iriarte et al., 2007), esta restringe la mezcla vertical por lo que en estuarios con cuña salina, cruzar la interfaz del agua fresca proveniente del río al agua salada marina es especialmente difícil (Kasai et al., 2010).

A pesar de lo anterior, la estratificación no es permanente ya que existen factores que favorecen la mezcla vertical de la columna de agua, como el rompimiento interno de las olas en costas inclinadas (McPhee-Shaw, 2006), frentes influenciados topográficamente (Pedersen, 1994), el fenómeno de surgencia y el descenso que mueve nutrientes (Sellner et al., 2003). Silva (2006) indica factores físicos y procesos biogeoquímicos, dentro de los primeros destaca el ingreso de aguas dulces de ríos, aguas marinas con mayor o menor concentración de nutrientes y lluvia o deshielo. Sepúlveda, (2015) también habla de la mezcla vertical en una columna de agua que modifica la estructura vertical de nutrientes, densidad, temperatura, entre otros.

Por su parte, Sharples et al. (2001) en su estudio de la distribución y supervivencia del fitoplancton en la termoclina, declara que la máxima marea ocurre 5 horas antes que la máxima disipación turbulenta, la que ayuda al crecimiento del fitoplancton administrándole nutrientes de la capa profunda y a la vez mezcla celdas de esta capa con la capa subsuperficial reduciendo la concentración de fitoplancton. Paralelamente McCabe et al. (2017) señalan que las tormentas de primavera empujaron el florecimiento a la costa, además de que la surgencia estacional administró los nutrientes para que aquel florecimiento fuera de gran escala. Sellner et al. (2003) declara que eventos hidrológicos como la lluvia, ayudan a la entrega de nutrientes o formación de una pluma flotando favoreciendo las FAN.

Otro factor de calibre es la temperatura que, al igual que los nutrientes, se ve afectada por el fenómeno de surgencia donde aflora el agua profunda con menor temperatura provocando una disminución en esta variable y de oxígeno disuelto, de esta forma la zona superficial se fertiliza (Bello et al., 2004). Por su parte McCabe et al. (2017) demuestra en su estudio sobre la floración algal nociva de *Pseudo-nitzschia* en primavera del 2015 emplazada en la costa noroeste de Estados Unidos, que el inicio del brote se desarrolló bajo condiciones anormalmente cálidas del océano.

Uno de los principales resultados de Serra et al. (2007) es que la dinámica del fitoplancton depende de diversos factores como el balance de calor, presencia de olas internas y velocidad del viento. Si a esto se le suma que Sepúlveda (2015) indica que el viento es la forzante más importante en términos de estratificación en condiciones de calma o que el viento induce surgencia en bahías costeras o estuarios (Sellner et al., 2003). Igualmente, el viento excita las ondas internas del cuerpo de agua las cuales son amortiguadas en pocos días (Shumizu et al., 2007; Serra et al., 2007)

Dado lo anterior, se establece que las forzantes a estudiar corresponden a: los caudales para determinar si existe aporte de los estuarios, las condiciones meteorológicas, como el viento con el fin de evaluar su influencia en la mezcla vertical de la columna de agua, la batimetría que queda explicada en la sección 2.2 y finalmente la temperatura superficial del mar, los nutrientes y el oxígeno disuelto que son factores directos en el ciclo del brote de algas. A continuación, se expone la Figura 3.2 que muestra el esquema del modelo conceptual a seguir.

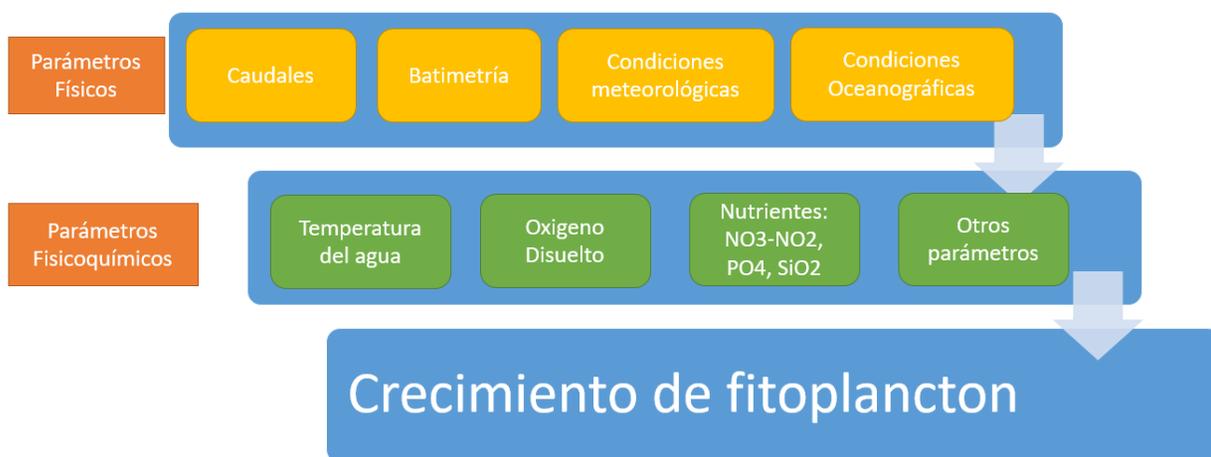


Figura 3.2: Esquema del Modelo Conceptual que rige el florecimiento de algas nocivas (Elaboración propia).

3.2 Obtención de los registros de parámetros y fechas FAN

3.2.1 Parámetros

Los parámetros a analizar son los obtenidos por el modelo conceptual, a continuación se muestra la Tabla 3.1 que contiene los parámetros y su respectiva fuente. Posteriormente, se detalla la vía de petición.

Tabla 3.1: Parámetros y sus respectivas fuentes de información (Elaboración propia).

Parámetro	Fuente
Caudales	DGA
Batimetría	Topografía submarina en canales de la Patagonia Norte
Condiciones meteorológicas	INIA-Dirección meteorológica de Chile
Condiciones oceánicas	HYCOM
Temperatura del agua	SHOA
Oxígeno Disuelto	Directemar
Nutrientes	Directemar
Clorofila <i>a</i>	Imágenes MODIS

Se obtuvieron los caudales diarios de las estaciones: Río Chamiza ante junta Río Chico, Río Chico ante Río Chamiza, Río Puelo en Carrera Basilio y Río Grande, todas las estaciones pertenecen a la Dirección General de Aguas (DGA) y sus datos se encuentran en línea. El criterio de selección de estas estaciones es en primer lugar el año de puesta en marcha de la estación, cercano al año 2000 o previo a este. Luego, la densidad de los datos, es decir, que la cantidad de datos faltantes desde el inicio de actividad de la estación hasta la fecha no fuera más de un año y medio, y finalmente la cercanía de la estación al mar. Debido a este último criterio, todas las estaciones cordilleranas se descartan inmediatamente.

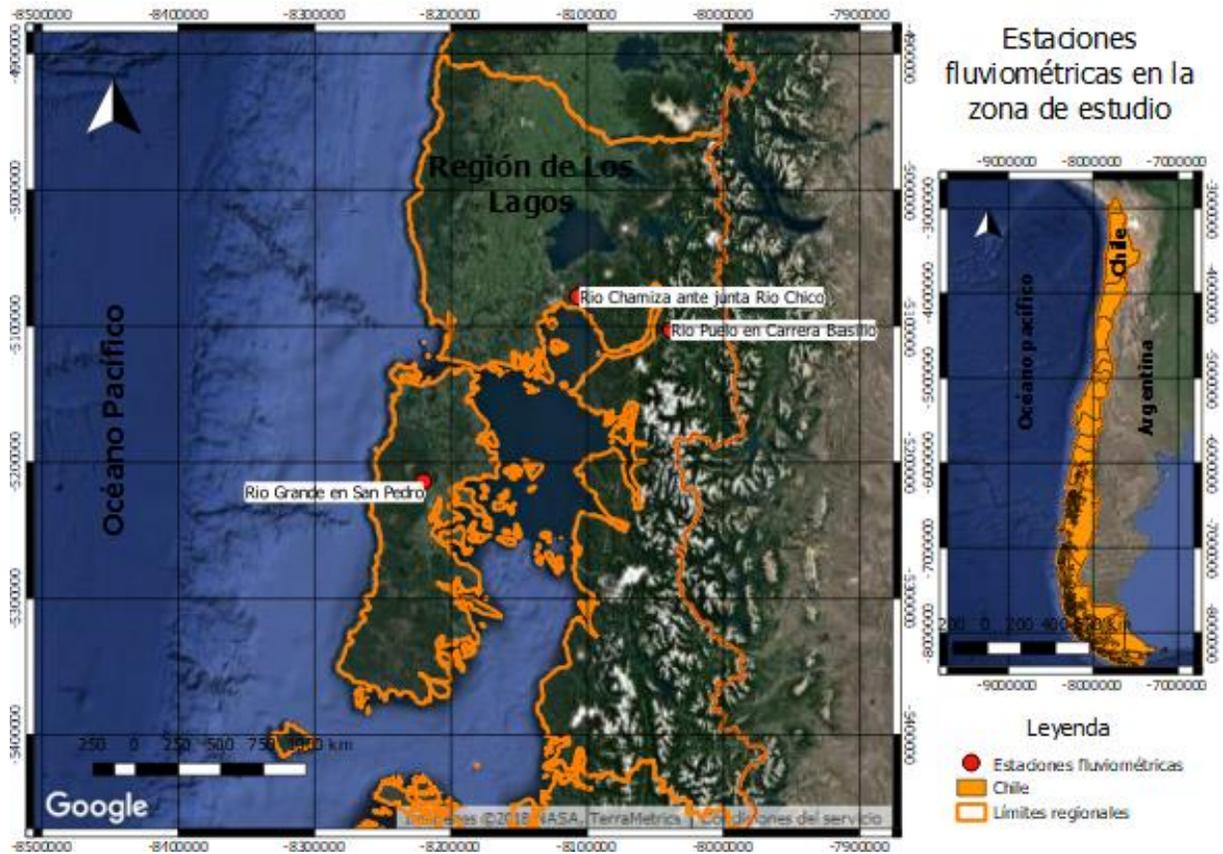


Figura 3.3: Imagen satelital de estaciones fluviométricas de las cuales se descargó información (Modificado de Google Maps).

La batimetría corresponde a la planteada por Cristián Rodrigo en el capítulo Topografía submarina en canales de la Patagonia Norte de la publicación Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de hornos editada por N. Silva & S. Palma el año 2006.

De las condiciones meteorológicas se estudia la velocidad del viento, este dato diario se obtiene de Agromet, la red agrometeorológica del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), el cual cuenta con estaciones funcionando desde el 2009 cuyos datos se localizan en la página web de la institución. Se obtienen los datos de las estaciones: Huyar Alto, Butalcura, los Canelos y Tara. Los criterios para la selección de estas estaciones son análogos al de las fluviométricas, a excepción del año de inicio que debe ser cercano al 2009. Para los años anteriores se utilizan los datos horarios de la estación Tepual perteneciente a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) que es parte de la Dirección General de Aeronáutica Civil. Esta información se obtuvo del Sistema SACLIM (Sistema de Administración de Datos Meteorológicos) de la DMC.

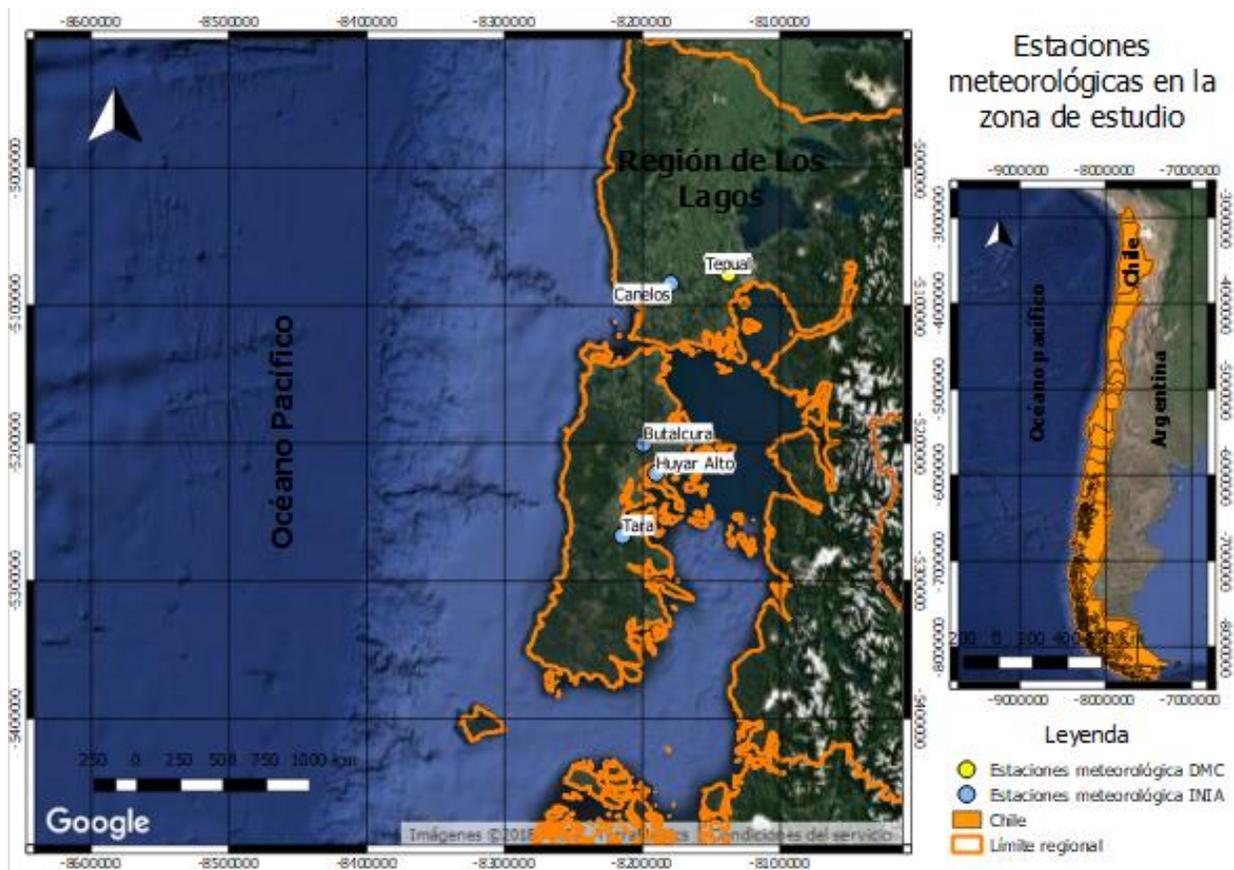


Figura 3.4: Imagen satelital de estaciones velocidad de viento (Modificado de Google Maps).

La temperatura superficial del mar (TSM) se obtuvo del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) que cuenta con estaciones costeras que miden este parámetro a nivel horario desde el año 1999. Para solicitar la información se elevó una solicitud de datos hidrográficos y oceanográficos para fines científicos y/o académicos, además se firmó un compromiso de uso académico.

El oxígeno disuelto y los nutrientes se obtuvieron del Programa de Observación del Ambiente Litoral (P.O.A.L) perteneciente a la Dirección de Intereses Marítimos y Medio Ambiente Acuático (DIRINMAR). El programa cuenta con información para distintas Gobernaciones Marítimas, las de interés corresponden a la de Puerto Montt y Castro. La periodicidad de los datos no es fija, ya que se cuenta con un número variable de mediciones por año.

La concentración de clorofila a se obtuvo de imágenes satelitales MODIS, las cuales entregan directamente el producto en unidades de mg/m^3 . Las fuentes de estas imágenes varían dependiendo si se trabaja con la imagen diaria o la mensual.

Las imágenes diarias se obtuvieron de la página web NASA Ocean Color (2018), mismo lugar que indica los algoritmos utilizados para obtener la clorofila a como producto MODIS. Estos algoritmos calculan la clorofila, en mg/m^3 , a partir de relaciones empíricas entre reflectancia de percepción remota (R_{rs}) en la región azul a verde del espectro visible y la clorofila a medida in situ. El algoritmo utilizado difiere según la clorofila recuperada:

- Bajo $0,15 \text{ mg/m}^3$ se usa el algoritmo Hu color index (CI). Este es un algoritmo de diferencia de reflectancia de tres bandas, la primera es R_{rs} de la banda verde y la segunda corresponde a R_{rs} formada linealmente entre R_{rs} de la banda azul y roja.

$$CI = R_{rs}(\lambda_{verde}) - [R_{rs}(\lambda_{azul}) + \frac{(\lambda_{verde} - \lambda_{azul})}{(\lambda_{rojo} - \lambda_{azul})} * (R_{rs}(\lambda_{rojo}) - R_{rs}(\lambda_{azul}))] \quad (1)$$

donde λ_{azul} , λ_{verde} y λ_{rojo} son las longitudes de onda específicas del instrumento cercanas a 443, 555 y 670nm, respectivamente.

- Sobre $0,2 \text{ mg/m}^3$, algoritmo O'Reilly band ratio (OCx). Es una relación polinómica de cuarto orden entre R_{rs} y la clorofila a .

$$\log_{10}(chlor_a) = a_0 + \sum_{i=1}^4 a_i (\log_{10}(\frac{R_{rs}(\lambda_{azul})}{R_{rs}(\lambda_{verde})}))^i \quad (2)$$

donde $R_{rs}(\lambda_{azul})$ es el valor más grande de varios R_{rs} de entrada y los coeficientes $a_0 - a_4$ dependen del sensor.

Tabla 3.2: Valores coeficientes $a_0 - a_4$ para OCx. (Adaptado de Nasa, 2018).

	Sensor	Azul	Verde	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4
OC2M	MODIS	488	547	0.250	-2.475	1.406	-2.823	0.540
OC2M-HI	MODIS (500-m)	469	555	0.146	-1.795	0.971	-0.831	-0.807

- Entre estos valores ambos algoritmos se mezclan usando un enfoque ponderado.

Las imágenes constan con la clorofila a como producto estándar desde el Level 2 (NASA, 2018). La zona de descarga de la imagen corresponde a la comprendida entre -40.0N , -78.7°O y -44.5°S , -71.5°E con una resolución espacial de $4\text{km} \times 4\text{km}$.

La clorofila a obtenida de las imágenes mensuales son un producto de datos generado por el Modelo Oceánico Biogeoquímico de la NASA (NOBM) basado en la asimilación de datos de Chl- a remotamente detectada, no es un producto de datos producido por observaciones directas de teledetección. Estas imágenes se adquieren de la página web Giovanni perteneciente a la red Earthdata de la NASA.

3.2.2 Fechas FAN

Para determinar las fechas en las que se produjo florecimiento de algas nocivas, se realizaron dos acciones conjuntas, la primera corresponde a elevar una solicitud vía transparencia a la Seremi de Salud de la región de Los Lagos con fecha 29 de agosto 2017, donde se solicitan los casos de intoxicación por VPM, VDM o VAM y sus respectivas fechas en la región de Los Lagos desde el año 2000 hasta aquella fecha. Solicitud que tuvo como respuesta la Tabla 3.3 donde se puede apreciar el número de intoxicados o fallecidos de la zona en estudio para determinados años, además se declara el tipo de veneno causante de la intoxicación.

Tabla 3.3: Respuesta Solicitud N° 3522 Folio AO002T0001493 (Seremi de Los Lagos, 2017).

Año	N° Intoxicados Asociados	N° Fallecidos Asociados	Toxina Implicada en Evento
2000	0	0	VAM
2002	67	1	VPM
2005	0	0	VDM
2006	1	0	VPM
2008	0	0	VDM
2009	6	0	VAM
2010	0	0	VAM
2011	0	0	VPM
2014	0	0	VAM
2016	35	0	VPM

Por otra parte, la segunda acción consistió en revisar la prensa nacional, buscando declaraciones de marea roja en la región. En la Tabla 3.4 se muestra el año, mes y fuente de la información.

Tabla 3.4: Resumen fechas FAN encontradas en la prensa (Elaboración propia en base a datos de Emol y La estrella de Chiloé).

Año	Mes	Fuente	Fecha de publicación
2016	Enero-Marzo	La estrella de Chiloé	21-01-2016 03-03-2016
2014	Abril	La estrella de Chiloé	09-04-2014
2012	Abril	Emol	27-04-2012
2011	Marzo-Junio	La estrella de Chiloé	30-03-2011 12-06-2011
2005	Marzo	Emol	08-03-2005
2002	Febrero-Abril	Emol	01-02-2002 06-04-2002
2000	Noviembre	Emol	17-11-2000

Paralelamente, se estudiaron los Informes de los Resultados Programa Nacional de Vigilancia y Control de Intoxicaciones por Fenómenos de Algas Nocivos Chile desde el 2002 hasta 2013 perteneciente al Instituto de Salud Pública (ISP), donde se exponen los análisis de biotoxina a nivel anual por lo que no se obtienen las fechas (día/mes) de los eventos, sólo los años.

3.3 Análisis de los datos

Para poder seleccionar las estaciones con mejor calidad de información o chequear que el parámetro debe ser estudiado, se realizó un primer acercamiento a los datos donde se generan series de tiempo con cada parámetro con el fin de tener una visualización general de este.

3.3.1 Caudales

A continuación, en la Figura 3.5 se muestran los caudales de cada estación en una serie de tiempo del 2000 al 2017. Del primer y segundo panel se observa que se pierde bastante información en

dos ocasiones: durante los primeros años 2000-2003 y entre el 2012-2014. La estación Río Puelo consta con buena densidad de información a partir de la fecha en que comienza a medir, lamentablemente esta corresponde a finales del 2003, por lo que el caudal para el evento del 2002 de gran magnitud, Tabla 3.3 y Tabla 3.4, no se tendría. Es por esto que la estación seleccionada para realizar el estudio corresponde a la estación Río Grande, cuarto panel, donde se ve que contiene buena densidad de información en la totalidad de años de interés (2000-2017).

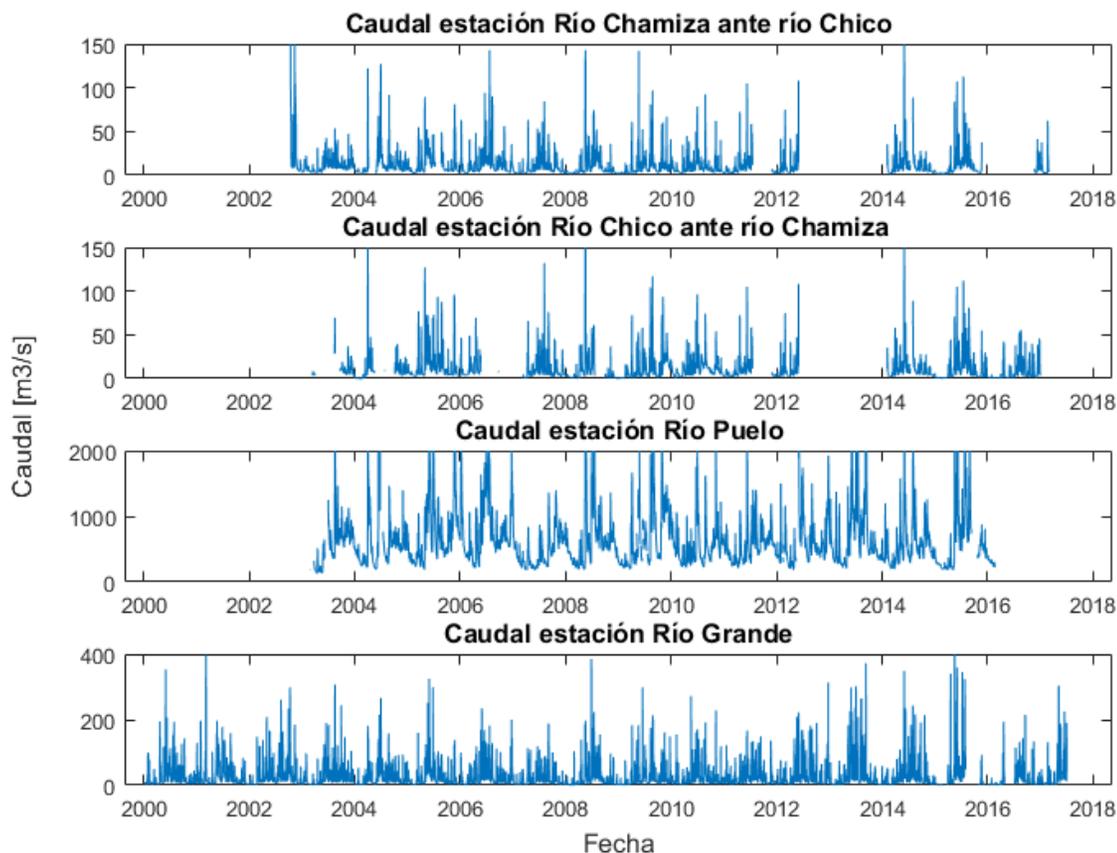


Figura 3.5: Serie de tiempo de caudales para las estaciones: Río Chamiza ante río Chico, Río Chico ante río Chamiza, Río Puelo y Río Grande (Elaboración propia en base a datos de DGA).

3.3.2 Velocidad del viento

En la Figura 3.6 se expone la serie de tiempo del 2009-2017 para las velocidades del viento diarias de las estaciones del INIA. Tara, tercer panel, presenta un periodo de tiempo extenso sin información al inicio de la gráfica. Huyar, cuarto panel, presenta información ambigua en el periodo 2014-2016. Canelos tiene un leve salto durante el 2013. Por todo lo anterior, más la buena densidad de información, se escoge la estación Butalcura, primer panel, para realizar el análisis de la velocidad del viento durante el ciclo 2009-2017

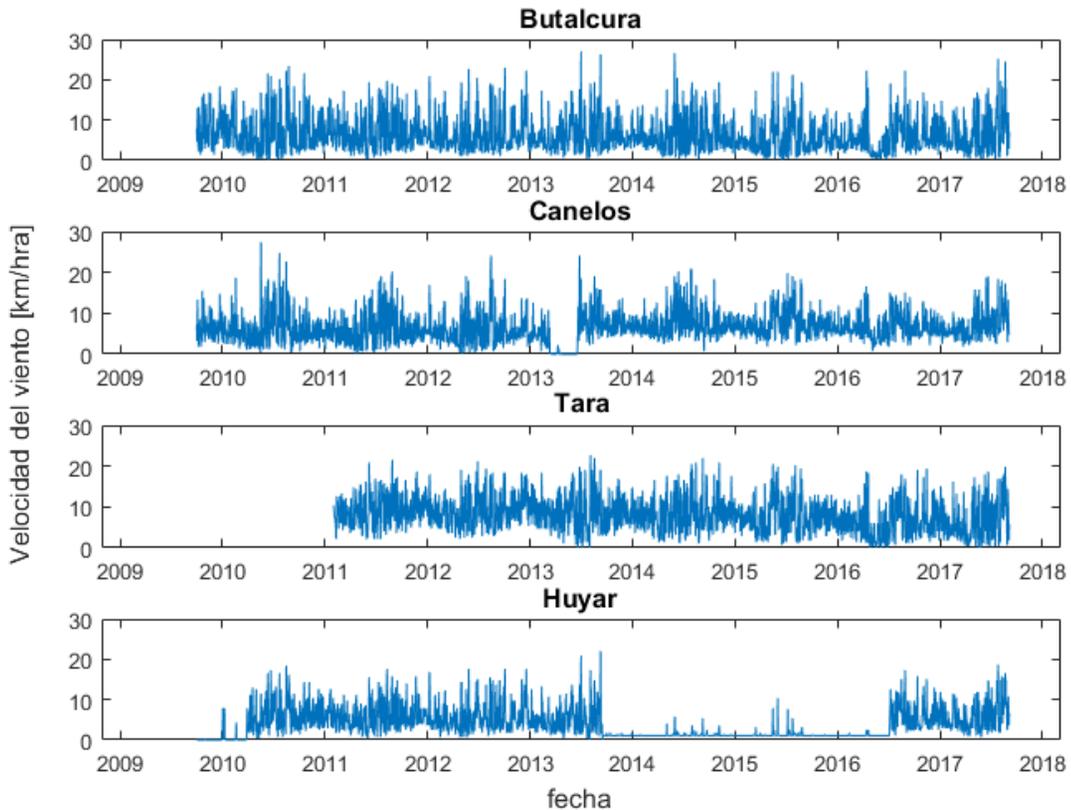


Figura 3.6: Serie de tiempo de velocidades de viento para las estaciones: Butalcura, Canelos, Tara y Huyar (Elaboración propia en base a datos de INIA).

Para el periodo 2000-2009 se tienen los datos horarios de la estación Tepual de la Dirección Meteorológica de Chile (Figura 3.7). Se grafican los datos a nivel diario donde se puede ver que no existe salto dentro de la serie por lo que se utiliza esta estación para el estudio.

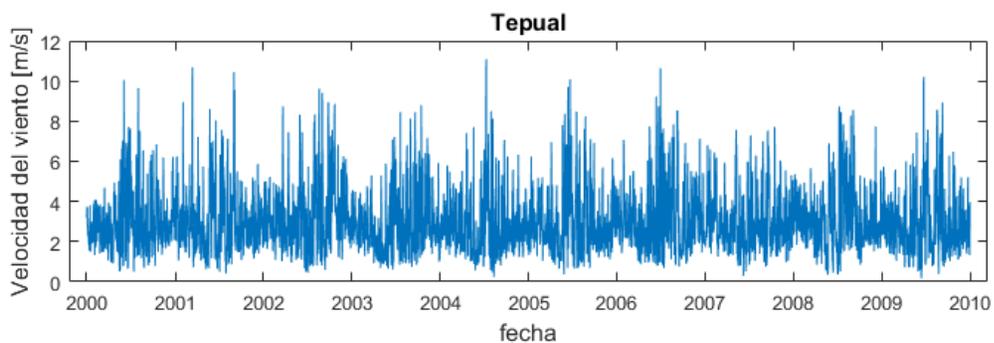


Figura 3.7: Serie de tiempo de velocidad del viento estación Tepual (Elaboración propia en base a datos del DMC).

3.3.3 Temperatura superficial del mar

La Figura 3.8 muestra las series de tiempo para la temperatura superficial del mar, dato obtenido del SHOA. Se observa que la estación Puerto Montt, cuarto panel, representa la estación con mayor información ya que Ancud y Castro tienen lapsos de tiempo sin datos y Melinka comienza sus

datos el 2012. Al ser notoria y similar la variación anual en todas las estaciones, se puede escoger una estación que represente la TSM, siendo la estación Puerto Montt la seleccionada.

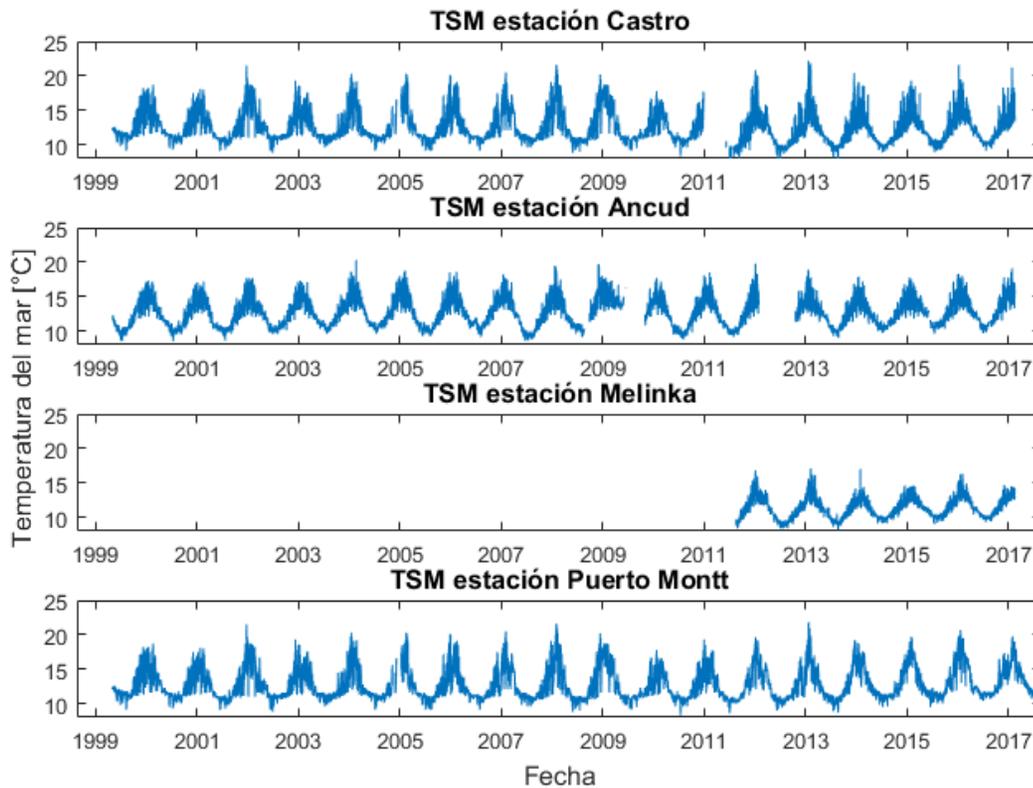


Figura 3.8: Serie de tiempo de temperatura superficial del mar para las estaciones: Castro, Ancud, Melinka y Puerto Montt (Elaboración propia en base a datos del SHOA).

3.3.4 Oxígeno disuelto y nutrientes

En la Figura 3.9 se ven los nutrientes: nitrito, nitrato y fosfato junto con el oxígeno disuelto para series de tiempo de al menos 10 años. Se puede ver que el nitrito se mueve entre 0 y 0.05 mg/l, a su vez el rango del nitrato va de 0 a 1 mg/l, mientras que el fosfato varía entre 0 y 0.4 mg/l. Distinto es el caso del oxígeno disuelto cuyos valores son bastante mayores en un rango de 0 a 12 mg/l. Es evidente que ninguno de los cuatro parámetros varió significativamente en los periodos de tiempo exhibidos, esto se debe a que corresponden a muestras puntuales, representativas de las condiciones medias y no de eventos específicos, por lo que estos valores se tomarán como referenciales.

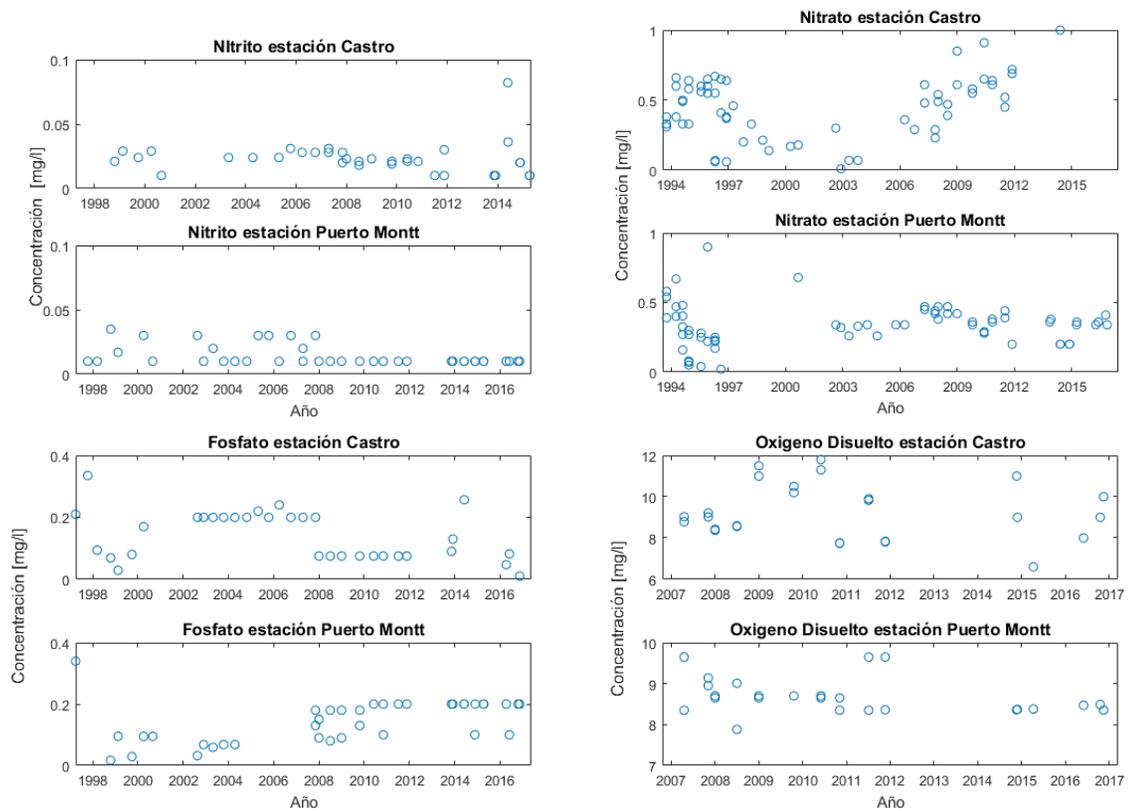


Figura 3.9: Series de tiempo de nitrato, nitrito, fosfato y oxígeno disuelto en las estaciones Castro y Puerto Montt (Elaboración propia en base a datos del proyecto P.O.A.L.).

3.3.5 Clorofila *a*

Para este parámetro se trabaja con imágenes diarias y mensuales, las primeras se usaron para evaluar el parámetro en un momento específico, mientras que con las mensuales se efectuaron series de tiempo de clorofila para cada evento identificado, de esta forma se sabrá su variación mensual durante el suceso.

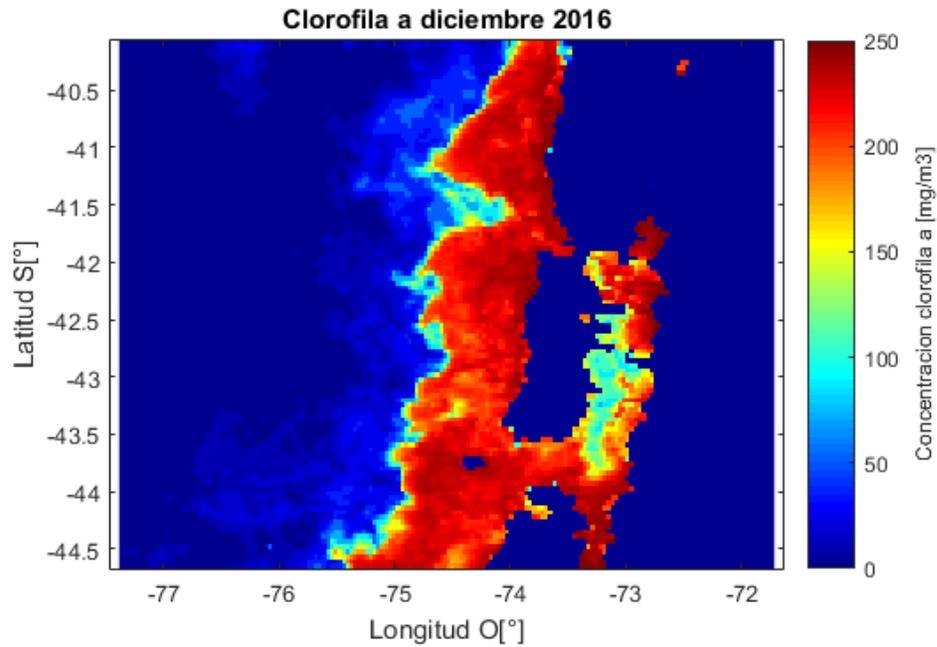


Figura 3.10: Imagen MODIS mensual de clorofila *a* para diciembre del 2016. (Elaboración propia en base a imágenes MODIS mensuales de clorofila *a*).

La Figura 3.10 se muestra la concentración de clorofila *a* a nivel mensual para diciembre del 2016, su escala es de 0 a 250 mg/m³ lo que no representa la realidad ya que los rangos de clorofila en la zona se mueven entre 1,5 y 5 mg/m³ según la sección 2.2.3, además el producto de la imagen se debiera calibrar con mediciones, hecho del que no se tiene seguridad en las latitudes de la zona de estudio. Debido a esto, es que los valores de clorofila mensual se normalizan con respecto al máximo (250mg/m³) presentando la clorofila *a* de forma porcentual con respecto a este valor. De esta forma, se representa el aumento relativo de la clorofila *a* nivel mensual.

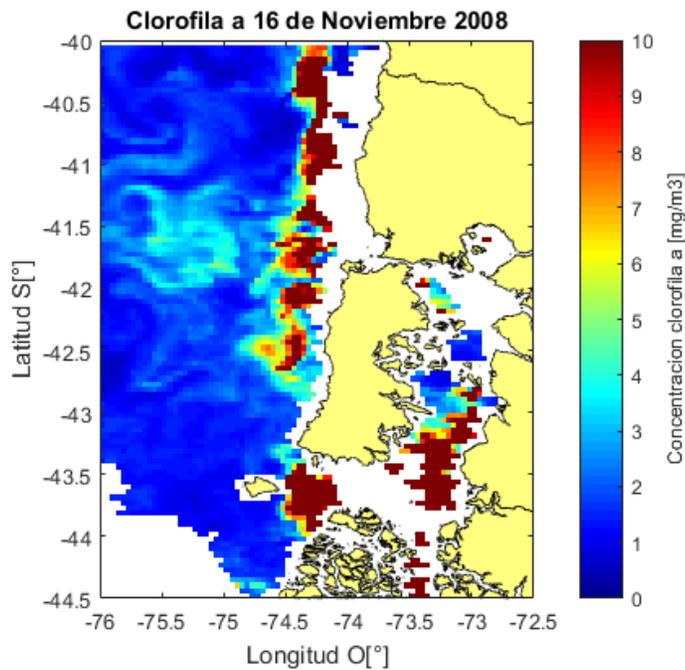


Figura 3.11: Imagen MODIS diaria de clorofila *a*, 16 de noviembre del 2008. (Elaboración propia en base a imágenes MODIS diarias de clorofila *a*).

La Figura 3.11 es un ejemplo de las imágenes MODIS a escala diaria, mostrando la concentración de clorofila *a* para el 16 de noviembre del 2008. Se observa en rojo oscuro las zonas donde su concentración es elevada (ver Tabla 2.1), es decir, mayor o igual a 10 mg/m³. En el caso de estas imágenes se presenta su concentración absoluta, ya que la escala tiene sentido respecto de la realidad.

Dado lo anterior, en la Tabla 3.5 se presenta un resumen de los forzantes que se estudiarán y sus respectivas fuentes para el análisis de cada evento.

Tabla 3.5: Resumen de los parámetros analizados y sus estaciones.

Parámetro	Institución	Estación
Caudal	DGA	Río Grande
Temperatura superficial del mar	SHOA	Puerto Montt
Velocidad del viento	INIA-Dirección Meteorológica de Chile	Butalcura-Tepual
Clorofila <i>a</i>	NASA	MODIS, clorofila <i>a</i> diaria/mensual

3.4 Búsqueda de patrones

En esta sección se explica el procedimiento con el que se exponen y analizan los resultados. Primero, se debe mencionar que los parámetros a analizar corresponden a los señalados en la Tabla 3.5, la estructura en la que se presentan corresponde a series de tiempo anuales y estacionales para los eventos anteriormente declarados.

El primer evento a estudiar es el verano-otoño 2016 ya que es el evento con mayor cantidad de información y a la vez corresponde a uno de gran magnitud, donde se determinan posibles relaciones entre los forzantes. Luego de esto, se plantean hipótesis con respecto a estas relaciones que podrían explicar algunas causantes de los FAN, para finalmente evaluar la veracidad de estas hipótesis por medio del análisis de los eventos restantes. Este análisis se realiza de lo general a lo particular.

Capítulo 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la presentación de este capítulo, primero se exponen los resultados del evento 2016. Posteriormente, se presentan los resultados de los eventos restantes donde se dividen según su magnitud. Dentro del capítulo se exponen los gráficos e imágenes junto con el correspondiente análisis de los eventos con mayor magnitud, el resto de los resultados se deja en los anexos. Se debe mencionar que la escala de los forzantes a estudiar es la misma para todos los gráficos, de esta forma los resultados se vuelven comparables.

A continuación, se da a conocer la Tabla 4.1 donde se observan los años y meses donde ha ocurrido florecimiento de algas nocivas en la región de Los Lagos según la información de la prensa (Tabla 3.4) y de la SEREMI de Los Lagos (Tabla 3.3). En esta tabla se resaltan los años donde los eventos son de una magnitud importante.

Tabla 4.1: Fechas de FAN a estudiar (Modificado de SEREMI de Los Lagos y prensa nacional).

Año	Mes
2016	Febrero- Marzo
2014	Abril
2012	Abril
2011	Marzo-Junio
2009	Marzo
2006	Marzo
2005	Marzo
2002	Febrero-Abril

En la Figura 4.1 se observa la concentración mensual de clorofila *a* expresada en porcentaje respecto al máximo de 250 mg/m³, para la serie de años 2002-2017, presentándose la clorofila desde el mes de junio hasta el mismo mes del año siguiente. Se debe aclarar que para el año 2002, se tienen datos desde septiembre pues antes no se contaba con imágenes MODIS de este parámetro. Por esta razón, el evento 2002 no se representa en la figura. Se destaca diciembre del 2005 al ser el único mes con concentraciones superiores al 35%, además se ve como la clorofila es alta (mayor al 15%) durante septiembre hasta febrero-marzo. Del mismo modo, al observar la serie del 2015-2016 se ve claramente que es el único bloom que se extiende hasta mayo. Además, queda en evidencia que las concentraciones de clorofila en los meses de marzo, abril y mayo del 2015-2016 son abruptamente mayores que la del resto de los años (cuadros verdes). También se destaca el año 2010-2011 con concentraciones superiores los meses de diciembre y enero, el año 2014-2015 (cuadros rojos) con concentraciones fuera de los normal en agosto, octubre y noviembre.

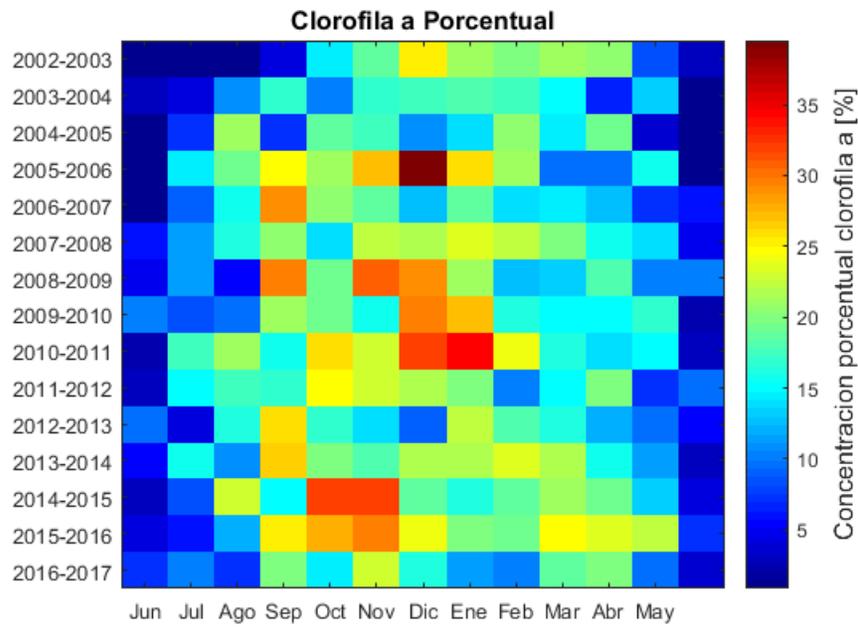


Figura 4.1: Concentración porcentual de clorofila *a* mensual desde el 2002 hasta 2016 (Elaboración propia en base a imágenes MODIS mensuales de clorofila *a*).

En la Figura 4.2 se presenta la concentración porcentual de clorofila *a* a nivel mensual. Se observa que las concentraciones comienzan a aumentar con el comienzo de la primavera en septiembre, manteniéndose altas hasta febrero-marzo, aproximadamente; mientras que las menores concentraciones ocurren en mayo, junio y julio.

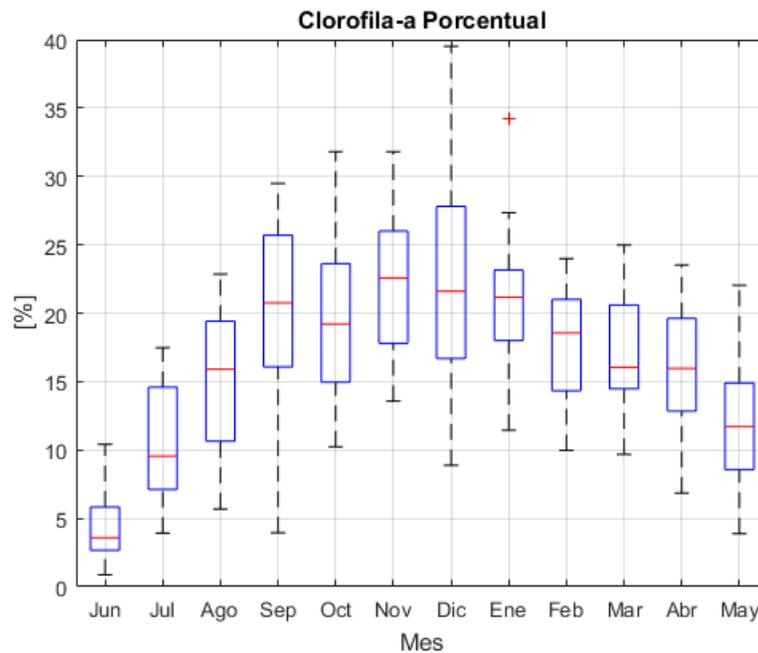


Figura 4.2: Concentración porcentual de clorofila *a* mensual. Los valores indican el máximo y mínimo de clorofila durante el mes para la serie de años del 2002 al 2016, en rojo se ve la media del mes (Elaboración propia en base a imágenes MODIS mensuales de clorofila *a*).

En la Figura 4.2, se observa como al llegar a septiembre en todos los años las concentraciones aumentan a valores cercanos al 20%, hecho que se prolonga hasta el mes de diciembre, aproximadamente. Además, durante los primeros meses del año (enero, febrero, marzo y abril), se aprecian concentraciones cercanas al 15-20% del máximo, las cuales decaen a un valor cercano a 5% en el mes de junio para luego volver a aumentar hasta su máximo en noviembre-diciembre.

A continuación, en la Tabla 4.2 se resumen los valores medios mensuales de clorofila *a* porcentual.

Tabla 4.2: Promedio mensual clorofila *a* porcentual (Elaboración propia en base a imágenes MODIS mensuales de clorofila *a*).

Mes	Promedio clorofila <i>a</i> [%]
Enero	21.68
Febrero	18.40
Marzo	16.98
Abril	15.79
Mayo	12.03
Junio	4.42
Julio	10.27
Agosto	14.67
Septiembre	21.01
Octubre	20.27
Noviembre	22.17
Diciembre	21.70

4.1 Caracterización del evento verano-otoño 2016

A continuación, se presentan los resultados de los forzantes junto con la variable de estado del sistema para el año 2016. Se grafican 4 paneles en una serie de tiempo y rango en el eje y igual para todos. El primer panel corresponde al caudal de la estación Río Grande, en el segundo panel se tiene la temperatura superficial del mar de la estación Puerto Montt. En el tercer panel, por su parte, se expone la magnitud del viento en la estación Butalcura, para finalizar con la clorofila *a* porcentual normalizada con respecto al máximo de 250 mg/m³. Se exponen los resultados a nivel anual, junio del 2015 a mayo del 2016 en la Figura 4.3, para luego continuar con los resultados del periodo verano-otoño, noviembre 2015 a mayo 2016 en la Figura 4.4

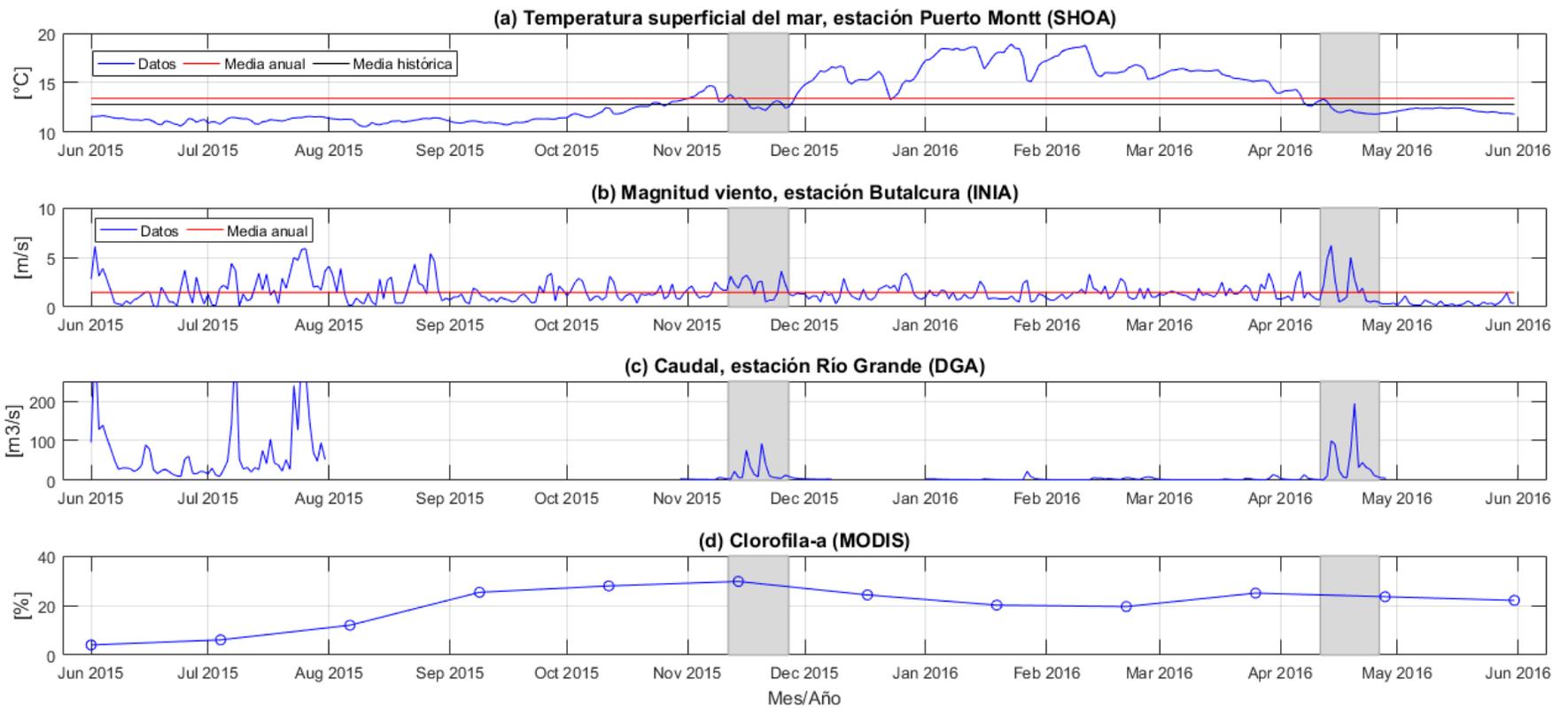


Figura 4.3: Vista anual evento verano-otoño 2016. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).

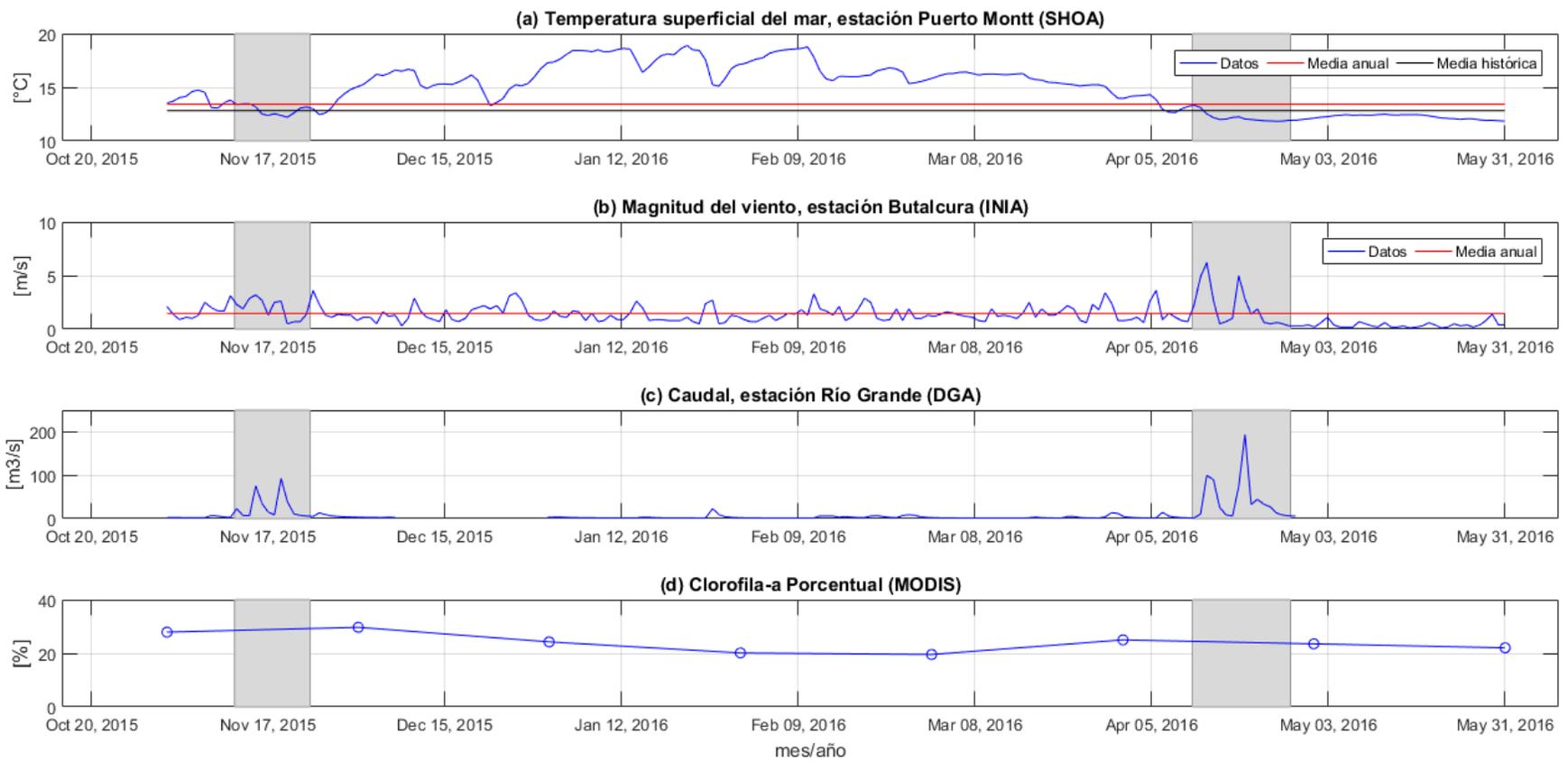


Figura 4.4: Evento verano-otoño 2016, vista noviembre-abril. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).

De la Figura 4.3 y Figura 4.4 se puede observar que las zonas destacadas corresponden a tormentas, pues se aprecia un incremento tanto de caudal como de la magnitud del viento, aumentos característicos de una tormenta. Se evidencia un incremento del caudal proveniente de los ríos con propiedades diferentes a las del agua de mar. Es decir, podría venir con mayor concentración de nutrientes (particularmente óxido de sílice Silva, 2006) y con menor temperatura, que al mezclarse con el agua del océano, genera una disminución de la temperatura superficial, resultado que se puede evidenciar en el panel (a) de las figuras.

Tabla 4.3: Caracterización de la fecha de las tormentas del evento 2016.

Tormenta	Día de inicio	Día de fin
Noviembre	15	22
Abril	12	28

Además, los fuertes vientos y el momentum del flujo de agua de los ríos genera una mezcla vertical en la interfaz de la capa superficial-profunda, lo que significa también un transporte de agua más fría y más rica en nutrientes de la capa profunda a la superficial. Rápidamente la temperatura se recupera, encontrándose entonces, las condiciones ideales para el florecimiento de microalgas.

El panel (d) de la Figura 4.3, por su parte, se muestra la concentración porcentual de clorofila *a*. En esta imagen, se puede observar que en el mes de la tormenta la concentración de clorofila fue la máxima de la serie (cerca al 30%). Al recordar la Figura 4.2, no es extraño que durante este mes la clorofila sea la máxima.

Si se observa la Figura 4.5 primer panel, el día 5 de noviembre del 2015, fecha anterior a la tormenta (Tabla 4.3), se tiene mayor cobertura de la zona con clorofila *a* mayor o igual a 10mg/m^3 en comparación al 29 de noviembre, fecha post tormenta.

En la Figura 4.4 panel (a), se puede observar que la clorofila *a* para el mes de abril y mayo se mantiene con respecto a la de marzo, a pesar que en este mes la temperatura ha caído bajo la media histórica, panel (a) y que para el normal de los años debiera decaer abruptamente (ver Figura 4.2). Pero al observar el panel (c) se puede ver que existió una gran tormenta (mayor a la de noviembre) durante abril con caudales máximos cercanos a los $200\text{ m}^3/\text{s}$, a la vez se debe considerar que esta se desarrolla luego de 5 meses sin tormentas, por lo que las concentraciones de nutrientes asociadas a ella podrían ser elevadas, dado el arrastre de sedimentos proveniente de los estuarios y sus respectivas cuencas aportantes.

En la Figura 4.5 segundo panel, se aprecia que las zonas con concentración de clorofila *a* mayor o igual a 10 mg/m^3 del 9 de abril son mucho menos extensas que la del 26 de abril, estos días corresponden al día previo y posterior a la tormenta (ver Tabla 4.3).

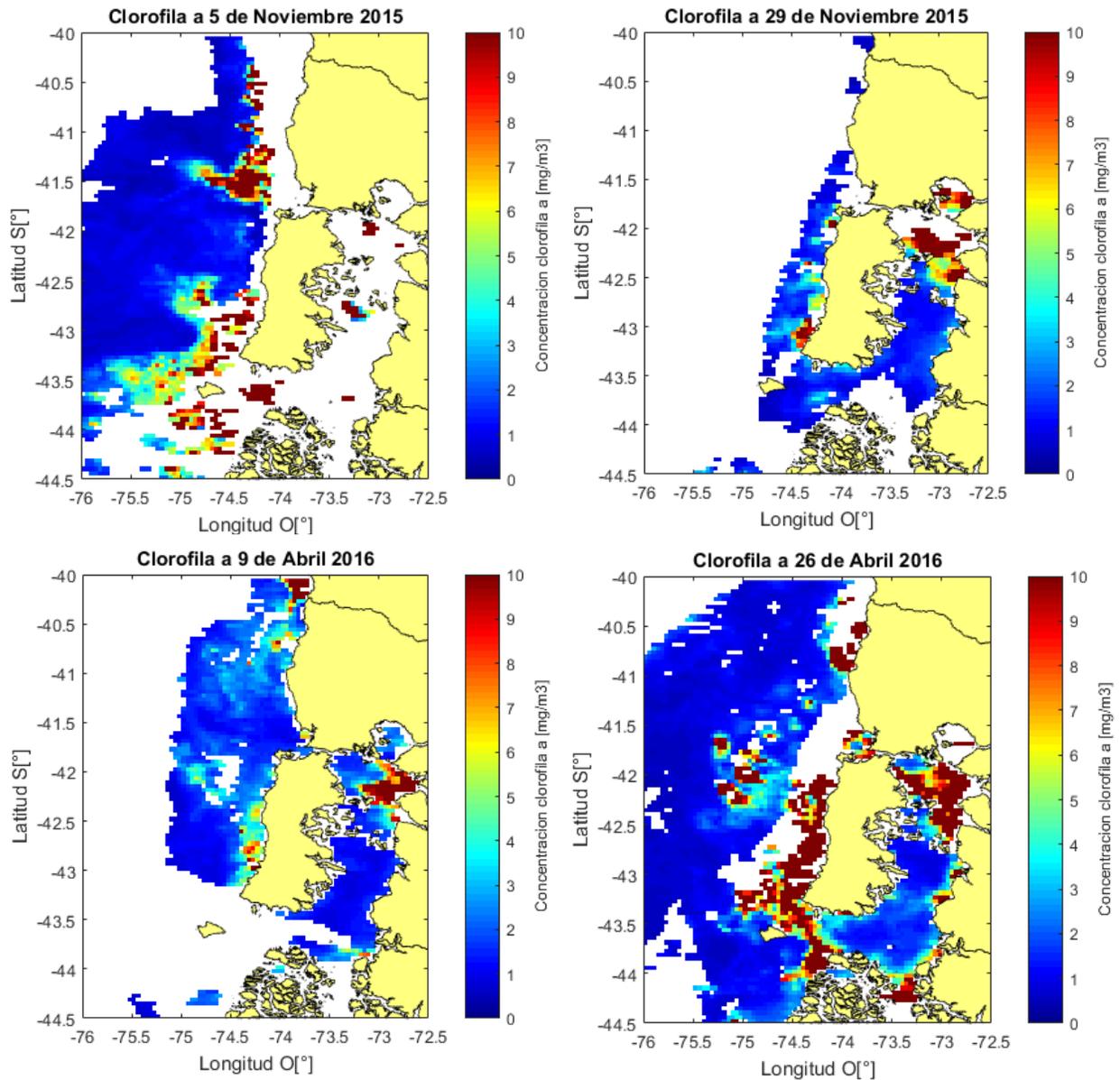


Figura 4.5: Imágenes MODIS de clorofila *a* diarias para diferentes fechas del evento 2016. En rojo oscuro se resaltan las zonas con concentraciones iguales o mayores a 10 mg/m^3 de clorofila *a*. (Elaboración propia en base a imágenes MODIS diarias de clorofila *a*).

Asimismo, todo esto ocurre bajo las condiciones del niño que tiene asociadas temperaturas del agua más elevadas. Esto se observa en la Figura 4.6, donde se ve la temperatura superficial del mar según El Niño 3.4 desde el año 1982 hasta el 2016, en rojo se destacan los años pertenecientes a El Niño y en azul los años La Niña. En la misma Figura 4.6 se tiene un cuadro negro que destaca el periodo 2015-2016.

Esto se recalca en la Figura 4.3 y Figura 4.4, donde se observa una línea color rojo en el segundo panel que corresponde a la media anual o estacional de temperatura superficial del mar, según corresponda. Esta línea se encuentra por sobre la de color negro que representa la media histórica de temperaturas superficiales.

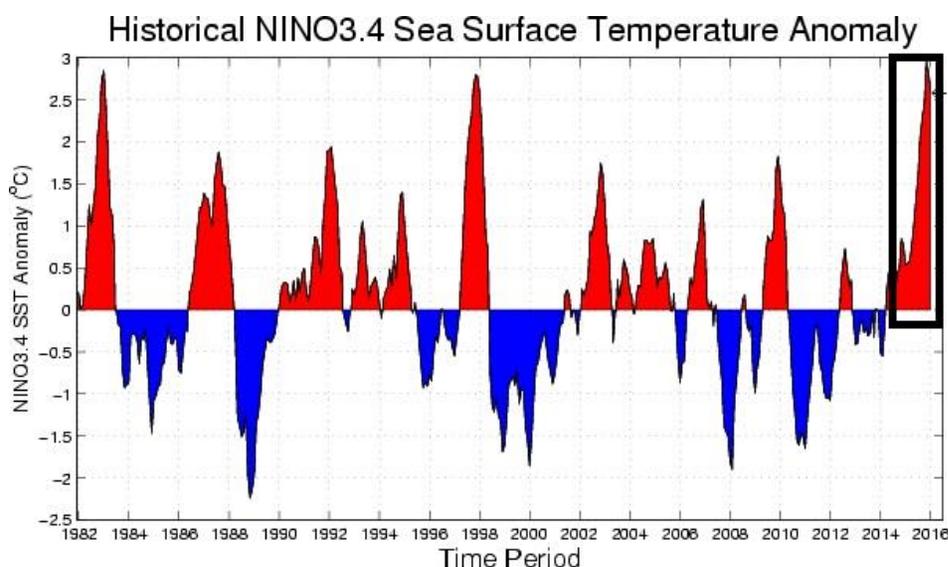


Figura 4.6: Anomalía de Temperatura Superficial del Mar el niño 3.4 histórico, remarcado evento 2016. (Modificado de (Earth Institute, Columbia University, 2017)).

Es sabido que la temperatura superficial del mar se ve claramente influenciada por este fenómeno (ENSO), un respaldo de esto es el estudio de Bello, M. et al (2004), donde se muestran imágenes diarias de TSM para los eventos de 1997-98 y 1998-99 con los cambios en sus valores.

De acuerdo a este análisis, se plantean 3 hipótesis que podrían explicar algunas de las causas de los florecimientos de algas:

- I. La ocurrencia de tormentas y el consecuente aumento del caudal de los ríos afluentes, podría traer condiciones favorables para los florecimientos de microalgas, debido al arrastre de nutrientes desde el continente hacia la costa.
- II. Los fuertes vientos podrían generar mezcla vertical en la interfaz de la capa superficial-profunda, lo que significa también un transporte de agua más fría de la capa profunda a la superficial, y más rica en nutrientes, favoreciendo a la carga nutritiva para un florecimiento de microalgas.
- III. Los FAN ocurridos en la zona podrían desarrollarse en años donde predomina el fenómeno de El Niño, debido al aumento de la TSM.

4.2 Caracterización del resto de los eventos

Luego de plantear las hipótesis anteriores, se verifican con el resultado de los demás eventos. Para lograr esto, se presentan los resultados de la siguiente forma: se clasifica el año según el índice ENOS (Niño-Niña), luego se presenta el comportamiento de los forzantes y de la clorofila *a* a nivel anual y estacional.

En la Figura 4.7 se pueden ver los años de los eventos, tanto grandes como pequeños, destacados con una línea vertical, cabe mencionar que se destaca una zona cercana al mes donde la prensa anuncia un FAN. Para los eventos importantes se tiene una línea negra, mientras que para los menores la línea es naranja.

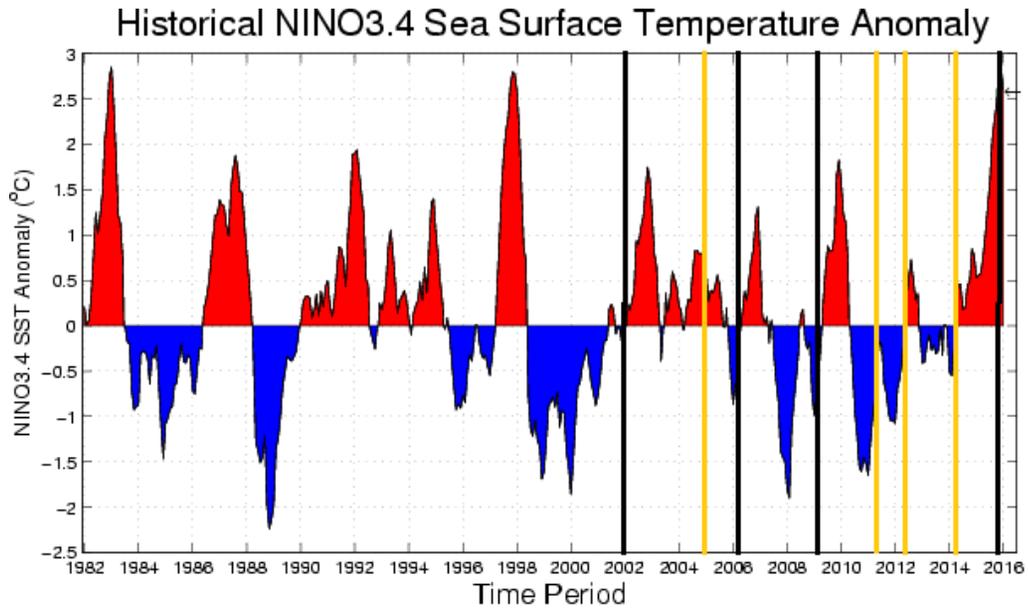


Figura 4.7: Anomalía de Temperatura Superficial del Mar el niño 3.4 histórico, remarcando total de los eventos (Modificado de Earth Institute, Columbia University, 2017).

De la Figura 4.7, se puede ver que de los eventos de gran magnitud del 2016 ocurren en pleno desarrollo de El Niño, mientras que los eventos del 2002, 2009 y 2006, se desarrollan en un periodo de cambio de ciclo de La Niña a El Niño. Para los eventos menores se tiene que uno se desarrolla en pleno La Niña (2011). El suceso del 2012, por su parte, se desarrolla en un periodo de cambio Niña a Niño y los eventos 2005 y 2014 se desarrollan bajo la influencia de El Niño.

A continuación, se presenta la Tabla 4.4, en donde se indica la influencia bajo la cual se encontraba el año FAN. Cabe destacar que el 50% de los casos se desarrolla en un año de transición de La Niña a El Niño, mientras que el 37,5% en pleno año de El Niño y tan sólo el 12,5% en año La Niña.

Tabla 4.4: Resumen carácter niño/niña/transición del año FAN.

Año	Influencia
2016	El Niño
2014	El Niño
2012	Transición Niña-Niño
2011	La Niña
2009	Transición Niña-Niño
2006	Transición Niña-Niño
2005	El Niño
2002	Transición Niña-Niño

4.2.1 Evento 2009

De la Figura 4.8 y la Figura 4.9 se pueden ver comportamientos similares a los del año 2016, donde la temperatura superficial del mar aumenta de noviembre a abril y la clorofila llega a su máximo

en noviembre, además se tienen 4 incrementos de caudal dentro del periodo noviembre-abril, los cuales corresponden a tormentas que podrían traer una concentración de nutrientes mayor y una menor temperatura del agua o bien mejorar la mezcla vertical. Este incremento del caudal tiene como respuesta una baja en la temperatura superficial del mar, la que vuelve a recuperarse pudiendo generar las condiciones para el florecimiento de microalgas

Tabla 4.5: Caracterización de la fecha de las tormentas del evento 2009.

Tormenta	Día de inicio	Día de fin
Noviembre 1	4	11
Noviembre 2	21	30
Febrero	13	22
Abril	1	9

Se tiene que la clorofila durante las tormentas de noviembre es la máxima (30,5 %), al igual que para el 2016. Al recordar la Figura 4.2 no es extraño que durante este mes la clorofila sea máxima, además en la misma figura se ve como noviembre y diciembre del 2008 ocupan los lugares con mayor concentración para esos meses.

En el primer panel de la Figura 4.10, se puede ver que el día 15 de noviembre las mayores concentraciones de clorofila se presentan en la zona sur, a diferencia del 2 de noviembre donde estas concentraciones se emplazan más al norte. No se puede declarar nada con respecto a la magnitud de la zona abarcada para ambos días pues a la vista es similar. En la misma Figura 4.10 segundo panel, se observa que la clorofila desde el 16 de noviembre al 2 de diciembre disminuyó abruptamente.

Al analizar la influencia de las tormentas noviembre 1 y 2 se puede establecer que el 15 y 16 de noviembre, días con mayor área afectada por concentraciones altas de clorofila *a*, son consecuencias de la primera tormenta finalizada el día 11 de noviembre (ver Tabla 4.5). Además, la Figura 4.8 panel (a), nos expone que noviembre 1 corresponde a la primera tormenta de mayor magnitud en el periodo septiembre-noviembre 2008, por lo que su ocurrencia arrastró sedimentos depositados en los estuarios aledaños desde a lo menos 2 meses y medio previo a la fecha de su inicio, distinto es el caso de Noviembre 2 cuyo inicio es tan sólo 10 días posterior al fin de Noviembre 1, lo que podría explicar que en las fechas posteriores, la concentración de clorofila vaya en descenso hasta alcanzar su máximo natural en noviembre.

Al analizar la Figura 4.9 periodo enero-abril, junto con las tormentas febrero y abril que traen asociadas un incremento del caudal, se puede observar que la clorofila *a*, panel (d), vuelve a su descenso natural a excepción de abril donde vuelve a aumentar. En la Figura 4.11 primer panel, se observan los días 5 y 24 de febrero donde se ve un claro aumento de las concentraciones de clorofila *a* iguales o superiores a 10 mg/m³, lo cual se podría explicar debido a que febrero representa la primera tormenta de los últimos dos meses y medio (ver Figura 4.9).

Igualmente, en la Figura 4.11 segundo panel, se ve que el 14 de abril hay más zonas con concentraciones altas de clorofila que el 25 de marzo, esto también se evidencia en la Figura 4.9, donde las concentraciones de clorofila para el mes de abril suben en vez de bajar con su curso natural. En esta misma figura se observa la tormenta de abril de gran magnitud (~200m³/s) que a la vez es la primera tormenta luego de la de febrero, dos meses antes, el lapso entre estas tormentas y la magnitud de abril podrían explicar porque la clorofila aumenta en ese mes en vez de disminuir.

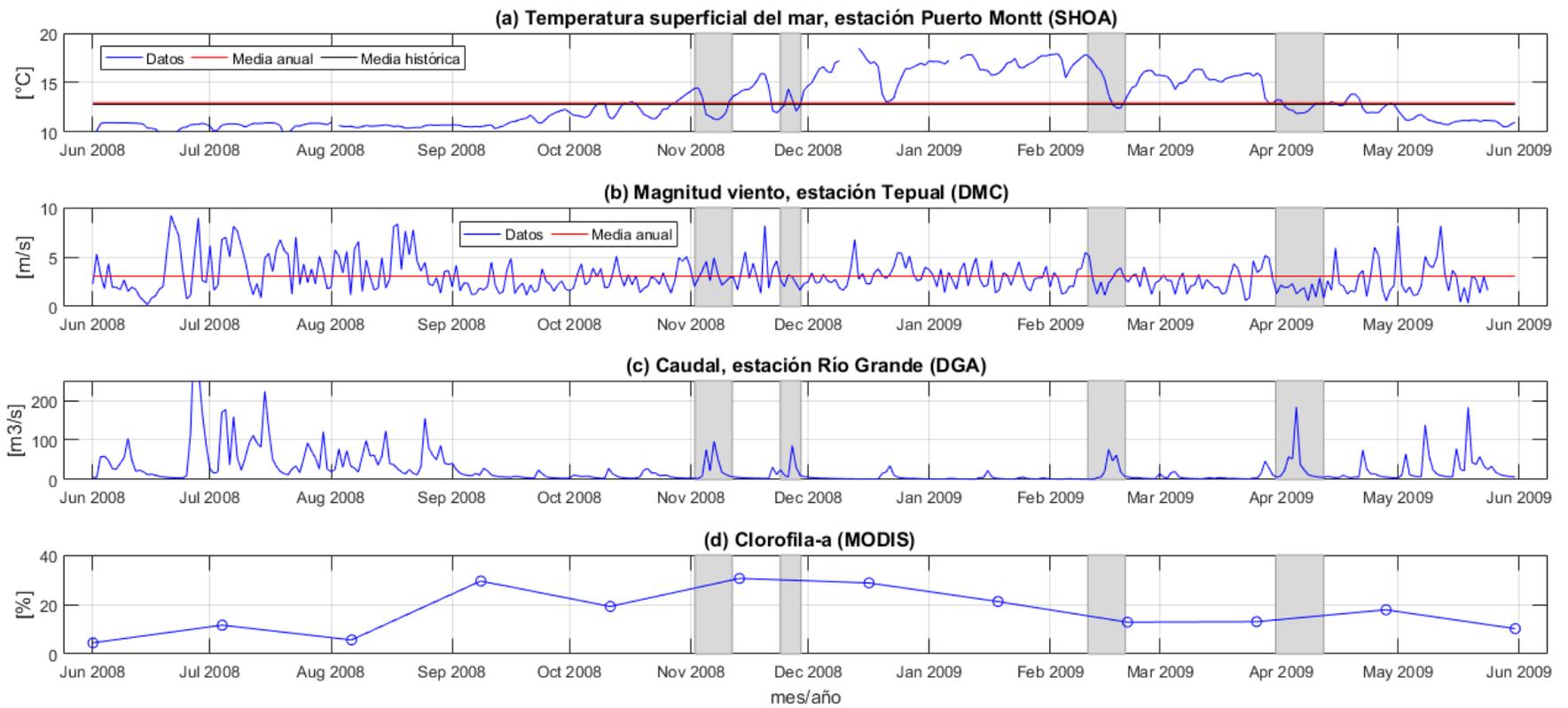


Figura 4.8: Evento 2009, vista anual. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).

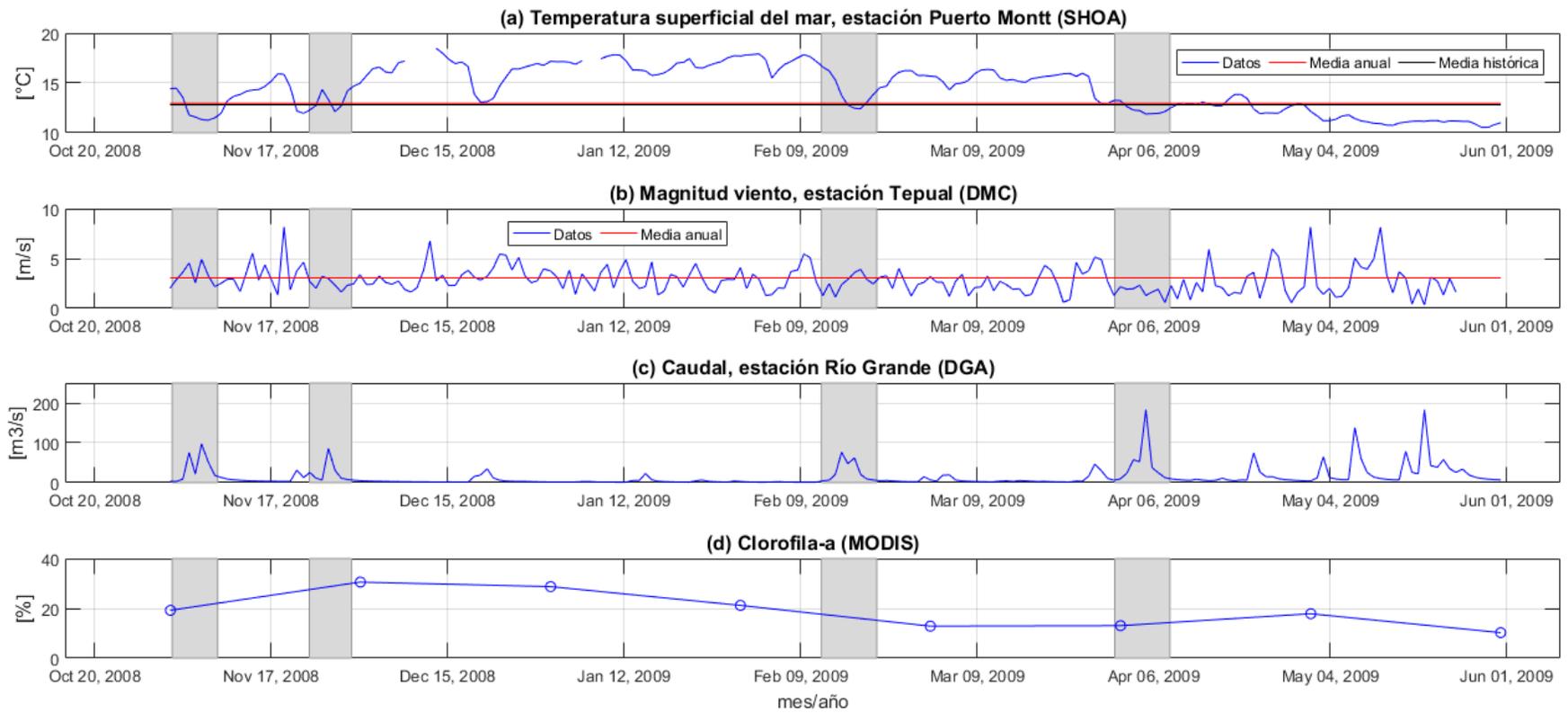


Figura 4.9: Evento 2009, vista noviembre-abril. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).

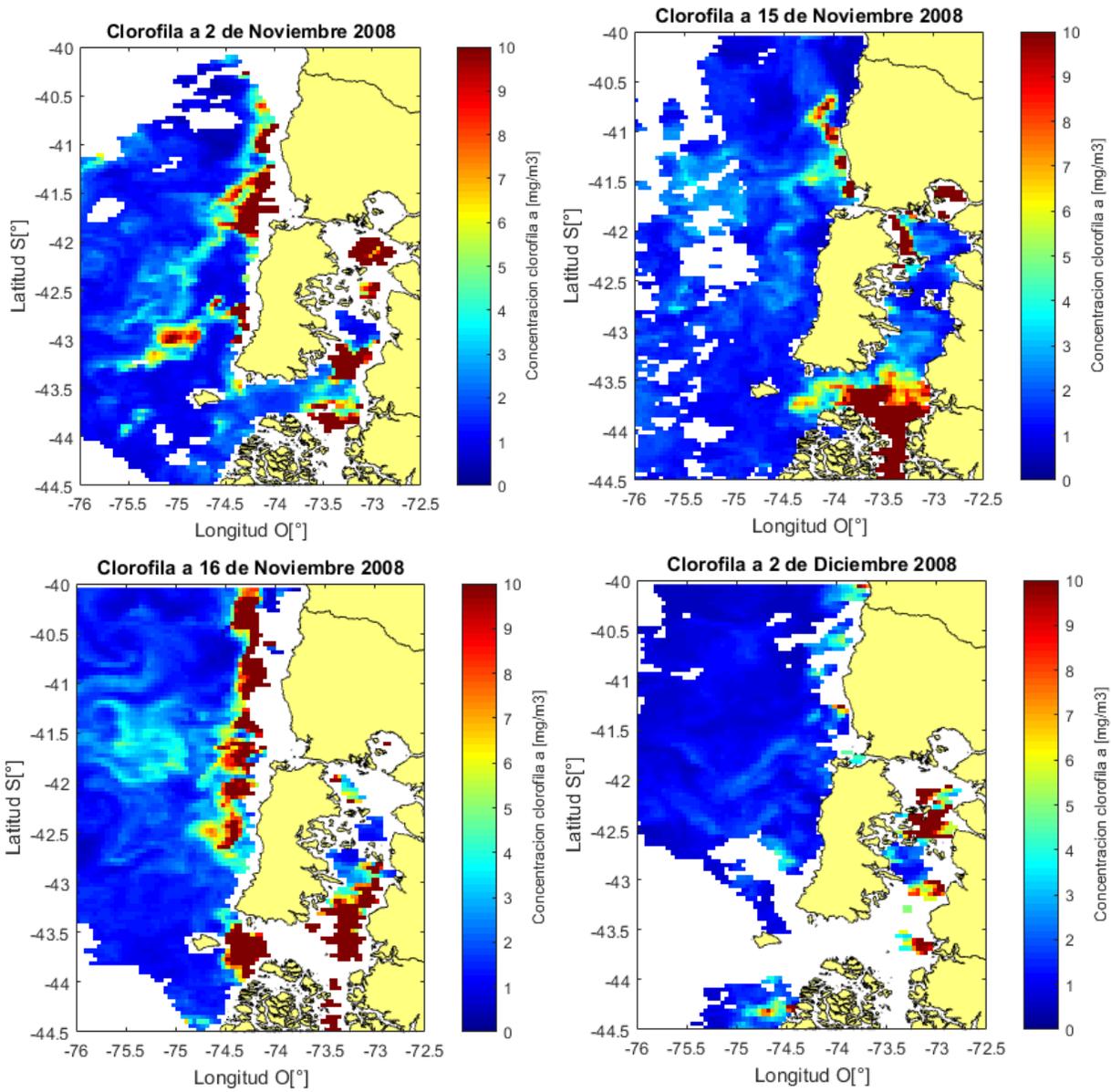
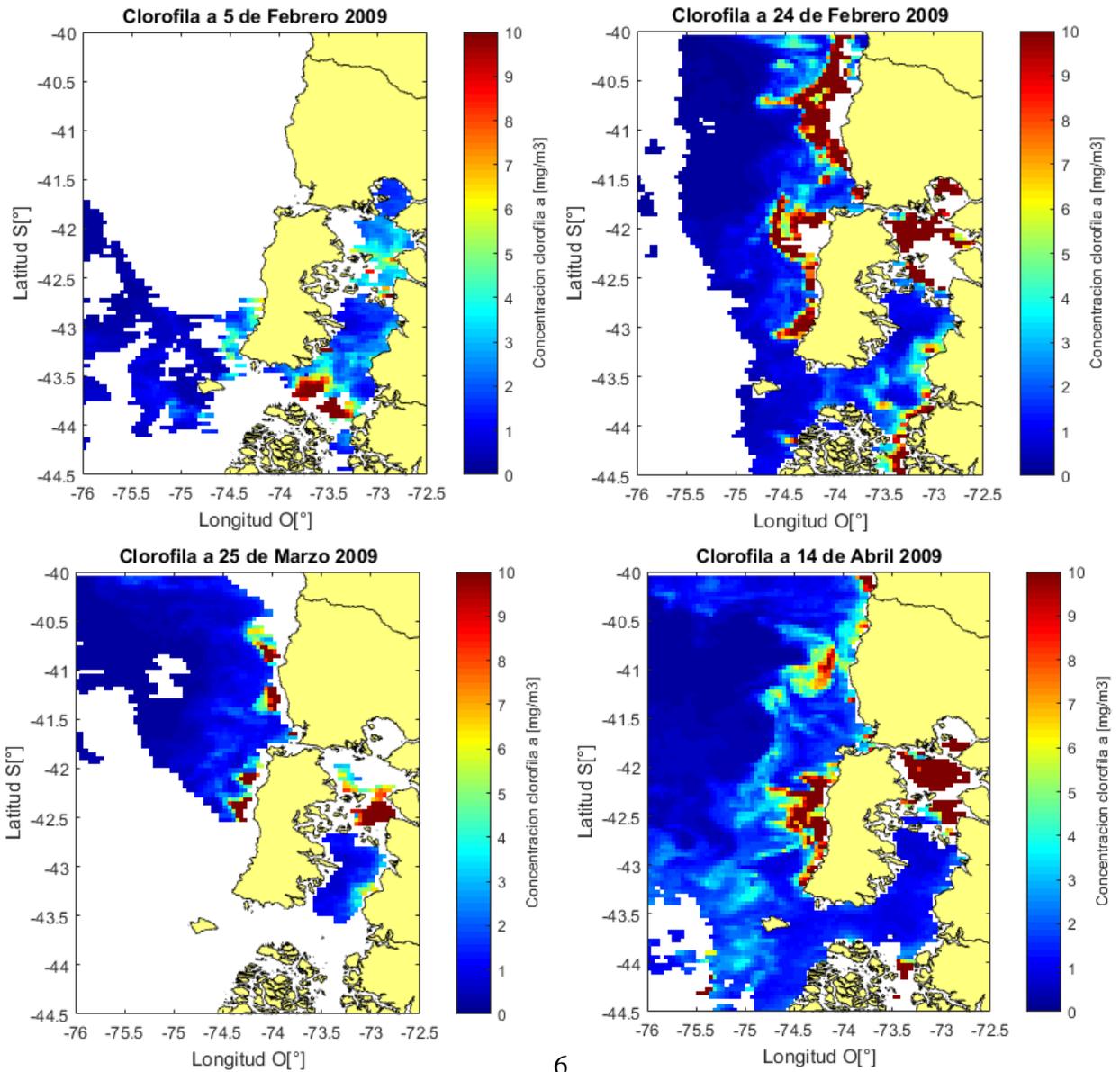


Figura 4.10: Imágenes MODIS de clorofila a diarias para diferentes fechas del evento 2009. En rojo oscuro se resaltan las zonas con concentraciones iguales o mayores a 10mg/m^3 de clorofila *a* (Elaboración propia en base a imágenes MODIS diarias de clorofila *a*).



6

Figura 4.11: Imágenes MODIS de clorofila a diarias para diferentes fechas del evento 2009. En rojo oscuro se resaltan las zonas con concentraciones iguales o mayores a 10mg/m^3 de clorofila *a* (Elaboración propia en base a imágenes MODIS diarias de clorofila *a*).

4.2.2 Evento 2006

En la Figura 4.12 y Figura 4.13 se ven comportamientos a nivel general similares a los de los casos anteriores, donde la temperatura superficial del mar aumenta de diciembre a marzo y la clorofila llega a su máximo en diciembre, además se tiene 3 incrementos de caudal significativo dentro del periodo noviembre-abril, de los cuales sólo dos presentan aumento de la magnitud del viento para la misma fecha.

Tabla 4.6: Caracterización de la fecha de la tormenta del evento 2006.

Tormenta	Día de inicio	Día de fin
Noviembre	18	30
Enero	4	14
Marzo	5	24

De la Figura 4.12 se ve un punto muy sobre lo normal equivalente al mes de diciembre 2005, el cual también resalta en la Figura 4.1 pues es el máximo presentado para todo el estudio, para este caso el máximo de clorofila se presenta el mes siguiente a la tormenta de noviembre. En la Figura 4.13 panel(d), se ve que la clorofila del mes de abril, posterior a la tormenta marzo, se mantiene estable en vez de disminuir naturalmente, es más, de la Figura 4.12 se observa que en mayo vuelve a aumentar a pesar que la temperatura ha disminuido bajo la media histórica, panel (a).

Si bien el caudal de marzo es menor al de las otras dos tormentas comparativamente hablando, existe un periodo de dos meses que le antecede sin tormentas significativas por lo que el arrastre de sedimentos en marzo podría ser importante.

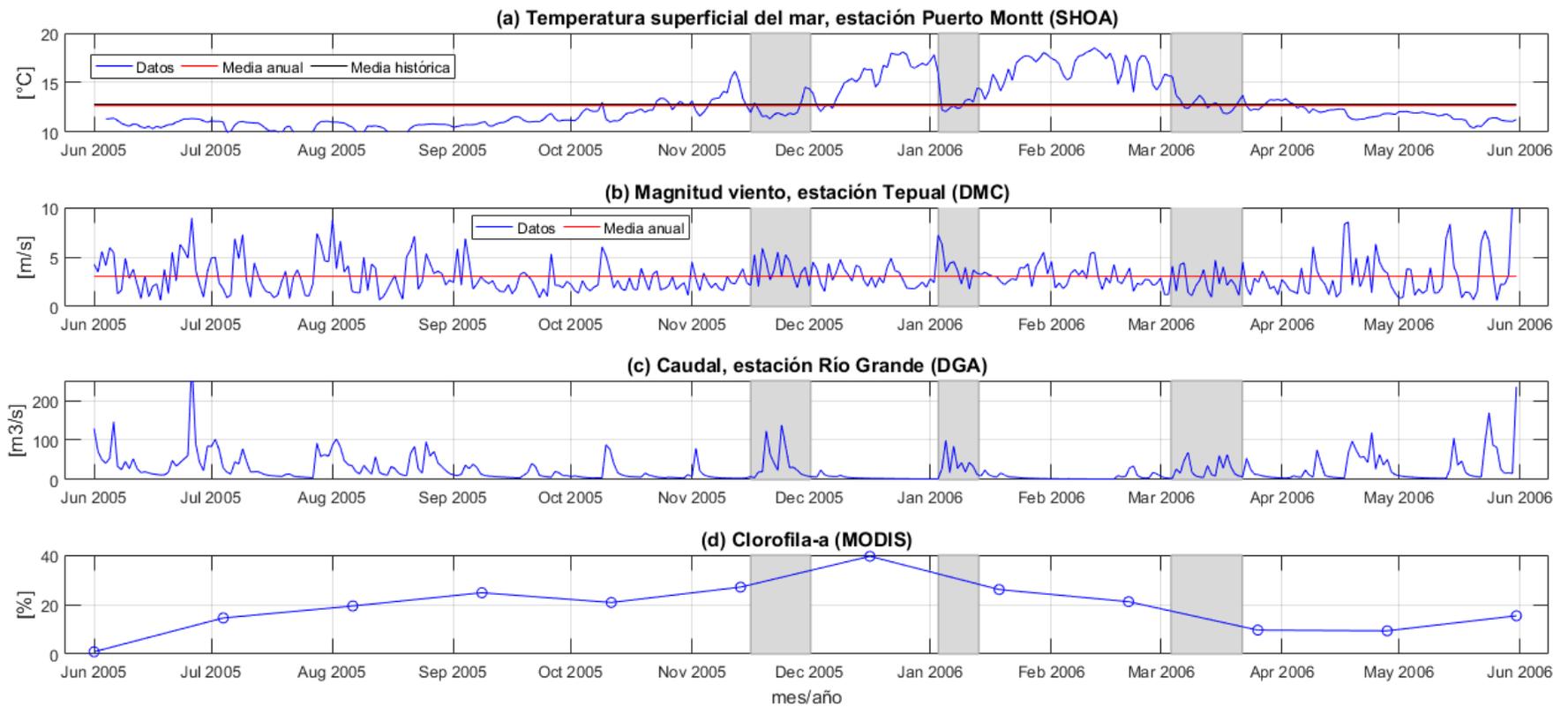


Figura 4.12: Evento 2006, vista anual. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).

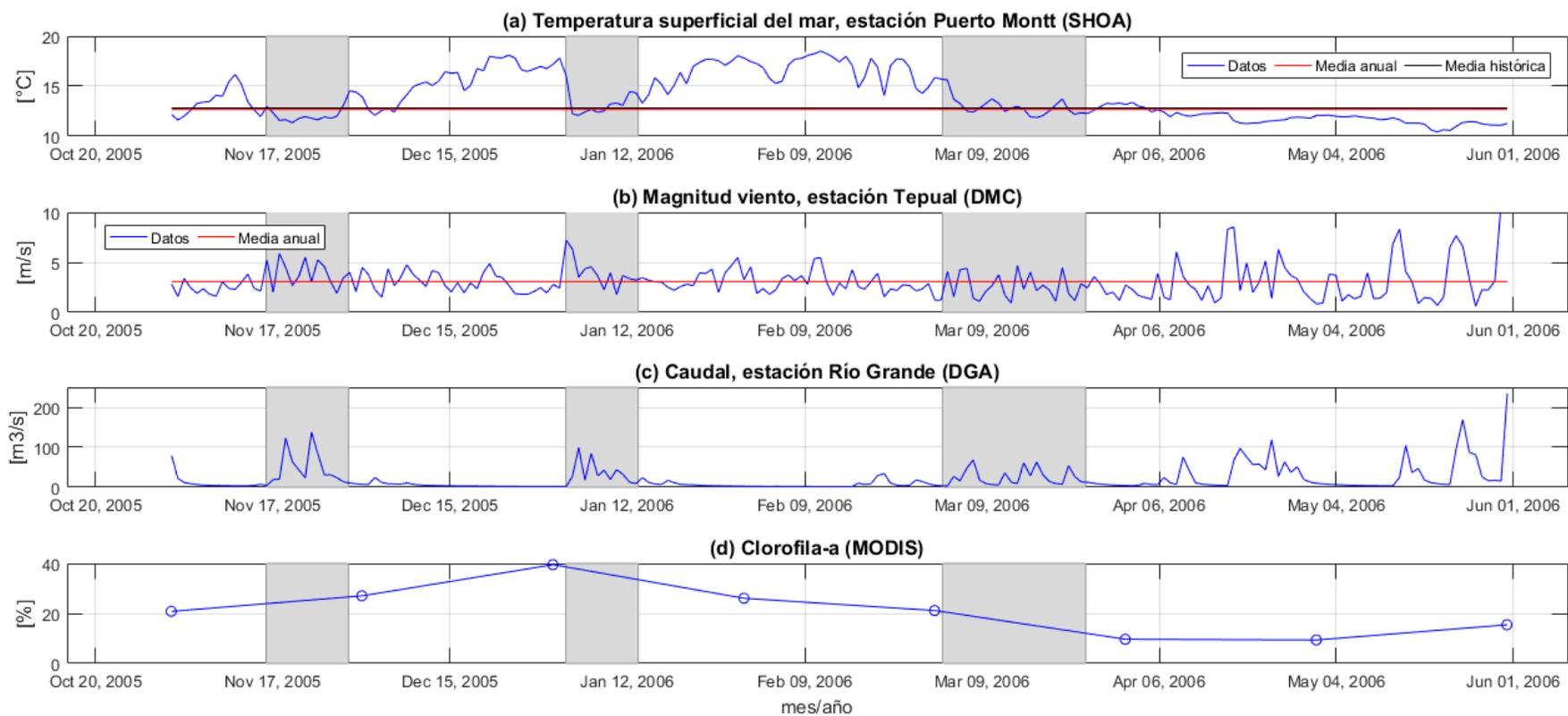


Figura 4.13: Evento 2006, vista noviembre-abril. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).

4.2.3 Evento 2002

De la Figura 4.14 y Figura 4.15 también se aprecia un comportamiento general similar a los casos anteriores, donde la temperatura aumenta considerablemente, sobre los 13°C, entre los meses de diciembre y marzo. Se destacan 3 tormentas: las dos primeras de intensidad baja a diferencia de la tercera que es de gran intensidad ($\sim 150 \text{ m}^3/\text{s}$), la magnitud del viento asociada a estas tormentas es variable, ya que en la segunda tormenta esta no aumenta con respecto a la media estacional, a diferencia de las magnitudes de las demás tormentas donde se supera la media estacional.

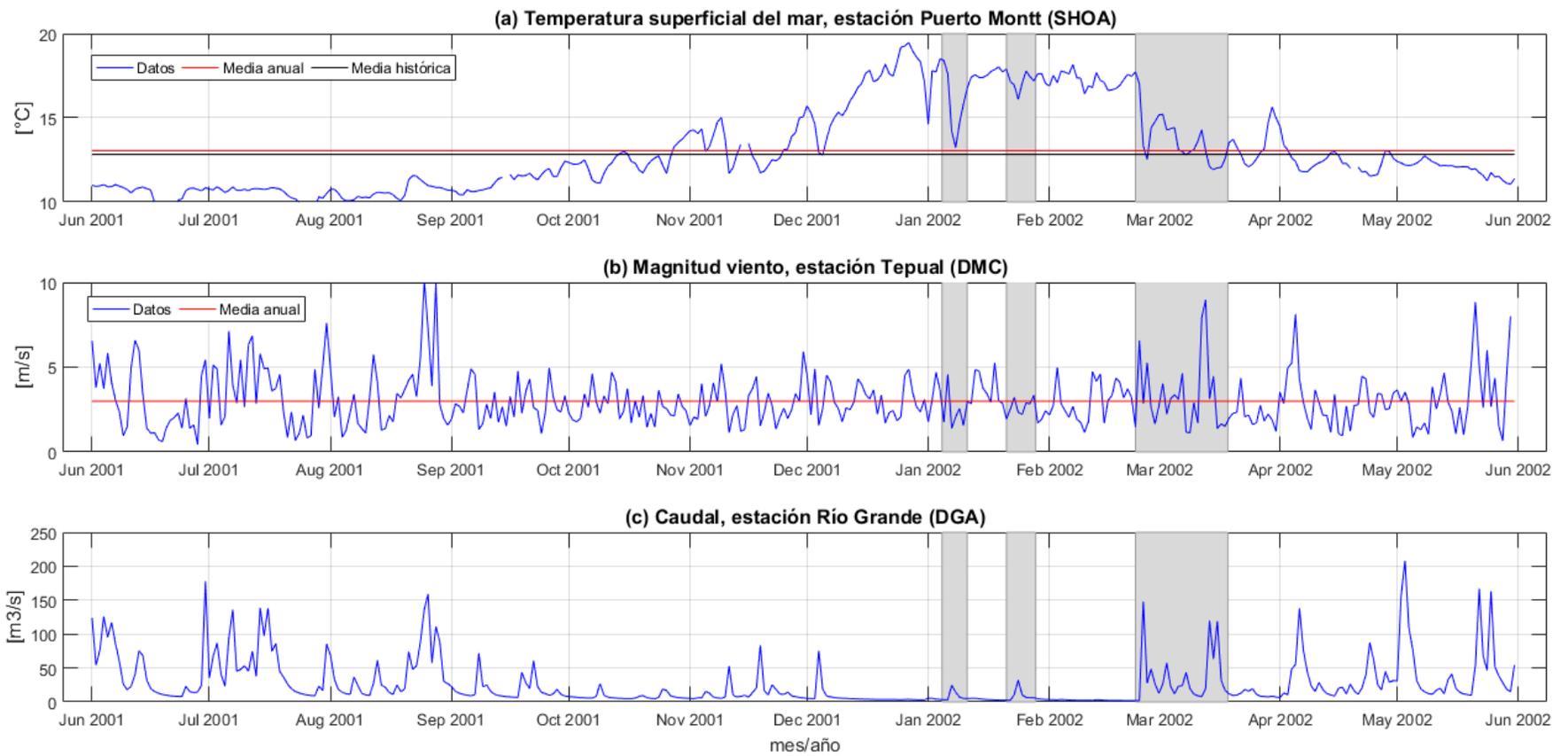


Figura 4.14: Evento 2002, vista anual. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).

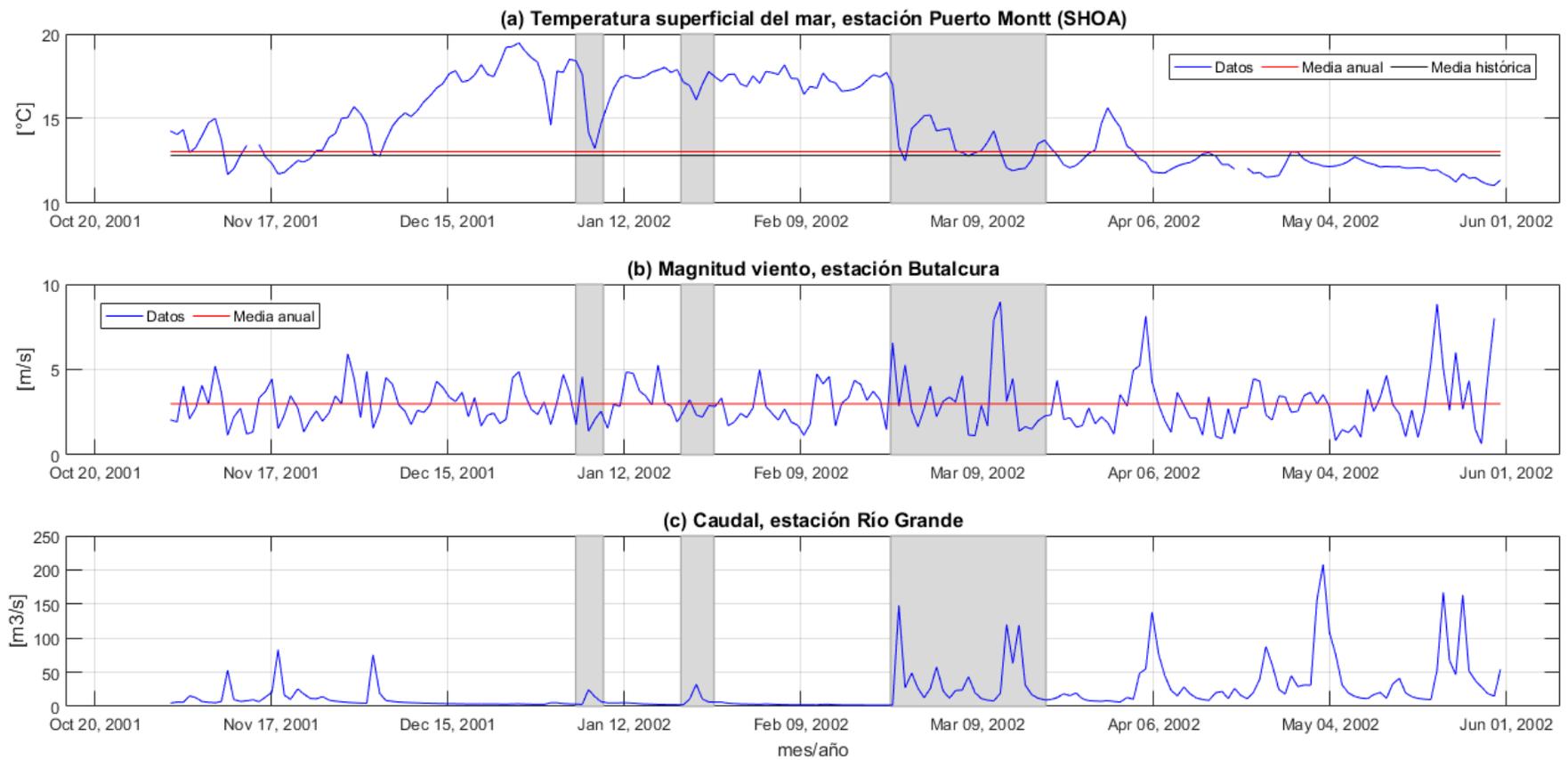


Figura 4.15: Evento 2002, vista noviembre-abril. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).

A continuación, se presenta la Tabla 4.7 donde se encuentra la intensidad de los forzantes y el comportamiento de la clorofila *a* para cada tormenta, en asterisco se encuentran los meses cuyas concentraciones son mayores a la concentración media del mes. Si bien se muestra un resumen de la información, es importante destacar que no se pueden analizar los factores por sí solos.

Tabla 4.7: Resumen de las forzantes y variable de estado para cada tormenta (Elaboración propia).

Año	ENSO	Mes de la tormenta	Forzante	Intensidad	Comportamiento de clorofila durante el mes	Comportamiento de clorofila durante el mes siguiente
2015-2016	El Niño	Noviembre	Caudal	Media	Máximo*	Disminuye*
			Viento	Media		
		Abril	Caudal	Alta	Se mantiene*	Se mantiene*
			Viento	Alta		
2008-2009	Transición Niña-Niño	nov-01	Caudal	Media	Máximo*	Se mantiene*
			Viento	Media		
		nov-02	Caudal	Media	Máximo*	Se mantiene*
			Viento	Baja		
		Febrero	Caudal	Media	Disminuye*	Se mantiene
			Viento	Baja		
		Abril	Caudal	Alta	Aumenta*	Disminuye
			Viento	Baja		
2005-2006	Transición Niña-Niño	Noviembre	Caudal	Media	Aumenta*	Máximo*
			Viento	Media		
		Enero	Caudal	Media	Disminuye*	Disminuye*
			Viento	Alta		
		Marzo	Caudal	Baja	Disminuye	Se mantiene
			Viento	Media		
2013-2014	El Niño	Noviembre	Caudal	Baja	Se mantiene	Aumenta
			Viento	Media		
		Febrero	Caudal	Baja	Se mantiene*	Se mantiene*
			Viento	Media		
2011-2012	Transición Niña-Niño	Noviembre	Caudal	Media	Se mantiene	Se mantiene
			Viento	Media		
		Enero	Caudal	Baja	Se mantiene	Disminuye
			Viento	Alta		
		Febrero	Caudal	Media	Disminuye	Aumenta
			Viento	Media		
		Abril	Caudal	Baja	Aumenta*	Disminuye

Año	ENSO	Mes de la tormenta	Forzante	Intensidad	Comportamiento de clorofila durante el mes	Comportamiento de clorofila durante el mes siguiente
			Viento	Baja		
2010-2011	La Niña	Noviembre	Caudal	Alta	Disminuye	Aumenta
			Viento	Media		
		Diciembre	Caudal	Media	Aumenta	Se mantiene
			Viento	Media		
		Enero	Caudal	Media	Se mantiene	Se mantiene
			Viento	Media		
2004-2005	El Niño	Marzo	Caudal	Alta	Disminuye	Aumenta
			Viento	Alta		
2001-2002	Transición Niña-Niño	ene-01	Caudal	Baja	-	-
			Viento	Media		
		ene-02	Caudal	Baja		
			Viento	Baja		
		Marzo	Caudal	Media		
			Viento	Alta		

Nota: si existe asterisco significa que es mayor a la concentración normal del mes Tabla 4.2.

Se debe mencionar que todos los eventos de gran magnitud muestran concentraciones de clorofila a mayores que las promedio (Tabla 4.7) durante los meses donde se desarrollan las tormentas identificadas.

La Tabla 4.8 expone los criterios bajo los cuales se declara la intensidad del viento y el caudal:

Tabla 4.8: Criterios para definir intensidad de los forzantes (Elaboración propia).

	Caudal (m ³ /s)	Viento (m/s)
Baja	<50	<1,48
Media	(50-150)	>1,48
Alta	>150	>5

A continuación, se muestra la Tabla 4.9 donde se presenta un resumen de las combinaciones de los forzantes para el total de eventos estudiados:

Tabla 4.9: Resumen de combinaciones para todos los eventos (Elaboración propia).

Viento/Caudal	Baja	Media	Alta	Total
Baja	2	2	1	5
Media	4	7	1	12
Alta	1	2	2	5
Total	7	11	4	22

De la Tabla 4.9 al ver la acción de los forzantes según sus distintas intensidades se tiene que la que más se repite corresponde a viento medio con cualquier caudal (12 casos), seguido de caudal medio con cualquier viento (11 casos). En el tercer lugar, con 7 casos se tiene caudal bajo con cualquier viento. Se destaca que la combinación de forzantes más repetida corresponde a caudal medio y viento medio con 7 casos. También se puede ver que la distribución de casos tanto para el caudal como para el viento es heterogénea.

A continuación, se presenta la Tabla 4.10, en donde se ven los porcentajes de ocurrencia asociados a cada combinación de forzantes:

Tabla 4.10: Porcentajes de ocurrencia para las combinaciones de forzantes existentes (Elaboración propia).

Casos	Porcentaje de ocurrencia %
Caudal medio - viento medio	31,2
Caudal bajo - viento medio	18,2
Caudal bajo-viento bajo, caudal bajo-viento medio, caudal medio-viento alto, caudal alto-viento alto	9,1
Caudal bajo- viento alto, caudal medio-viento alto, caudal alto-viento alto	4,5

De la Tabla 4.10 se observa que el caso que más se repite es caudal y viento de intensidad media, representando el 31,2 % de los casos. Luego se tiene viento medio con caudal bajo con 18,2% de los casos. Esta distribución de porcentajes, nos sugiere que la acción conjunta de caudal y viento es influyente pues representa casi un tercio de los casos. Se debe explicar que, aunque se exponga un caudal como bajo no quiere decir que el río lleve poca agua, si no que la magnitud de la tormenta no es grande comparativamente hablando, ya que el hecho de que exista la variable caudal implica que se tiene un flujo mayor que el base, por lo que se está en presencia de una tormenta.

Además, la Figura 4.16 representa los resultados divididos según el comportamiento de la clorofila *a* durante el mes de la tormenta:

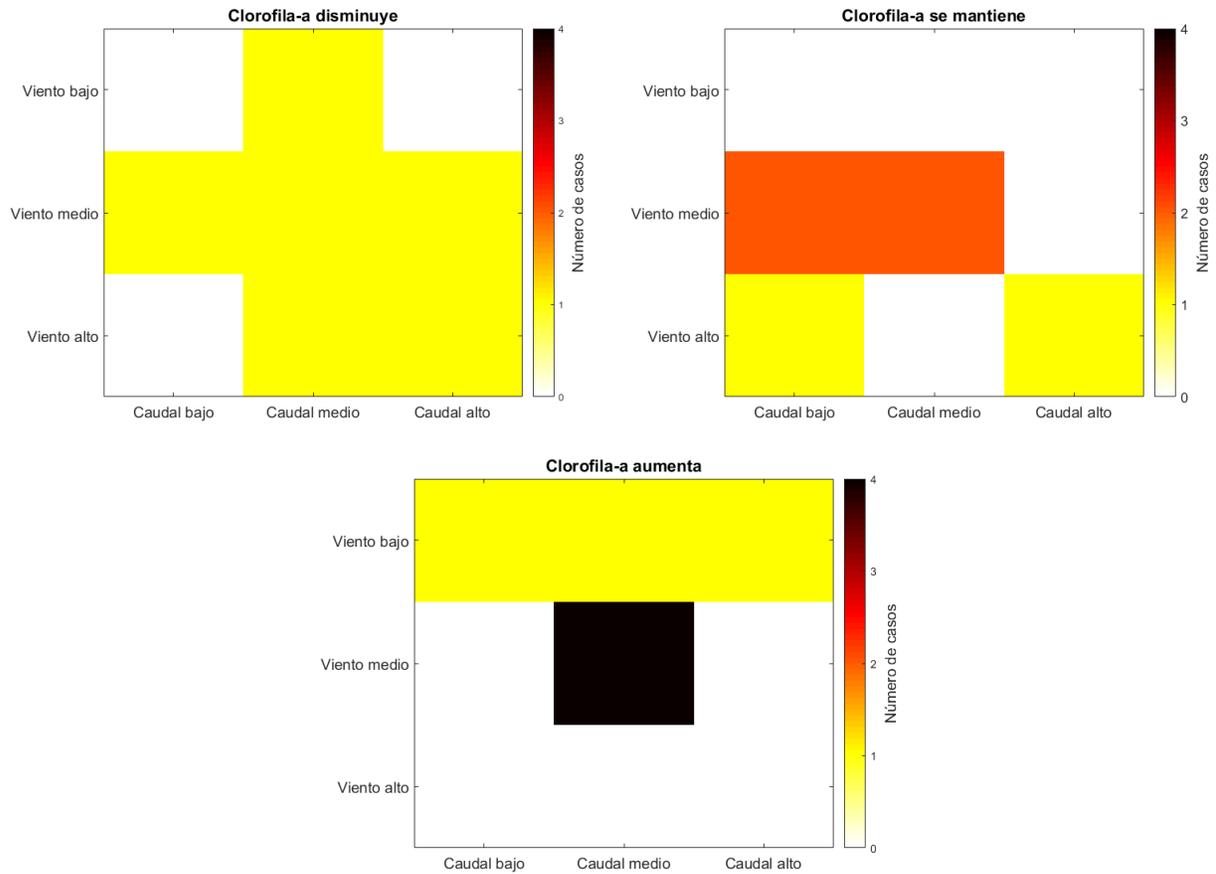


Figura 4.16: Combinaciones de la intensidad de los forzantes, divididas por el comportamiento de la clorofila a durante el mes de la tormenta (Elaboración propia).

De la Figura 4.16 se observa que cuando la clorofila a disminuye la ocurrencia de combinaciones no es mayor a 1 en ningún caso. Distinto es cuando la clorofila a se mantiene, donde se ve que las combinaciones de forzantes se concentran entre el viento medio y alto con ocurrencias de 2 y 1 respectivamente. Para el caso en que la clorofila a aumenta durante el mes de la tormenta, se tiene que las combinaciones de forzantes se mueven entre el viento bajo y medio, destacándose los 4 casos con viento y caudal medio.

Capítulo 5: Conclusiones

En este trabajo se estudiaron y caracterizaron las condiciones ambientales históricas en la región de Los Lagos, con el fin de determinar algunos de los parámetros que modulan los FAN. Para esto, en base a una revisión bibliográfica, se elaboró un modelo conceptual, a partir del cual se definieron los forzantes a estudiar. Posteriormente, se obtuvieron los registros de aquellos forzantes y las fechas donde ocurrió FAN en la zona de estudio. Estos registros se solicitaron a diferentes servicios públicos del Estado de Chile como la DGA, el SHOA, INIA, DMC, entre otros. También, se utilizaron imágenes MODIS para ver la variabilidad temporal y espacial de la clorofila *a*. Para definir las fechas de los eventos se investigó en diarios y se utilizó información entregada por la SEREMI de Salud de Los Lagos. Luego, se realizó un primer análisis de los datos, en donde se seleccionaron los forzantes definitivos con los que se trabajó y las estaciones que se ocuparon en la investigación. Finalmente, se desarrolló la búsqueda de patrones para lo cual se trabajó en primera instancia con el evento del 2016, del cual se obtuvieron tres hipótesis que se analizaron con los resultados de los eventos restantes.

En cuanto al modelo conceptual, se tiene que el florecimiento de algas se representa por medio del crecimiento del fitoplancton que corresponde a la variable de estado del modelo, este se da bajo condiciones específicas de nutrientes y temperatura principalmente. A la vez, la columna de agua de la zona de estudio se presenta estratificada para ambas variables, pero esta estratificación no es permanente dado que existen factores como el viento, el que pueden activar la mezcla vertical de la columna de agua; así como también, el caudal de los estuarios aledaños que transportan agua con diferente temperatura y concentración de nutrientes. Dado lo anterior, es que el modelo conceptual del estudio involucra factores físicos y fisicoquímicos, dentro de los primeros se encuentran: los caudales, la batimetría de la zona, la temperatura del océano y condiciones meteorológicas como la velocidad del viento. Los factores fisicoquímicos, por otra parte, involucran la temperatura superficial del agua, los nutrientes y el oxígeno disuelto.

Del análisis detallado del evento del 2016 (ver Figura 4.3 y Figura 4.4), se evidenciaron dos grandes tormentas en el periodo primavera-verano e inicio de otoño, donde la TSM sobrepasa notoriamente la media histórica y la media del año, a la vez que la clorofila *a* se presenta alta durante y posterior a las tormentas. Es así como se postulan tres hipótesis que podrían explicar algunas de las causas de los FAN: 1) la ocurrencia de tormentas y el consecuente aumento del caudal de los ríos afluentes, podría traer condiciones favorables para los florecimientos de microalgas, debido al arrastre de nutrientes desde el continente hacia la costa; 2) los fuertes vientos podrían generar mezcla vertical de la capa superficial con la profunda, lo que significa también un transporte de aguas más frías de la capa profunda a la superficial, y más rica en nutrientes, favoreciendo a la carga nutritiva para un florecimiento de microalgas; 3) los FAN ocurridos en la zona se desarrollan en años que predomina El Niño debido al aumento de la TSM.

Del análisis del resto de los eventos (ver Tabla 4.7), primero se tiene que todos presentaron tormentas a estudiar. Además, se tiene que cada forzante por sí sola no es determinante dentro del sistema, pues se ve que es la mezcla de los factores lo que tiene repercusiones en la clorofila *a*. Dentro de esta mezcla, la que más se repite es caudal medio con viento medio y caudal bajo con viento medio, lo que nos sugiere que cuando se presentan vientos medios con alguna intensidad de caudal se podrían dar las condiciones para un florecimiento de microalgas, al igual que cuando ambos factores (caudal y viento) trabajan con similar intensidad. Con respecto a la temperatura superficial del mar, se puede decir que para la totalidad de los eventos esta era mayor que la media

histórica y mayor a su respectiva media anual. A la vez al recordar la Tabla 4.4, se tiene que el 38% de los eventos se desarrolla bajo El Niño y el 50% en una transición de La Niña a El Niño. También, el estudio de estos eventos por medio de imágenes satelitales diarias resulta enormemente útil pues se obtienen resultados claros. Lamentablemente, la zona de estudio es de alta nubosidad, por lo que las imágenes expuestas no siempre corresponden al día más conveniente para analizar.

Dado lo anterior, se puede decir que la primera y segunda hipótesis planteadas en la sección 4.1 podrían estar en lo cierto, pero se requiere más información para declararlo. Esto debido a que si bien, los resultados sugieren una relación de los forzantes caudal y viento con los FAN, se deberían medir los nutrientes directa y permanentemente, para tener la certeza que estos forzantes son los que mueven los nutrientes en la columna de agua. Respondiendo a la tercera hipótesis planteada, se puede decir que como el 38% de los casos se desarrolla en pleno El Niño, la hipótesis no está del todo correcta. Más bien se podría decir que, dado que el 88% de los casos se desarrolla bajo El Niño o en transición La Niña a El Niño, los florecimientos de algas se desarrollan mayoritariamente en años de transición a El Niño o bajo este fenómeno. Esto se podría explicar en el hecho que durante episodios La Niña, la precipitación aumenta en el extremo sur de Chile (Quintana, 1999), por lo que en la transición de La Niña a El Niño hay una combinación del incremento del caudal con el aumento de la temperatura, siendo esta mayor a la media histórica.

Cabe recordar que el sistema estudiado no es un sistema aislado, por lo que existen diferentes factores que pueden tener repercusiones en él. Un ejemplo de esto, es el cambio climático que se expresa con tormentas cada vez más aisladas pero con mayor intensidad, provocando que el arrastre de sedimentos intrínseco a la tormenta aumente y en consecuencia los florecimientos de microalgas también. Otro efecto del cambio climático es el aumento de la temperatura superficial del agua, lo que tiene directa relación con los FAN, ya que estos se desarrollan en épocas donde la TSM es elevada, de esta forma se incrementaría la intensidad y/o frecuencia de los florecimientos de algas nocivas.

Si bien existe mucha información sobre los FAN, aún es un tema para seguir descubriendo. Para darle continuidad a esta línea de investigación se requiere de mayor información tanto temporal como espacial de los forzantes estudiados y de los nutrientes, por lo que se sugiere mejorar los monitoreos de calidad de agua en la costa e incorporar puntos de medición en los estuarios aportantes. De esta forma, se tendría información directa para elaborar la relación tormenta-nutrientes-bloom. Además, se sugiere modelar el sistema para ver la respuesta de este a cada forzante en particular, de esta forma se podría evaluar si es más sensible al caudal que arrastra nutrientes de cuencas aledañas durante tormentas o al viento que realiza mezcla vertical de la columna de agua provocando surgencia de nutrientes. Finalmente, se debe mencionar que los resultados presentados aquí fundan las bases para desarrollar un enfoque heurístico para la predicción de FAN.

Bibliografía

- Anderson, D., & Rensel, J. (2016). *Harmful Algal Blooms Assessing Chile's Historic HAB events of 2016*.
- Baek, S., Shimode, S., Han, M.-S., & Kikuchi, T. (2008). Growth of dinoflagellates, *Ceratium furca* and *Ceratium fusus* in Sagami Bay, Japan: The role of nutrients. *Harmful Algae* 7, 729-739.
- BBC Mundo. (4 de Mayo de 2016). Qué es la marea roja por la que declararon una catástrofe en Chile. *BBC*.
- Bello, M., Barbieri, M., Salinas, S., & Soto, L. (2004). Surgencia costera en la zona central de Chile, durante el ciclo. En C. O. Nacional, *El Niño-La Niña 1997-2000. Sus Efectos en Chile*. (págs. 77-94). Valparaíso: Comité Oceanográfico Nacional.
- Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. (22 de diciembre de 2017). Obtenido de <https://www.bcn.cl/siit/nuestropais/region10>
- Clément, A., & Lembeye, G. (1994). *Manejo y perspectivas futuras de las floraciones algales nocivas en Chile*. Montevideo, Uruguay: Comisión Oceanográfica Intergubernamental.
- Clément D., A., Córdova R., J., Guzmán M., L., Lagos W., N., Lembeye V., G., Rodríguez V., L., . . . Villarroel G., O. (1999). *Plan nacional sobre floraciones de algas nocivas en Chile*.
- Clément, A., Lincoqueo, L., Saldivia, M., Brito, C., Muñoz, F., Fernandez, C., . . . Crescini, R. (2016). Climatic anomalies and harmful flagellates blooms in southern Chile. *The 17th International Conference on Harmful Algae*. Brasil.
- Comisión Marea Roja. (2016). *Informe Final* .
- Comité Oceanográfico Nacional, Comisión Nacional del Medio Ambiente y Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. (1999). *Plan Nacional sobre Floraciones de Algas Nocivas en Chile*.
- Deksheniaks, M., Donaghay, P., Sullivan, J., Rines, J., Osborn, T., & Twardowski, M. (2001). Temporal and spatial occurrence of thin phytoplankton layers in relation to physical processes. *Marine Ecology Progress Series*, 61-71.
- Deutsche Welle. (13 de Mayo de 2016). Marea roja de algas tóxicas en Chile es segundo mayor caso del mundo. *AQUA* .
- Durham, W., & Stocker, R. (Abril de 2012). Thin Phytoplankton Layers: Characteristics, Mechanisms, and Consequences. *Marine Science* , págs. 177-207.
- Earth Institute, Columbia University. (Octubre de 2017). *Internationales Research Institute for Climate and Society*. Obtenido de https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/forecasts/enso/2016-july-quick-look/?enso_tab=enso-sst_image

- Gonzalez, M. (22 de enero de 2016). Sernapesca y Autoridad Sanitaria confirman presencia de Marea Roja en cinco áreas de Chiloé. Chiloé, Los Lagos.
- Instituto de Salud Pública de Chile. (2012). *Programa Nacional de Vigilancia y Control de Intoxicaciones por Fenómenos Algales Nocivos Chile 2012*.
- Instituto de Salud Pública de Chile. (2013). *Programa Nacional de Vigilancia y Control de Intoxicaciones por Fenómenos Algales Nocivos*.
- Iriarte, J., González, H., Liu, K., Rivas, C., & Valenzuela, C. (2007). Spatial and temporal variability of chlorophyll and primary productivity in surface waters of southern Chile (41.5-43°S). *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 471-480.
- Kasai, A., Kurikawa, Y., Ueno, M., Robert, D., & Yamashita, Y. (2010). Salt-wedge intrusion of seawater and its implication for phytoplankton dynamics in the Yura Estuary, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 408-414.
- Lembeye, G. (2006). Florecimientos de algales nocivos en aguas australes. En C. O. Nacional, *Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos* (págs. 99-103). Valparaíso.
- Lévy, M. (2008). The Modulation of Biological Production by Oceanic Mesoscale Turbulence. En J. Weiss, & A. Provenzale, *Transport and Mixing in Geophysical Flows* (págs. 219–261). Berlin Heidelberg: Springer.
- Mardones, J., Bolch, C., Guzmán, L., Paredes, J., Varela, D., & Hallegraeff, G. (2016). Role of resting cysts in Chilean *Alexandrium catenella* dinoflagellate blooms revisited. *Harmful Algae*, 238-249.
- Mardones, J., Rojas, X., Clément, A., & Aparicio, C. (2010). *Alexandrium catenella* during 2009 in Chilean waters, and recent expansion to coastal ocean. *Harmful Algae News*, 8-9.
- McCabe, R., Hickey, B., Kudela, R., Lefebvre, K., Adams, N., Bill, B., . . . Trainer, V. (Junio de 2017). An unprecedented coastwide toxic algal bloom linked to anomalous ocean conditions. *Geophysical Research Letters*, págs. 10366–10376.
- McPhee-Shaw, E. (2006). Boundary–interior exchange: Reviewing the idea that. *Deep-Sea Research II*, 42-59.
- MINSAL – ISP – SEREMIS. (2011). *Programa de vigilancia de fenómenos algales nocivos (FAN) en Chile*.
- Molinet, C., Lafon, A., Lembeye, G., & Moreno, C. (2003). Patrones de distribución espacial y temporal de floraciones de *Alexandrium catenella* (Whedon & Kofoid) Balech 1985, en aguas interiores de la Patagonia noroccidental de Chile. *Revista chilena de historia natural*, 681-698.

- Muñoz Retamal, A. (2018). *Aplicación de herramientas de percepción remota para la determinación del balance hídrico en humedales altioplánicos*. Santiago.
- NASA. (22 de Agosto de 2017). *MODIS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*. Obtenido de <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>
- NASA. (14 de Enero de 2018). *NASA Ocean Color*. Obtenido de https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/chlor_a/#sec_2
- Orialis Villarroel, Q. L. (2002). *Programa de vigilancia de la marea roja en Chile*.
- Orialis Villarroel, Q. L. (2003). *Programa de vigilancia de la marea roja en Chile*.
- Orialis Villarroel, Q. L. (2004). *Programa de vigilancia de la marea roja en Chile*.
- Orialis Villarroel, Q. L. (2005). *Programa de vigilancia de la marea roja en Chile*.
- Orialis Villarroel, Q. L. (2006). *Programa de vigilancia de la marea roja en Chile*.
- Orialis Villarroel, Q. L. (2007). *Programa de vigilancia de la marea roja en Chile*.
- Orialis Villarroel, Q. L. (2008). *Programa de vigilancia de la marea roja en Chile*.
- Orialis Villarroel, Q. L. (2009). *Programa de vigilancia de fenómenos algales nocivos (FAN) en Chile*.
- Orialis Villarroel, Q. L. (2010). *Programa de vigilancia de fenómenos algales nocivos (FAN) en Chile*.
- Pedersen, F. (1994). The Oceanographic and Biological Tidal Cycle Succession in Shallow Sea Fronts in the North Sea and the English Channel. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 249-269.
- Quintana, J. (1999). "La sequía en Chile y el fenómeno de La Niña", Colegio de meteorólogos de Chile A.G.
- Ramírez, B., & Pizarro, E. (2005). Distribución de clorofila a y feopigmentos en los canales caudales chilenos comprendidos entre Puerto Montt y Laguna Sna Rafael, Chile. *Ciencia y Tecnología del Mar*, 45-62.
- Rodrigo, C. (2006). Topografía submarina en canales de la Patagonia Norte. En C. O. Nacional, *Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguasinteriores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos* (págs. 19-23). Valparaiso.
- Ryan, J., McManus, M., & Sullivan, J. (2010). Interacting physical, chemical and biological forcing of phytoplankton thin-layer variability in Monterey Bay, California. *Continental Shelf Research*, 7-16.

- Salgado Garrido, P. (2011). *Distribución espacio-temporal de ensamblajes de quistes de dinoflagelados productores de floraciones algales nocivas en sedimentos costeros del sur de Chile (región de Los Lagos) durante los últimos ~150 años*. Concepción .
- Seguel, M., Tocornal, M., & Sfeir, A. (2005). Floraciones algales nocivas en los canales y fiordos del sur de Chile. *Ciencia y Tecnología del Mar*, 5-13.
- Sellner, K., Doucette, G., & Kirkpatrick, G. (2003). Harmful algal blooms: causes, impacts and detection. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, págs. 383-406.
- Sepúlveda Steiner, O. (2015). *Efecto de la circulación baroclínica inducida por el viento en la mezcla vertical del fiordo Comau*. Santiago de Chile.
- Serra, T., Vidal, J., Casamitjana, X., Soler, M., & Colomer, J. (2007). The role of surface vertical mixing in phytoplankton distribution in a stratified reservoir. *Limnology and Oceanography*, 620-634.
- Sharples, J., Moore, M., Rippeth, T., Holligan, P., Hydes, D., Fisher, N., & Simpson, J. (2001). Phytoplankton distribution and survival in the thermocline. *Limnology and Oceanography* 46(3), págs. 486–496.
- Shimizu, K., Imberger, J., & Kumagai, M. (2007). Horizontal structure and excitation of primary motions in a strongly stratified lake. *Limnology and Oceanography* 56(2), págs. 2641–2655.
- Shutler, J., Davidson, K., Miller, P., Swan, S., Grant, M., & Bresnan, E. (Marzo de 2012). An adaptive approach to detect high-biomass algal blooms from EO chlorophyll-a data in support of harmful algal bloom monitoring. *Remote Sensing Letters*, págs. 101–110.
- Sievers, H. (2006). Temperatura y salinidad en canales y fiordos australes. En C. O.-P. Valparaíso, *Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos* (págs. 31-36). Valparaíso.
- Silva, N. (2006). Oxígeno disuelto, pH y nutrientes en canales y fiordos australes. En C. O. Nacional, *Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos* (págs. 37-43). Valparaíso.
- Simpson, J., Tett, P., Argote-Espinoza, M., Edwards, A., Jones, K., & Savidge, G. (1982). Mixing and Phytoplankton growth around an island in a stratified sea. *Continental Shelf Research*, 15-31.
- Soto, D., & Norambuena, F. (25 de Noviembre de 2004). Evaluation of salmon farming effects on marine systems in the inner seas of southern Chile: a large-scale mensurative experiment. *Applied Ichthyology*, págs. 493–501.
- Suárez, B., & Guzmán, L. (1999). *Mareas rojas y toxinas marinas*. Santiago: Universitaria.

Sullivan, J., Donaghay, P., & Rines, J. (2010). Coastal thinlayerdynamics: Consequences to biology and optics. *Continental Shelf Research*, 50-65.

Zalzal, K. (18 de Enero de 2018). *Earth The Science Behind the Headlines*. Obtenido de <https://www.earthmagazine.org/article/new-and-more-toxic-normal-harmful-algal-blooms-find-new-habitats-changing-oceans#>

Anexos

A Evento 2014

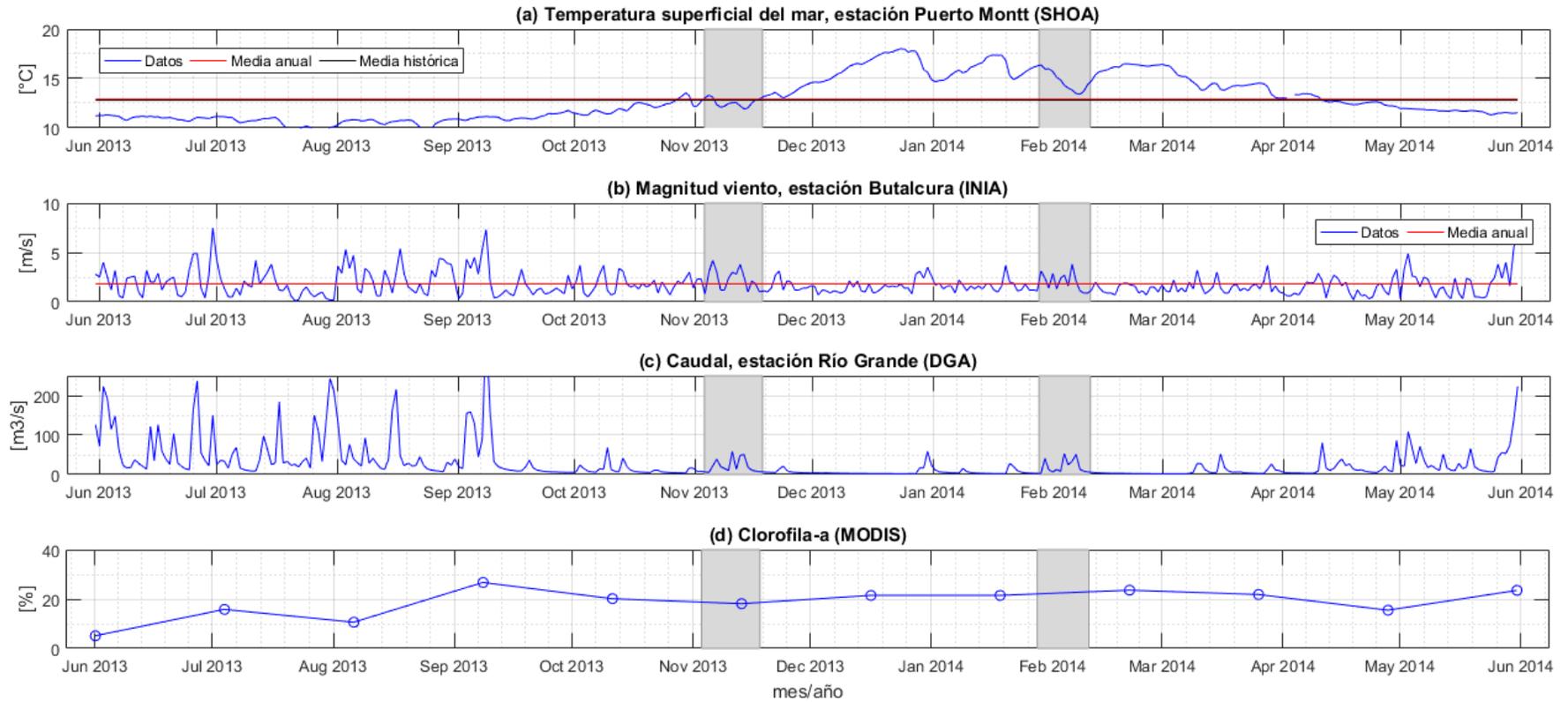


Figura A.1: Evento 2014, vista anual. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).

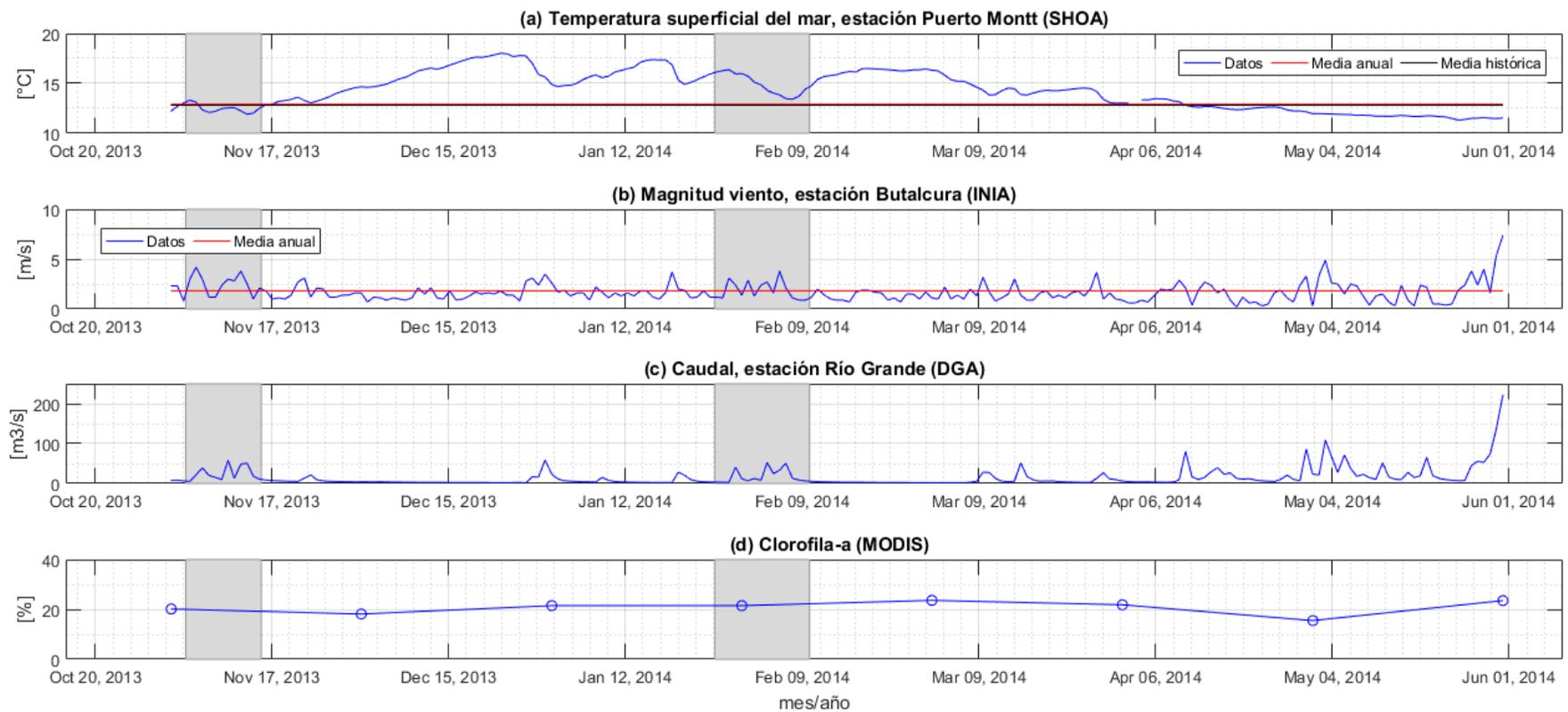


Figura A.2: Evento 2014, vista noviembre-abril. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).

B Evento 2012

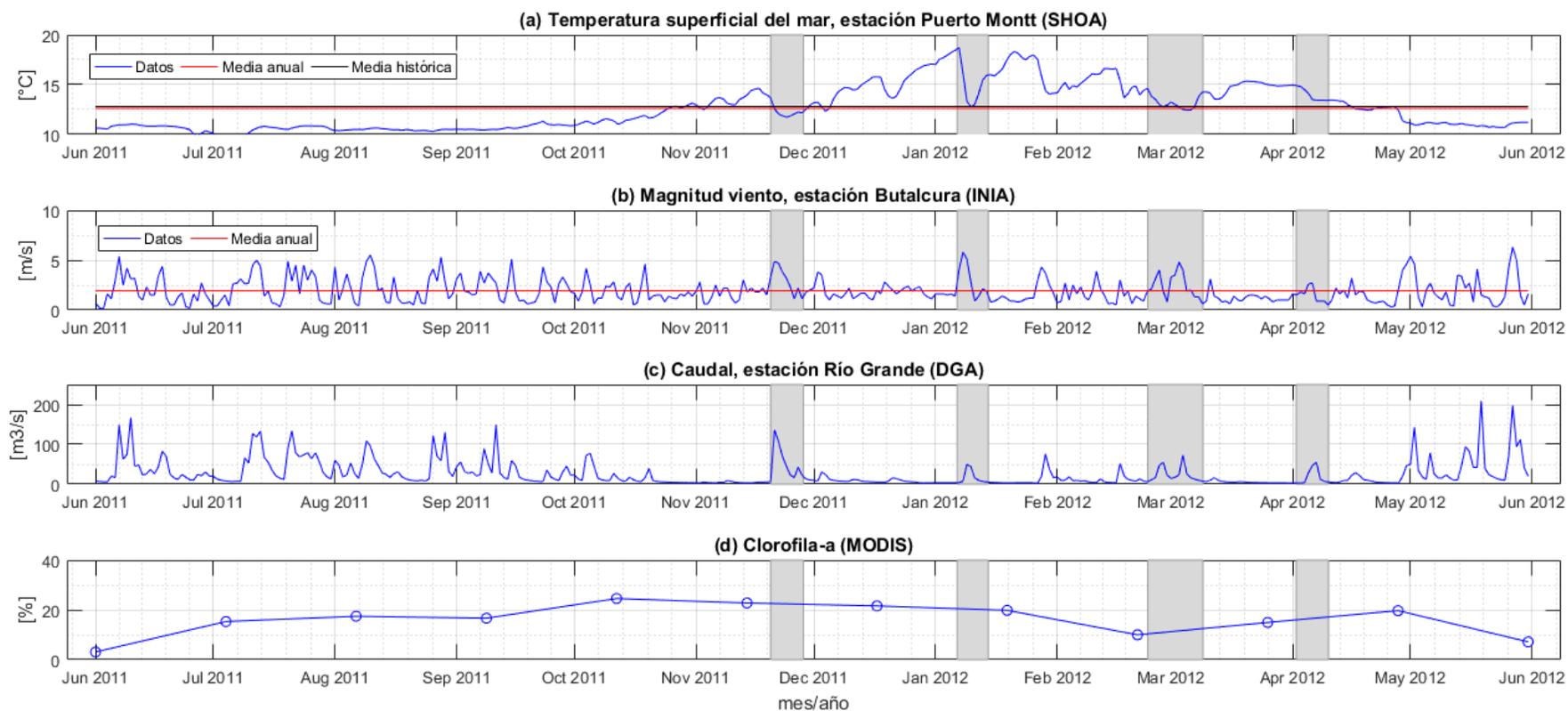


Figura B.1: Evento 2012, vista anual. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).

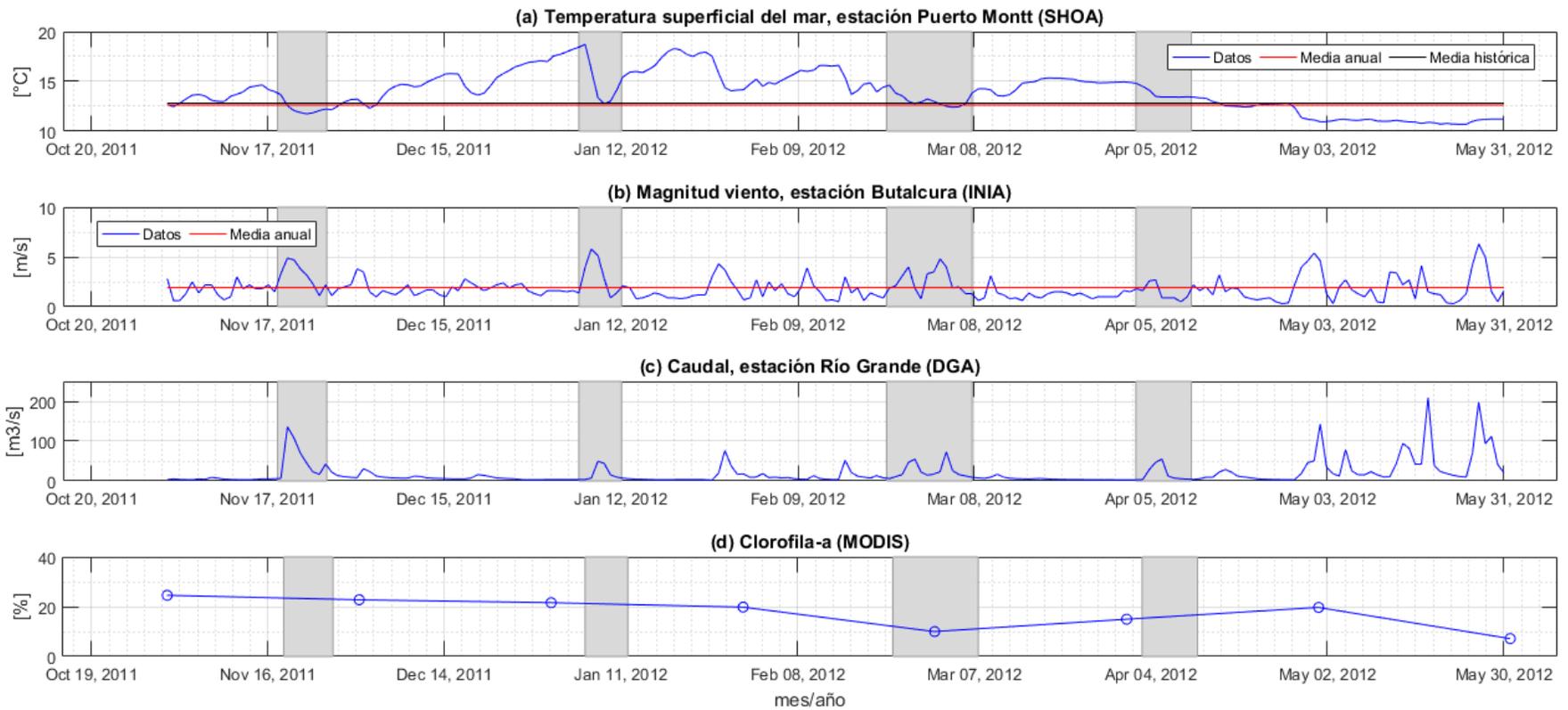


Figura B.2: Evento 2012, vista noviembre-abril. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).

C Evento 2011

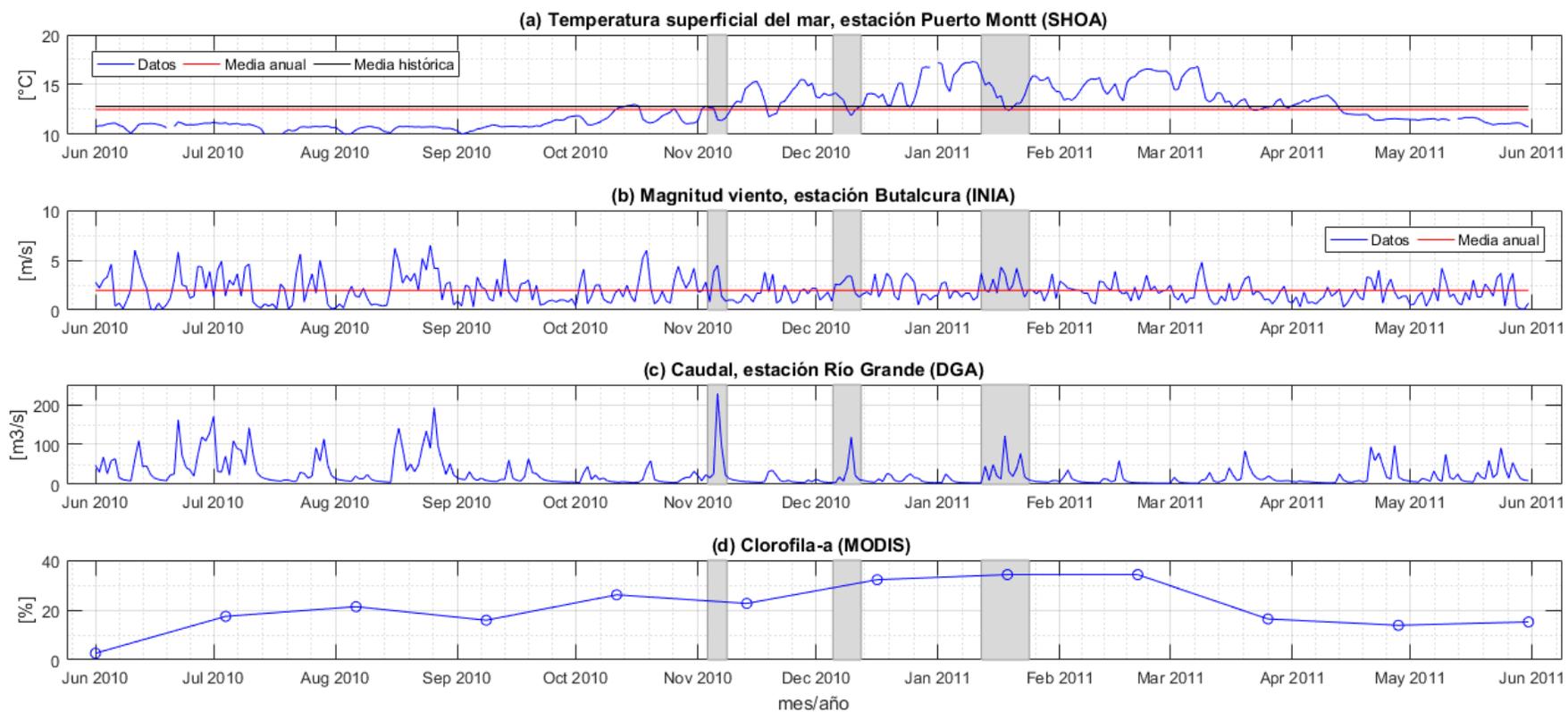


Figura C.1: Evento 2011, vista anual. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).

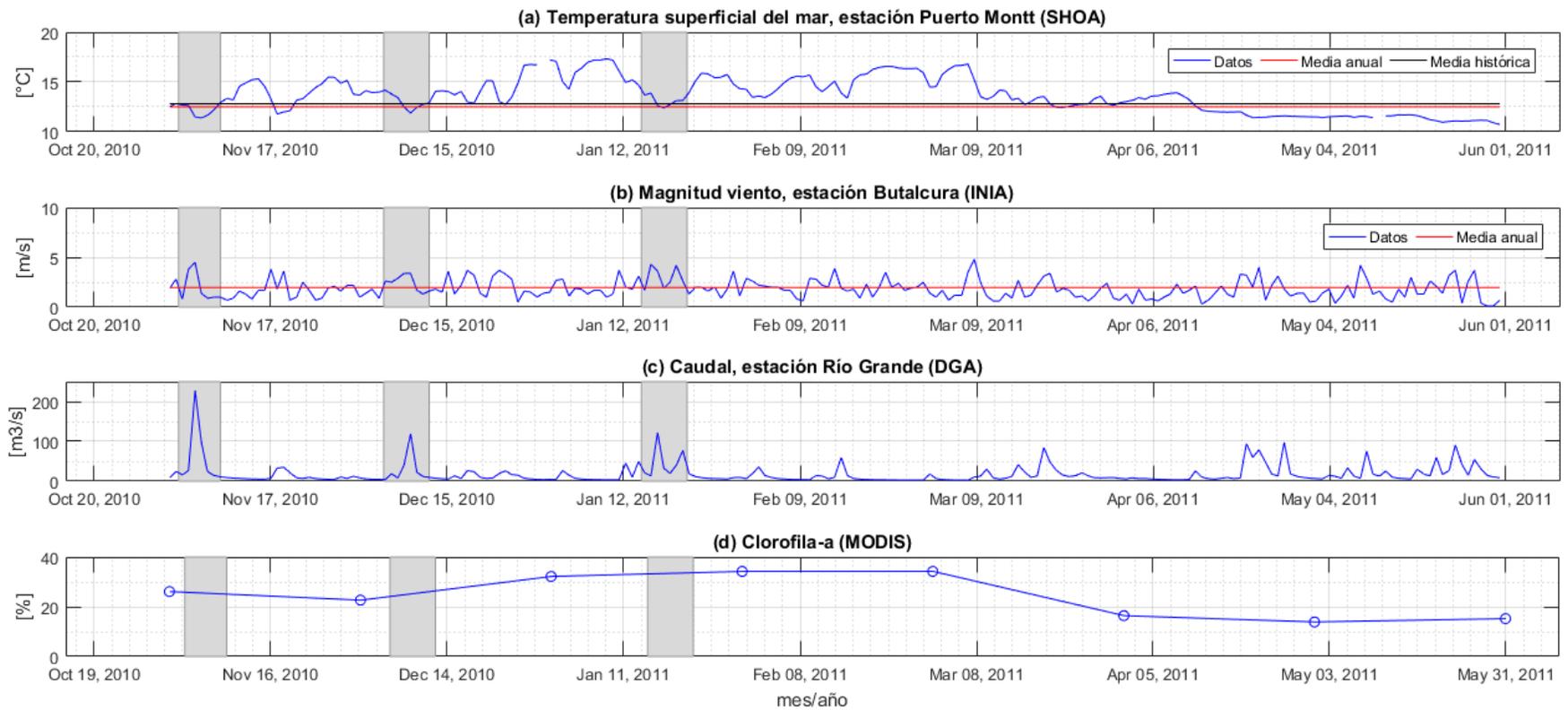


Figura C.2: Evento 2011, vista noviembre-abril. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).

D Evento 2005

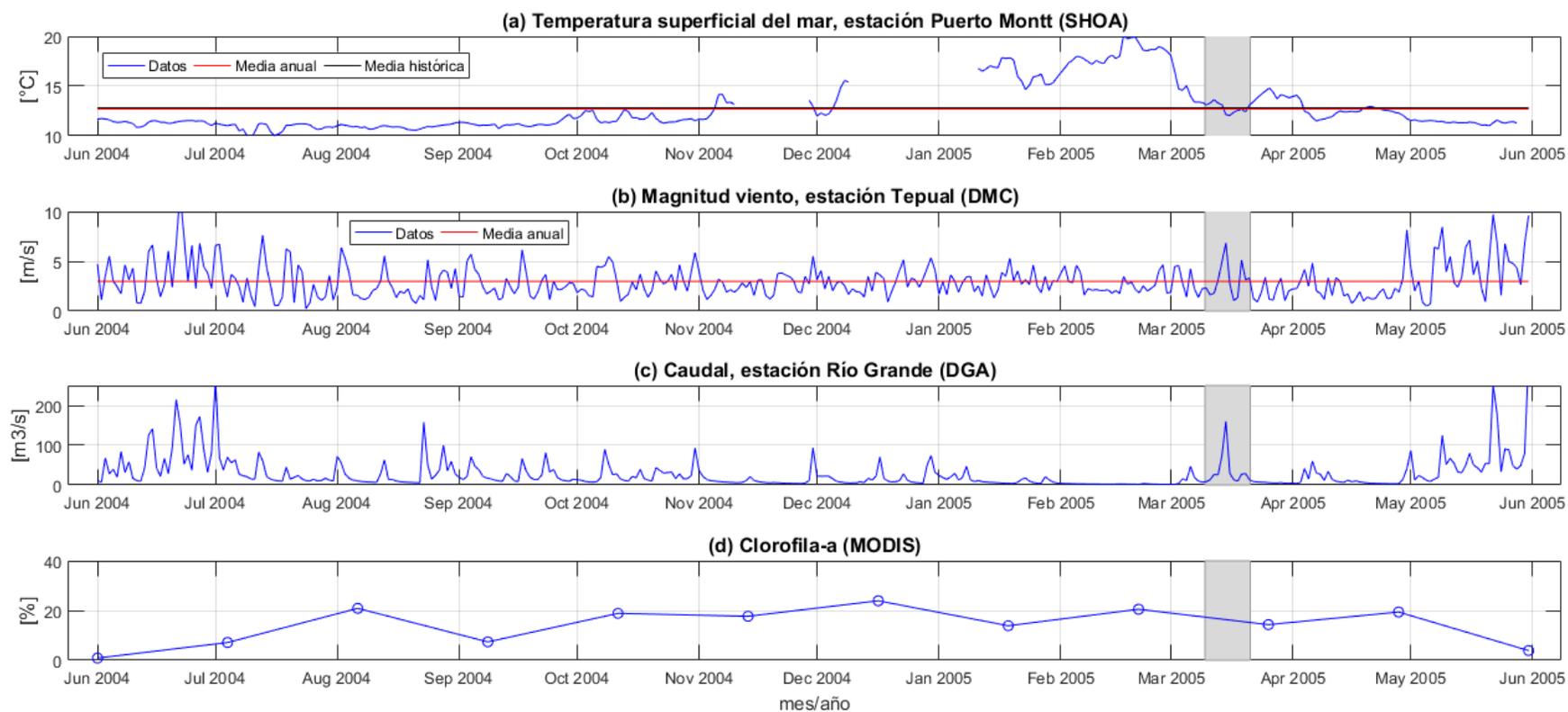


Figura D.1: Evento 2005, vista anual. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).

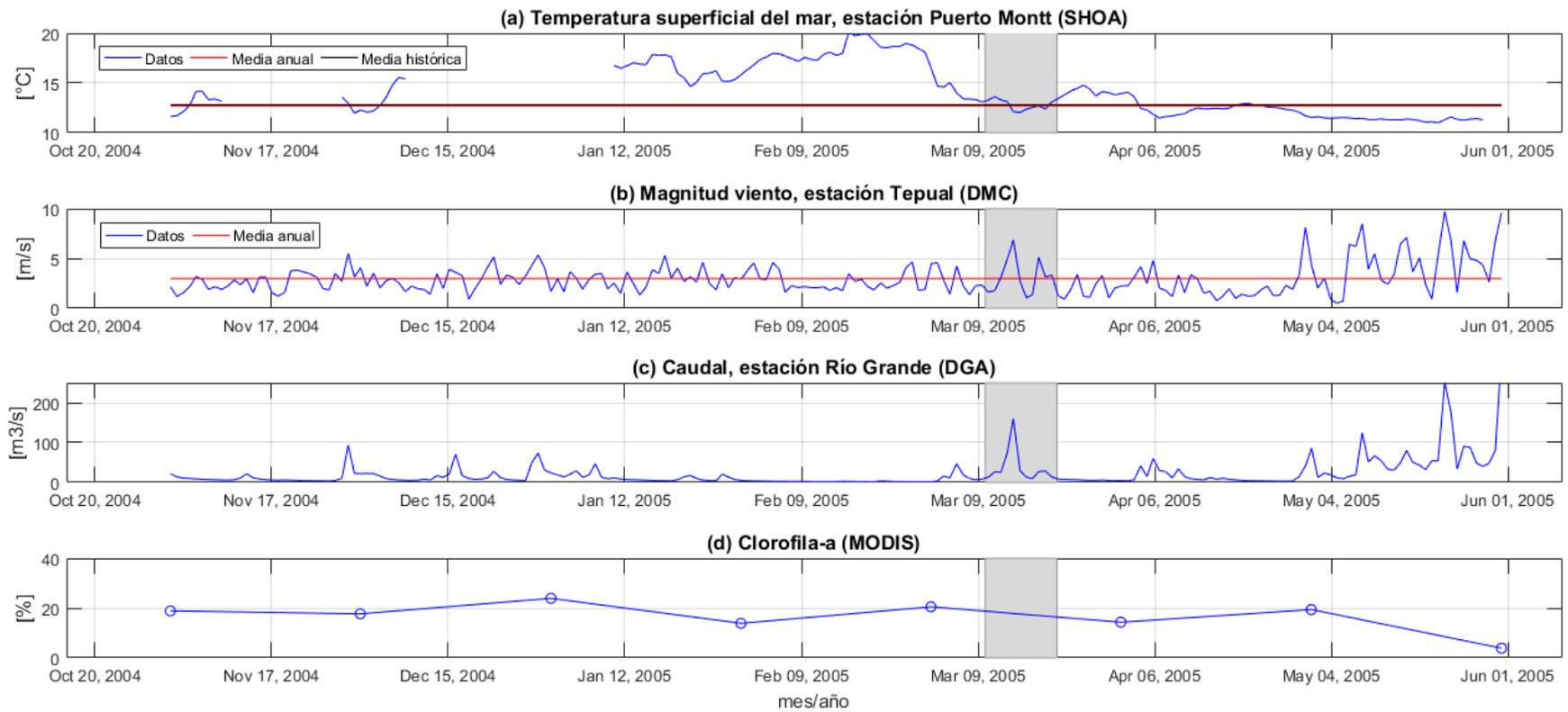


Figura D.2: Evento 2005, vista noviembre-abril. En gris se destacan los eventos de importancia (Elaboración propia).

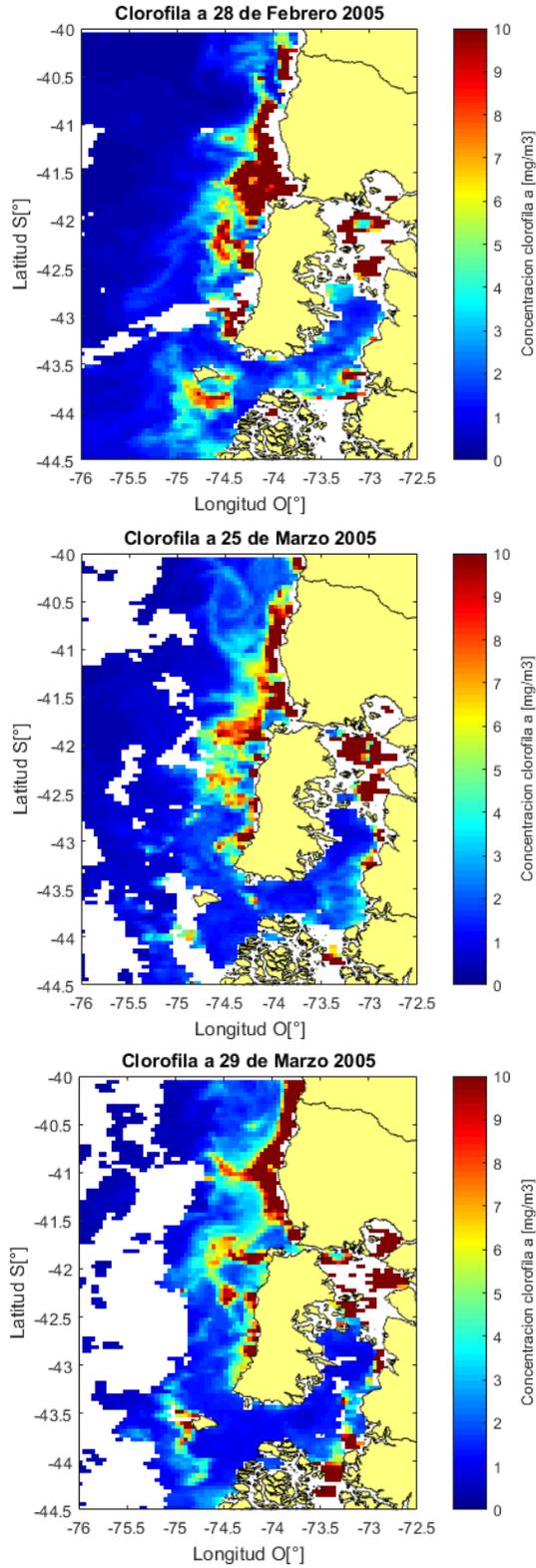


Figura D.3: Imágenes MODIS de clorofila *a* diarias para diferentes fechas del evento 2005. En rojo oscuro se resaltan las zonas con concentraciones iguales o mayores a 10mg/m^3 de clorofila *a* (Elaboración propia en base a imágenes MODIS diarias de clorofila *a*).