INFORME FINAL

Comisión Marea Roja

Alejandro Buschmann	Universidad de Los Lagos
Laura Farías	Universidad de Concepción
Fabián Tapia	Universidad de Concepción
Daniel Varela	Universidad de Los Lagos
Mónica Vásquez	Pontificia Universidad Católica de Chile

Noviembre, 2016

UNIVERSIDAD DE LOS LAGOS

INDICE

1. Introducción p. 1
2. Desarrollo de la Floración Algal 2016 p. 2
3. Análisis de condiciones climatológicas y oceanográficas p. 13
    3.1. Patrones de radiación y viento en el verano-otoño 2016 p. 13
    3.2. Caracterización del viento en el contexto de la variabilidad histórica p. 19
    3.3. Condiciones de temperatura y pigmentos en el verano-otoño 2016 p. 23
    3.4. Condiciones satelitales recientes en el contexto de la última década p. 30
    3.5. Variabilidad oceanográfica frente a Chiloé y el vertimiento de salmones p. 31
4. Crucero oceanográfico en el AGS-61 Cabo de Hornos p. 32
    4.1. Masas de agua presentes en la cuenca del Pacífico sur-oriental p. 33
    4.2. Distribución de variables físico-químicas por transecta p. 37
    4.3. Distribución de oxígeno por transecta p. 45
    4.4. Distribución de nutrientes por transecta p. 46
    4.5. Distribución de Carbono y Nitrógeno orgánico y su composición isotópica p. 47
    4.6. Descomposición de proteínas de pescado p. 48
    4.7. Muestreo de fitoplancton y toxinas en el crucero del Cabo de Hornos p. 50
5. Conclusiones p. 53
6. Recomendaciones p. 55
7. Agradecimientos p. 57
8. Referencias p. 58

1. Introducción

Las floraciones de algas nocivas (FAN) y, más específicamente, las floraciones de especies tóxicas genéricamente conocidas como "marea roja" han afectado a las costas del sur de Chile durante las últimas cuatro décadas. Durante dicho periodo, el fenómeno que inicialmente aparecía restringido a la región de Magallanes se ha expandido hacia las regiones de Aysén y Los Lagos. Junto con esta expansión geográfica ha habido una aparente intensificación de los eventos de floración, tanto en términos del área costera afectada como de las abundancias de especies tóxicas detectadas.

En febrero de 2016, una intensa floración de la microalga *Pseudochatonella verruculosa* ocurrida en la Región de Los Lagos tuvo como consecuencia una masiva mortandad de salmones en cultivo en el extremo norte del Mar Interior de Chiloé y Seno de Reloncaví. Luego, a partir de la última semana de febrero, comenzó a manifestarse una floración del dinoflagelado tóxico *Alexandrium catenella*, impactando fuertemente a la Región de Los Lagos y alcanzando por primera vez a la Región de Los Ríos. Desde principio de abril se observaron, además, mortalidades de moluscos bivalvos, aves y peces en Chiloé y otras localidades de la Región de Los Lagos. Como consecuencia de la intensidad y extensión del fenómeno, y la aparente co-ocurrencia de las floraciones nocivas en la costa de Chiloé y el vertimiento de salmones en altamar, se generaron protestas sociales y ambientales en Chiloé que luego se extenderían a otras localidades de la Región de Los Lagos.

Como parte de las respuestas entregadas a la comunidad de la Región de Los Lagos, el 10 de mayo de 2016 el Ministerio de Economía convocó a través de la Academia de Ciencias de Chile a un Comité Científico para evaluar este desastre ambiental. Entre el 13 y 14 de mayo se llevó a cabo la primera reunión de trabajo del comité en el Centro i~mar de la Universidad de Los Lagos (Puerto Montt) y el 16 de Mayo se entregó por escrito la propuesta de trabajo al Ministerio de Economía. El 25 de mayo zarpó desde Talcahuano el AGS-61 "Cabo de Hornos", en una expedición oceanográfica diseñada y ejecutada por miembros del Comité Científico con el apoyo de diversos centros de investigación del país, para realizar el estudio prospectivo del evento de Marea Roja ocurrido en la Región de Los Lagos. Posteriormente, el 14 de Junio se realizó en el Centro i~mar un Taller de Expertos en diversas disciplinas relevantes para entender el fenómeno de FAN o mareas rojas en general. En un primer informe emitido el 8 de Julio de 2016, el Comité Científico entregó los antecedentes de las actividades realizadas, incluyendo las mediciones realizadas durante el crucero oceanográfico a bordo del Cabo de Hornos, junto con las conclusiones alcanzadas durante el primer taller de expertos realizado en Puerto Montt. El 25 de julio se entregó un segundo informe centrado mayoritariamente sobre el efecto del vertimiento de salmones y su potencial relación con el fenómeno intenso de marea roja acaecido; este informe fue hecho público a comienzos de septiembre y presentado ante la Comisión de Medio Ambiente del Senado de la República el día 13 de septiembre. Posteriormente, el comité continuó evaluando los resultados de sus propias mediciones así como el análisis de información ambiental relevante obtenida de fuentes nacionales e internacionales, y presentó una síntesis de resultados para el análisis y discusión de un grupo de expertos convocados el día 21 de octubre en Puerto Montt. Considerando las críticas y sugerencias emanadas de este taller de trabajo se ha elaborado este tercer informe, que da cuenta de los resultados del trabajo de investigación propuesto al constituirse este Comité Científico. En primer lugar (Sección 2) se da cuenta de los patrones de desarrollo del fenómeno de Floración de Algas Nocivas (FAN) que ocurrió en el verano y otoño del 2016. Luego (Sección 3) se describe y sintetiza el contexto oceanográfico-climático en que se desarrolló el fenómeno de FAN ocurrido en la Región de Los Lagos. En tercer

lugar (Sección 4), se presentan los resultados de las mediciones hidrográficas realizadas durante el crucero oceanográfico a bordo del Cabo de Hornos, llevado a cabo a fines de mayo, así como resultados del análisis químico y biológico de las muestras de agua recolectadas, orientados a medir concentraciones de nutrientes, caracterizar la comunidad fitoplanctónica, y determinar la presencia de toxinas asociadas a marea roja. Finalmente se entregan las conclusiones de este trabajo (Sección 5), junto con una serie de recomendaciones (Sección 6) para que el Estado de Chile, así como los diferentes actores involucrados en esta crisis tomen las medidas que permitan manejar de mejor manera situaciones similares que puedan presentarse en el futuro.

2. Desarrollo de la Floración Algal 2016

Por su magnitud y gran extensión geográfica, y el consecuente impacto socio-productivo en las comunidades costeras del sur de Chile, el fenómeno de floraciones algales nocivas (FAN) ocurridas durante el último verano-otoño ha sido catalogado como el más significativo de la historia en la Región de Los Lagos. Las principales especies responsables de este impacto han sido reconocidas como *Pseudochattonella verruculosa* y *Alexandrium catenella*. La primera generó la masiva mortandad de peces de cultivo, principalmente en el Seno de Reloncaví, y la segunda fue responsable de un extenso cierre preventivo en la extracción de mariscos, debido a la presencia de altas concentraciones de veneno paralizante. Geográficamente, este cierre abarcó las regiones de Aysén, Los Lagos, y llegó hasta la región de Los Ríos, incluyendo prácticamente toda la costa insular de Chiloé. Pese a lo significativo de estas floraciones, y a su gran impacto productivo, socio-económico y mediático, en los últimos años se han registrado en Chile otros eventos semejantes en términos de extensión, intensidad y especies nocivas involucradas (Molinet et al. 2003, Mardones et al. 2010), en forma similar a lo observado en otras partes del mundo (McCabe et al. 2016). Todo esto evidencia que el problema de las FAN es más amplio y complejo que un fenómeno puntual ocurrido en una región específica, y que es necesario tener en cuenta su historia en términos de expansión geográfica y aparente intensificación documentada para numerosas regiones en el mundo (Anderson et al. 2012).

La presencia de la microalga *Pseudochattonella verruculosa* (Dictyochophyceae) no es reciente en nuestras costas (Clement et al. 2016), habiendo sido observada por primera vez en el 2004, y en condiciones de floración fue registrada en los años 2005, 2009 (aprox. 400 células ml^{-1}) y 2011(aprox. 40 células ml^{-1}), con una distribución acotada en la región de Los Lagos (Mardones et al. 2012). En el verano del 2016, extensos manchones con altas concentraciones de esta especie fueron observados en las costas del mar interior de Chiloé, el Seno de Reloncaví, y también en algunas localidades de la región de Aysén (los canales Pichirrupa, Williams y Darwin). Los primeros focos de alta abundancia fueron reportadas en la zona central del la isla de Chiloé a partir del 20 de enero, con una concentración máxima de 176 células ml^{-1} (Villanueva et al., 2016). En tanto, en las localidades de Aysén la abundancia máxima alcanzó las 274 células ml^{-1}, alrededor del 10 de febrero. Los eventos más significativos de floración fueron observados en la zona norte de Chiloé, en Calbuco y principalmente en el Seno y Fiordo de Reloncaví. Tanto en Quillaipe, La Arena, Guar y Calbuco como en el mismo Fiordo de Reloncaví la concentración fue aumentando progresivamente desde mediados de febrero. Durante este período la mortalidad de salmonídeos en cultivo alcanzó las 39.942,5 ton (ver detalles en **Figura 1**). Al inicio de este evento de mortalidad de salmones, los valores máximos reportados fueron de 1.140 células ml^{-1}, alcanzando valores máximos de 22.900 células ml^{-1} el día 3 de marzo en la localidad de Quillaipe (Villanueva et al. 2016). Las 39.942,5 toneladas de salmones muertos como consecuencia de la proliferación de esta microalga fueron, de acuerdo a lo informado por

SERNAPESCA, retirados en un 100% desde los centros de cultivo y trasladados a plantas de proceso para elaboración de harina de pescado (57% de la mortalidad), mientras que un 30% de la mortalidad fue llevada a vertederos locales (**Figura 2**). De los 45 centros de cultivo de salmones afectados por la microalga, 17 centros (34%) fueron inspeccionados utilizando cámaras submarinas a control remoto (ROV) y, de acuerdo a la información entregada por SERNAPESCA, en ninguno se encontraron peces muertos en el fondo. Por la imposibilidad de ser trasladados a tierra, el 13% restante de la mortalidad, equivalente a algo más de 4.600 toneladas, fue vertido a 75 millas náuticas al oeste de la costa norte de la Isla Chiloé durante un periodo de 10 días. Este hecho concitó gran atención de las organizaciones sociales de la región, grupos ambientalistas y medios de comunicación, y será abordado en detalle en este informe.

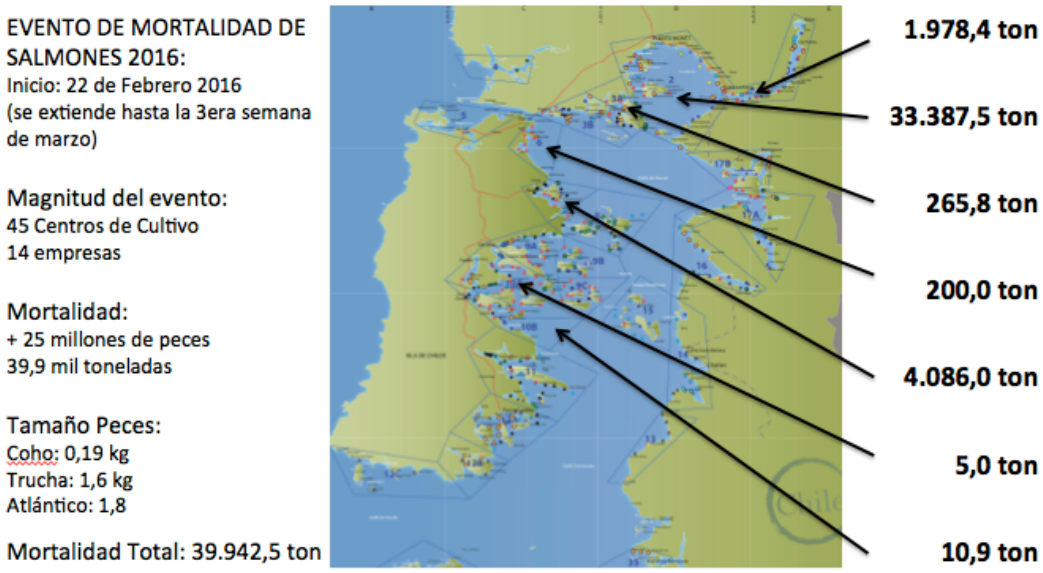


Figura 1. Antecedentes de mortalidad (período, magnitud, especies) de salmones en diferentes zonas de acuicultura de la región de Los Lagos como consecuencia de la floración de la microalga *Pseudochattonella verruculosa*. Fuente: SERNAPESCA, Región de Los Lagos.

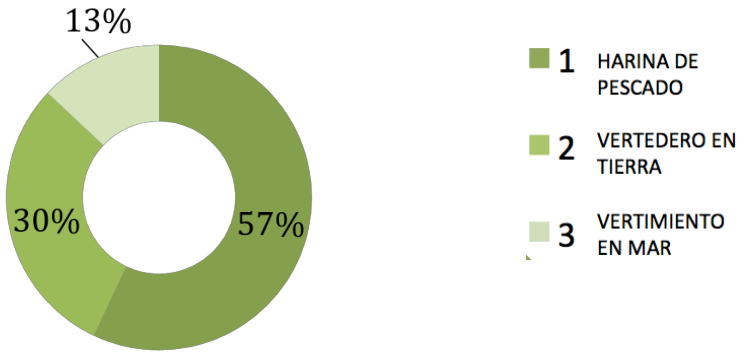


Figura 2. Destino de la mortalidad de 39.942,5 toneladas equivalente a 24.902.640 salmonídeos (truchas, salmón del Atlántico y salmón del Pacífico).

Además del florecimiento de *Pseudochattonella verruculosa*, durante el verano del 2016 se presentó la floración del dinoflagelado tóxico *Alexandrium catenella.* Aunque este evento tuvo carácter de excepcional por su magnitud y extensión, no ha sido la única FAN que ha sufrido la región sur austral de Chile. La presencia de esta especie y sus efectos en términos de toxicidad son conocidos desde 1972. Desde ese tiempo, y a lo largo de las últimas décadas, las células y altas concentraciones de la toxina conocida como Veneno Paralizante de Marisco (VPM) se han propagado por la extensa costa de fiordos y canales del sur de Chile, desde el extremo sur de Magallanes (55° S) hasta la costa centro-sur de la isla de Chiloé (41° S). En la zona norte de los fiordos, entre las regiones de Aysén y Los Lagos, han ocurrido los más significativos eventos de floración de *A. catenella* previos al del último verano, en los años 2002, 2006 y 2009. El evento de 2002 fue la primera vez que un evento de esta naturaleza afectó la Región de Los Lagos. Aunque se originó en Aysén, este evento se extendió hasta el canal Dalcahue (Molinet et al., 2003). Sin embargo, las abundancias más altas de la historia de las floraciones de *A. catenella* en Chile se registraron el año 2009, alcanzando concentraciones de poco más de 6.000 células ml^{-1} (Mardones et al. 2010), aunque este evento se restringió geográficamente a la región de Aysén y sólo apareció marginalmente en el extremo sur de la isla de Chiloé.

La gran floración de *Alexandrium catenella* ocurrida durante este último verano (2016) se caracterizó principalmente por su extensión geográfica y su distribución (**Figuras 3 y 4**). El evento abarcó desde la zona central de la región de Aysén (45° 27' S) hasta las costas de la región de los Ríos (39° 45'S). El hecho más significativo de esta floración fue que parte de su desarrollo ocurrió a largo de la costa expuesta de Chiloé. Este hecho constituyó el primer registro en Chile de una floración de esta especie por aguas exteriores, más allá de los fiordos y canales. Los primero indicios de floración de esta especie fueron registrados en algunas localidades en la zona centro-norte de la región de Aysén (Isla Palumbo, Isla Elena, Canal Darwin, Isla Manual, Isla Bobadilla - Seno Soto) en noviembre y diciembre de 2015. Pero fue durante enero y principalmente febrero de 2016 cuando la abundancia celular alcanzó los mayores valores en esa zona, por ejemplo en Isla Manuel, Seno Ventisquero e Isla Julia – Golfo Peligrosa, Isla Ovalada, Moraleda y Boca del Guafo. Fue en estos meses cuando se detectaron altas concentraciones de células de *A. catenella* al sur de la isla de Chiloé, en localidades como Bahía Asasao, Isla San Pedro e Isla Laitec. Sin embargo, en marzo la floración pareció retroceder en intensidad en Chiloé y la zona norte de la región de Aysén, aunque sin dejar de tener niveles importantes de abundancia en varias localidades.

Una revisión más exhaustiva de la información derivada del monitoreo llevado a cabo por el Instituto de Fomento Pesquero (IFOP) en el extremo norte de Aysén y sur de la isla de Chiloé evidenció que, durante la primera semana de marzo, la abundancia de esta especie se intensificó, extendiéndose hacia otras localidades más al norte (e.g. San Antonio, Estero Yaldad), detectándose células de esta especie hasta las Islas Desertores a mediados de marzo. Las concentraciones de VPM en la costa Sur de la Isla de Chiloé mostraron aumentos significativos hacia finales de verano e inicio de otoño de 2016. Hacia fines de enero, en la costa Sur de Chiloé había niveles de VPM apenas detectables (34 g STX eq./100 g carne en Isla Dolores). Durante febrero se registraron concentraciones detectables (33-53 g STX eq./100 g carne), pero aún bajo el nivel límite establecido para prohibir el consumo humano, en distintos sectores de la costa Sur-Este de Chiloé. A comienzos de marzo, sin embargo, las concentraciones de VPM mostraron un incremento significativo en todas las estaciones monitoreadas de esta zona, alcanzando concentraciones máximas de 657 g STX eq./100 g carne en el sector de canal Yelcho.

Aun cuando el fenómeno pareció retroceder, sin desaparecer, durante la segunda quincena de marzo y primera quincena de abril (**Figura 3**, panel: 2-9 abril),la presencia de células se

mantuvo. Consecuentemente, en abril las concentraciones de VPM disminuyeron en gran parte de la costa Sur-Este de Chiloé, manteniéndose altas en la costa Sur-Oeste, en el sector de islas Guapiquilán, donde se registraron concentraciones de hasta 840 g STX eq./100 g carne. Probablemente fue durante este período de declive en el mar interior cuando el desarrollo de floración se extendió hacia la costa expuesta de Chiloé. Lo que evidenció esta extensión por la costa oeste de Chiloé fue el registro de un evento tóxico asociado a VPM en el sector de Cucao, ya a partir de la primera semana de abril, y que afectó bancos naturales de macha (*Mesodesma donacium*). El primer registro de toxicidad fue evidenciado el 24 marzo (33 g STX eq./100g de carne), en tanto que el 5 de abril la concentración alcanzó a valores de 280 g STX eq./100 g carne. Pero fue a partir del 8 de abril que la concentración deVPM aumentó de forma casi exponencial. En esta última fecha, un primer registro de la abundancia de *A. catenella* en Cucao indicó niveles de abundancia celular muy altos. Hacia fines de abril los registros indicaron un aumento significativo en abundancia celular (de un nivel "muy abundante" a "hiper abundante", según los registros escala de abundancia establecida por IFOP). Este incremento de abundancia siguió hacia la costa norte de la región de Los Lagos (e.g. Mar Brava, Faro Corona, Carelmapu, Estaquilla, Bahía Mansa, Maicolpué), hasta llegar a la región de Los Ríos (e.g. Caleta Los Huiros, Caleta Los Molinos, Curiñanco). No obstante, hacia mediados de mayo, la abundancia celular de *A. catenella* comenzó a declinar rápidamente en la mayoría de las localidades.

Así, este gran evento de floración de *A. catenella* pareció desarrollarse en dos etapas. Una de carácter principalmente estival, que comenzó a evidenciarse en la zona central de la región de Aysén a finales del 2015, y que alcanzó el extremo sur de la isla de Chiloé a comienzos de marzo (**Figura 3**). La otra etapa, más bien otoñal, pareció originarse en el extremo norte de Aysén durante la primera semana de abril, extendiéndose principalmente por la costa oeste de Chiloé, hasta alcanzar la región de Los Ríos (**Figura 4**). En esta etapa del evento de floración se alcanzaron abundancias celulares de hasta 5.000 células ml^{-1} y concentraciones de toxinas de 15.000 µg SXTeq./100g de carne (Guzmán et al. 2016). Esta última etapa, que sorprendió por ser la primera vez que se registra una floración de esta intensidad en esta región del Océano Pacífico, ha levantado varias interrogantes e hipótesis. Una de estas hipótesis plantea que el origen del fenómeno habría estado en los canales de la zona norte de la Región de Aysén, y que la dominancia e intensidad del viento sur, durante marzo y abril, habrían promovido el transporte de la floración hacia la costa oeste de Chiloé y, posteriormente, hacia localidades ubicadas más al norte. Una vez en esta costa las condiciones de surgencia costera que predominaron en marzo 2016, habrían contribuido a su intensificación. Aunque esta es una explicación plausible, aún hay muchas brechas de conocimiento para corroborarla. La dinámica de las corrientes costeras en el Pacífico sur-oriental frente al extremo sur de Chile, y sus cambios ante escenarios climáticos inusuales, o el comportamiento de las distintas fases del ciclo de vida de *A. catenella* en estos sistemas costeros – en particular la distribución y abundancia de quistes – son algunas de las interrogantes que deben ser abordadas. Una de las preguntas latentes, por ejemplo, es si esta floración oceánica de *A. catenella* es algo nuevo en nuestras costas o un fenómeno preexistente, pero invisible hasta ahora por la actual estructura espacial del monitoreo desarrollado por IFOP.

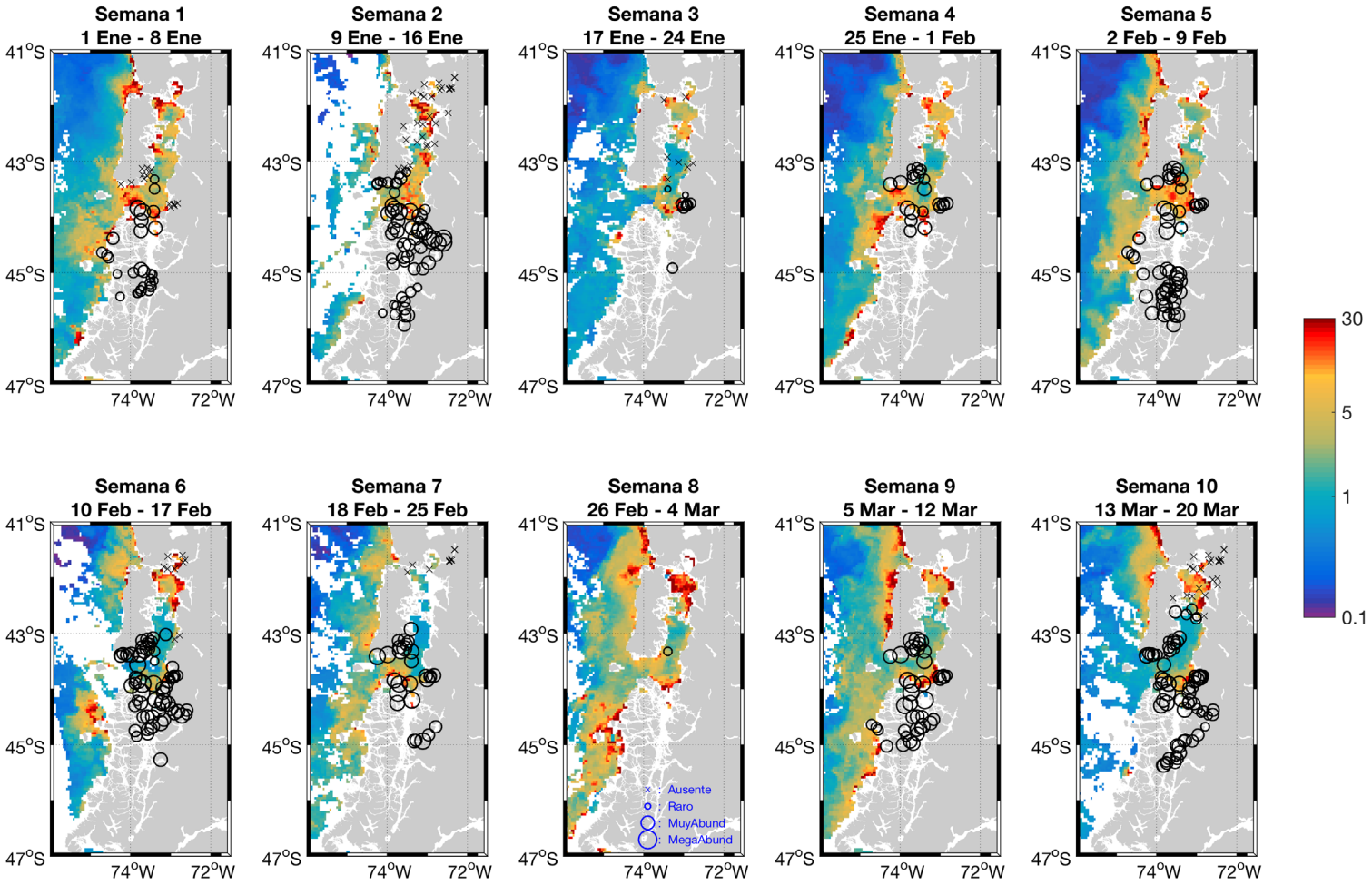


Figura 3a. Abundancia relativa de *Alexandrium catenella* para las primeras 10 semanas de 2016 (enero – marzo). Los datos de abundancia están superpuestos con imágenes semanales de clorofila-a satelital MODIS-Aqua(escala de color en mg m^{-3}) con resolución espacial de 4 km. La información de abundancia relativa proviene de los monitoreos del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP).

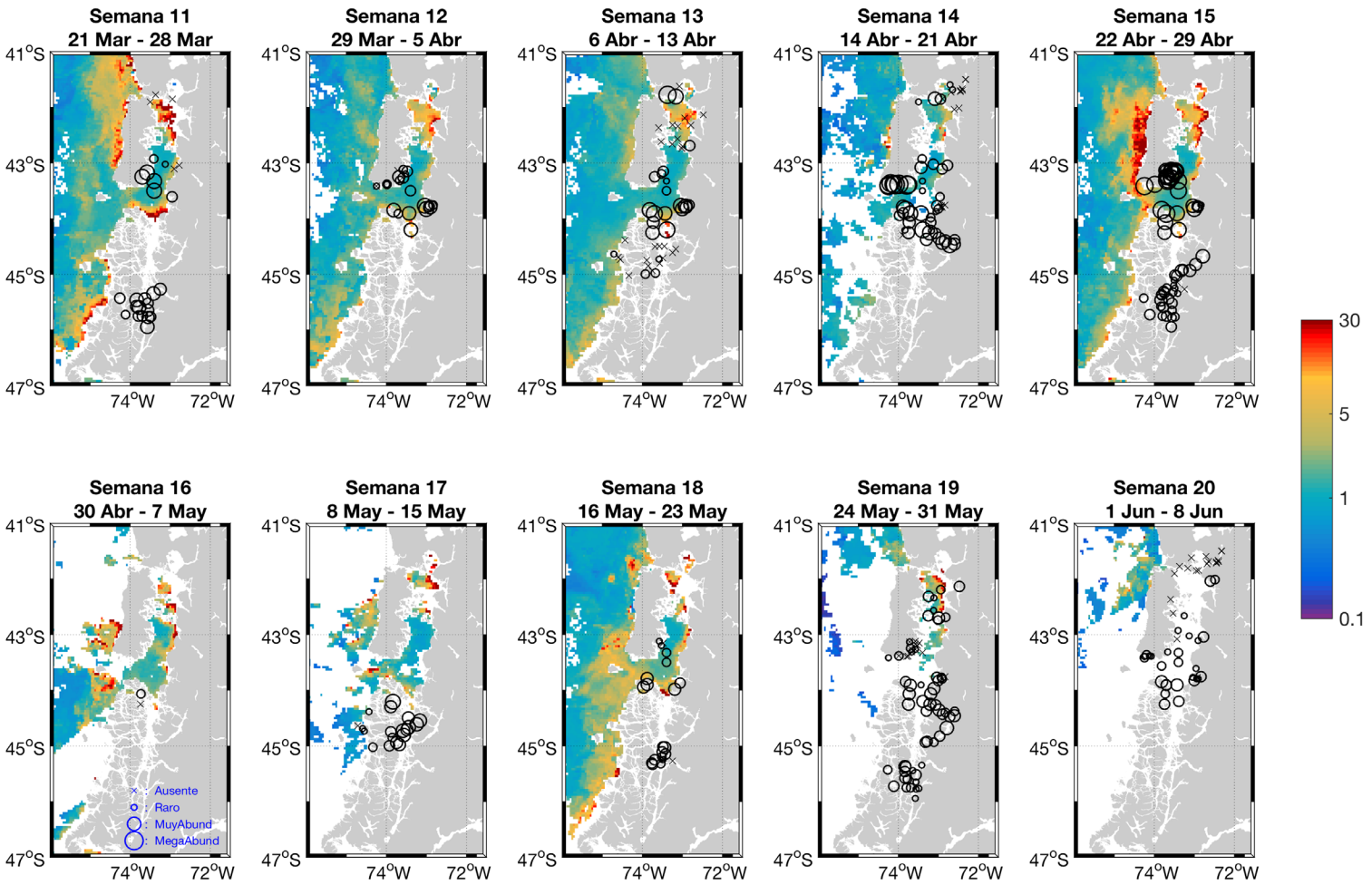


Figura 3b. Abundancia relativa de *Alexandrium catenella* para las semanas 11 a 20 de 2016 (marzo – junio). Los datos de abundancia están superpuestos con imágenes semanales de clorofila-a satelital MODIS-Aqua (escala de color en mg m^{-3}) con resolución espacial de 4 km. La información de abundancia relativa proviene de los monitoreos del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP).

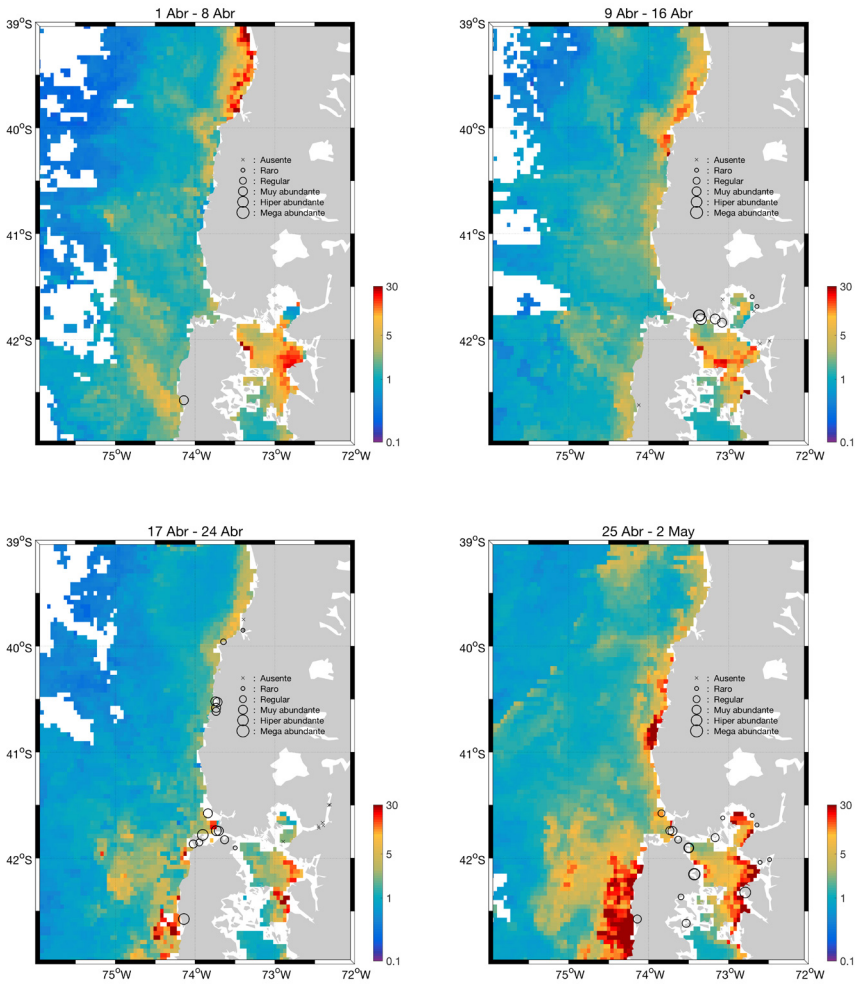


Figura 4. Abundancia relativa (círculos) de *Alexandrium catenella* registrada de manera excepcional en el mes de abril, por el Instituto Fomento Pesquero. Los paneles resumen semanalmente, en las fechas que se indican y la clorofila a (escala de colores; mg m^{-3}), derivada de imágenes satelitales MODIS-Aqua con 4 km de resolución espacial.

Estudios recientes han evidenciado que la especie involucrada en este gran evento tóxico de VPM, que involucró las regiones de Aysén, Los Lagos y Los Ríos, es la misma especie de *Alexandrium catenella* que se ha extendido por la región austral en las últimas décadas (Paredes et al., 2016). Análisis moleculares de células aisladas de este evento de floración muestran que estas células son genéticamente semejantes (i.e. se agrupan juntas en el árbol filogenético, **Figura 5**) a otras células de *A. catenella* aisladas de eventos de floración pasados o a partir de la germinación de quistes.

A pesar de ser la misma especie, las células de esta última floración mostraron particularidades en su crecimiento y sobrevivencia. Aisladas y cultivadas en condiciones de laboratorio han mostrado tasas crecimiento que varían en promedio entre 0,2 y 0,3 células $día^{-1}$ (**Figura 6a**), las cuales son mayores que las observadas en cepas de la misma especie aisladas de eventos previos

(tasas de crecimiento 0,14 y 0,2 células día^{-1}; Daniel Varela datos no publicados). En este mismo experimento, las células de *A. catenella* de este último evento exhibieron diferentes porcentajes de sobrevivencia (**Figura 6b**), dependiendo de las localidades de las que fueron aisladas. Este antecedente puede indicar diferencias fisiológicas o genéticas entre diferentes sectores a lo largo de la región afectada por la floración. Observaciones derivadas de los monitoreos de IFOP indican que las mayores abundancias de células de *A. catenella* se observan cuando la salinidad en la columna de agua varía entre 22 y 35 PSU, y la temperatura se encuentra entre 11 y 15°C (Espinoza et al. 2016). Estas observaciones son consistentes con experimentos de laboratorio en las que se observan las mayores tasas de crecimiento en el mismo rango de condiciones.

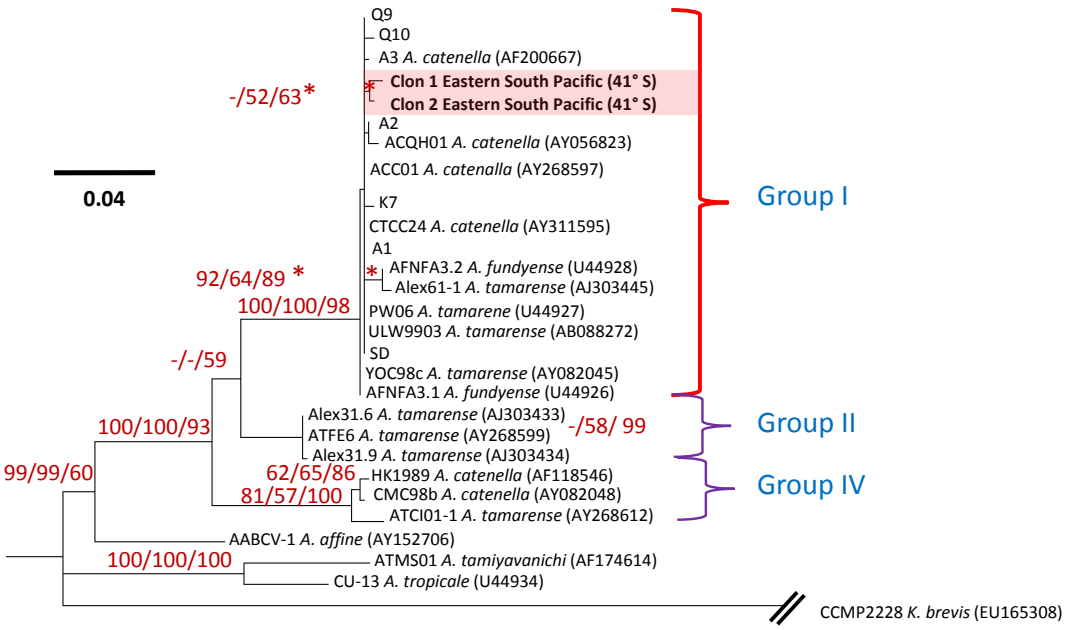


Figura 5. Árbol filogenético basado en el método de Máxima Verosimilitud (MV) derivado de las secuencias de la subunidad mayor del DNA ribosomal de varias especies de *Alexandrium*, incluyendo varias cepas chilenas de *A. catenella* (Q9, Q10, A2, K7, A1, SD). Destacadas en rojo se muestran las cepas aisladas de la reciente floración. Los números indican los resultados del Bootstrap derivado de diferentes métodos (MV, Distancia y Parsimonia) para cada clado. Los guiones indican valores de Bootstrap menores al 50%.

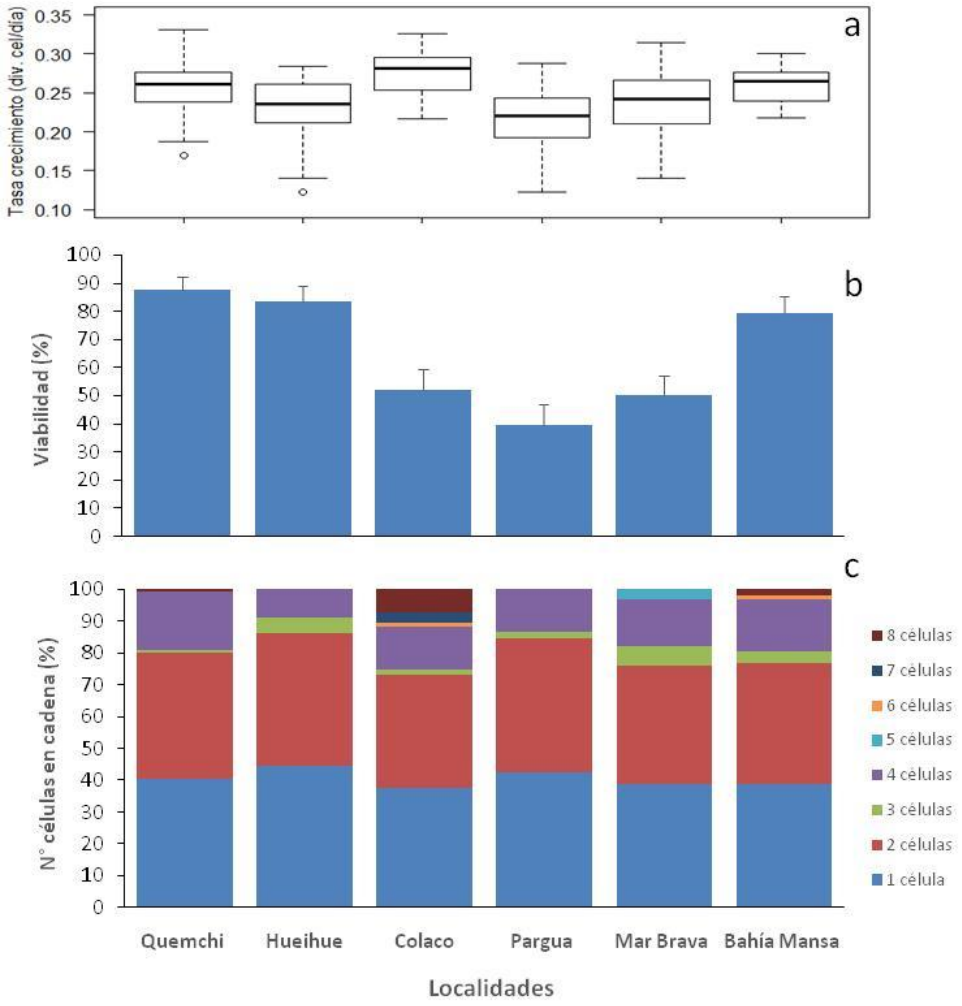


Figura 6. Tasa de crecimiento (a), viabilidad (b) y porcentaje de células individuales o formando cadena (c), para células (cepas) de la última floración de *Alexandrium catenella*, aisladas de diferentes localidades (Quemchi, Huehue, Colaco, Pargua, Mar Brava y Bahía Mansa) en la Región de Los Lagos. En cada localidad se aislaron 45 células de *A. catenella* y se cultivaron independientemente bajo condiciones estándar de laboratorio.

Uno de los hechos más inadvertidos que acompañó a la gran floración de *Alexandrium catenella*, fue la floración de varias otras especies de microalgas reconocidas como nocivas en la región (**Figura 7**). En el mar interior, fiordos y canales de la región sur austral se han desarrollado habitualmente floraciones de diferentes especies nocivas, con patrones espaciales y temporales recurrentes en distintos sectores (Guzmán et al. 2009). Aunque algunas de estas especies no son nocivas para el ser humano, si pueden afectar significativamente a peces de cultivo (e.g. *Heterosigma akashiwo*, *Leptocylindrum danicus*, *Rhizosolenia setigera*). Sin embargo, de mayor importancia es la presencia de otras especies tóxicas, pues son candidatas a ser fuente primaria de ácido domoico, conocido como "veneno amnésico de marisco", tales como *Pseudo-nitzschia* cf. *pseudodelicatissima* y *Pseudo-nitzschia* cf. *australis*; y de veneno diarreico u otras toxinas

lipofílicas (e.g. yesotoxinas, pextinotoxinas o gimnodiminas), como *Dinophysis acuminata*, *D. acuta* y *Protoceratium reticulatum* (Guzmán et al., 2009, 2010).

Así por ejemplo, la microalga *Dinophysis acuminata*, fue observada en las tres regiones australes, pero mostrando mayores abundancias en la región de Aysén y en la zona norte de la región de Los Lagos desde enero a marzo (**Figura 7**, segunda columna de paneles). Otra especie, *Dinophysis acuta*, normalmente presente en la región de Aysén, en densidades no muy altas, y ausente de la Región de Los Lagos, mostró niveles de abundancia mucho mayores que lo normal en algunas localidades de Aysén y sur de Chiloé, alcanzando Chiloé continental. Esto ocurrió principalmente durante enero, febrero y marzo. Del mismo modo, el dinoflagelado *Protoceratium reticulatum* mostró en enero una mayor abundancia en algunos sectores del centro-norte de Aysén, así como en la zona norte de la región de Los Lagos, especialmente en el Seno de Reloncaví (**Figura 7**, tercera columna de paneles).

En cuanto a las diatomeas tóxicas, el monitoreo de años previos ha permitido caracterizar floraciones o incrementos en densidad de *Pseudo-nitzschia australis* y *P. pseudodelicatissima* en amplios sectores geográficos de las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes. De estas observaciones, *P. pseudodelicatissima* ha sido reconocida como la más importante por su abundancia y frecuencia de aparición, especialmente para la región de Aysén, aunque también en la región de Los Lagos, como ocurrió en el 2011. Las mayores abundancias de esta especie se han observado principalmente en los meses de febrero y marzo. No obstante, durante los últimos meses, las mayores abundancias de *P. pseudodelicatissima* se observaron en Los Lagos y Aysén, aunque con diferencias entre ambas regiones (**Figura 7**). En Aysén, especialmente en la zona centro-sur, la abundancia comenzó a incrementar desde octubre-noviembre de 2015, y llegó a ser significativamente alta desde diciembre hasta marzo, en casi todas las localidades monitoreadas, disminuyendo sólo en algunas localidades hacia el mes de mayo. En Aysén norte se observó algo semejante, la abundancia fue incrementado en casi todas la localidades desde octubre de 2015, a excepción de diciembre, alcanzando los niveles más altos enero de 2016, para luego mantenerse alta hasta mayo pero sólo en algunas localidades. En la región de Los Lagos, en cambio, los altos niveles de abundancia de esta especie parecieron mostrar dos episodios, uno entre septiembre y octubre de 2015 y otro entre enero y mayo 2016, pero sólo en algunas localidades y principalmente en la zona sur de Chiloé. Por su parte, *P. australis* mostró en general menores abundancia que los de *P. pseudodelicatissima*, alcanzando sus mayores valores en noviembre-diciembre de 2015 en algunas localidades de Aysén (**Figura 7**). En la región de Los Lagos los máximos de abundancia fueron observados en septiembre y octubre de 2015 y enero y febrero de 2016, también en algunas localidades, especialmente en la zona de Chiloé sur.

Toda la evidencia descrita apunta hacia la complejidad del fenómeno de las floraciones de algas nocivas que ocurren en las regiones del extremo surde Chile. La escala de los fenómenos, la heterogeneidad ambiental y la diversidad de especies tóxicas o nocivas presentes genera un escenario difícil de abordar desde el punto de vista del manejo y la mitigación de estos problemas. Esta complejidad se simplifica en parte debido a que *A. catenella* es la principal especie tóxica y la que produce más del 90% de los eventos tóxicos. Sin embargo, la complejidad de su ciclo de vida y la alta heterogeneidad en la que puede desarrollarse hace que aún haya brechas considerables en el conocimiento sobre esta especie que deben ser abordadas. A ello se suma el escaso conocimiento que se tiene sobre las otras especies nocivas presentes en nuestras costas, y las condiciones en las cuales pueden generar floraciones eventualmente tan importantes como las de *A. catenella*.

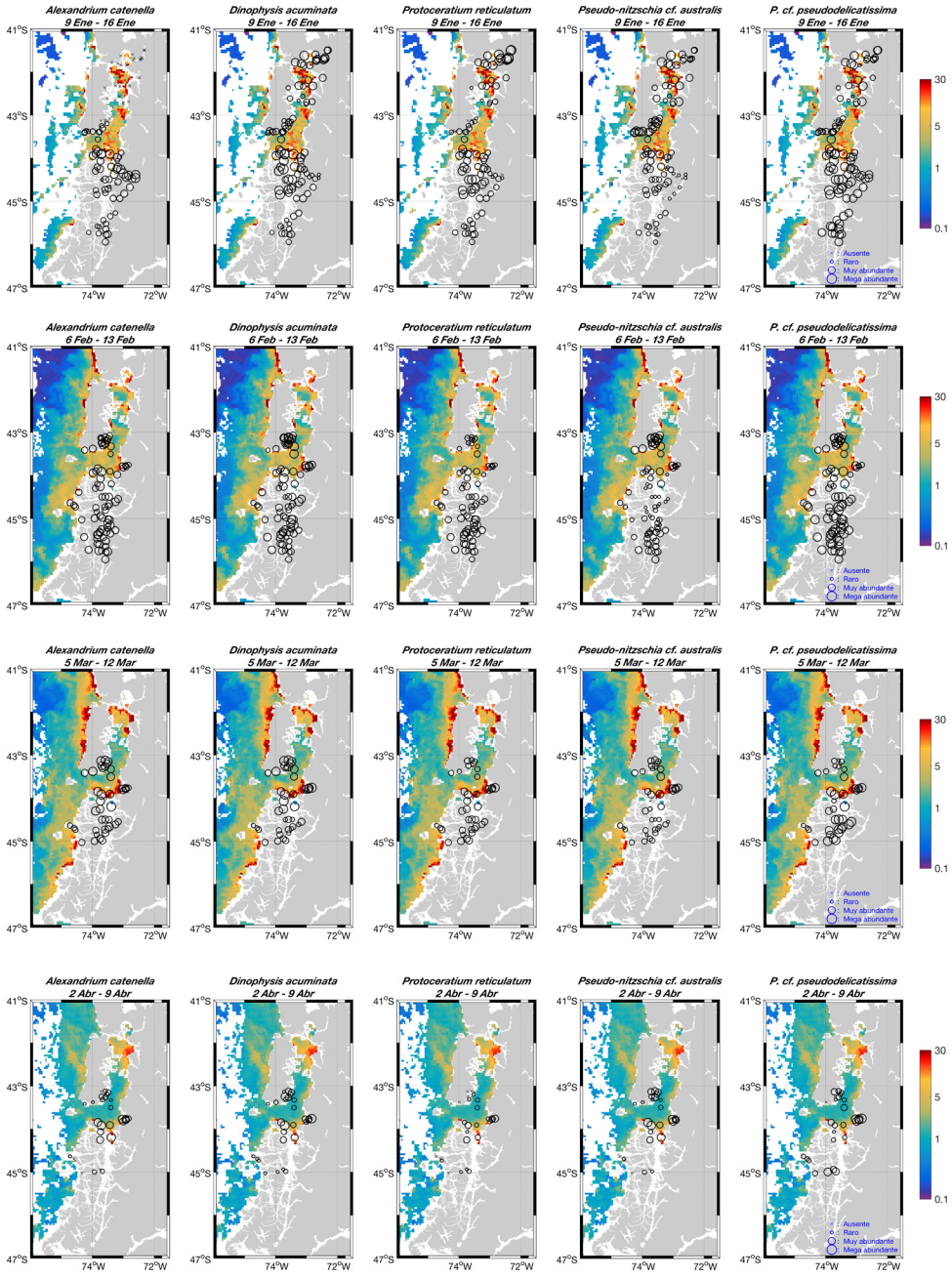


Figura 7. Abundancia relativa de diferentes especies de algas tóxicas en semanas seleccionadas del periodo enero - abril de 2016, superpuesta sobre imágenes semanales de clorofila-a satelital (escala de color en mg m^{-3}) con resolución espacial de 4 km y derivada de MODIS-Aqua. Las filas corresponden a semanas específicas del periodo enero-abril 2016, y las columnas corresponden a las distintas especies de microalgas tóxicas presentes: *Alexandrium catenella, Dinophysis acuminata, Protoceratium reticulatum, Pseudo-nitzschia* cf. *australis* y *Pseudo-nitzschia* cf. *pseudodelicatissima*. La información de abundancia relativa proviene de los monitoreos del Instituto de Fomento Pesquero (IFOP).

3. Análisis de condiciones climatológicas y oceanográficas

3.1. Patrones de radiación y viento en el verano-otoño 2016

Los datos climatológicos muestran claras anomalías positivas de temperatura y de presión atmosférica para el Pacífico sur-austral durante el verano-otoño 2016 (**Figura 8**), lo que explica en general las condiciones cálidas y sin precipitaciones observadas en otoño e incluso invierno del 2016 en el sur de Chile. Esto queda confirmado al analizar el patrón de radiación solar (**Figura 9)** que muestra sobre el sur de Chile una fuerte anomalía de menor nubosidad para enero 2016. Por otra parte se pudo observar que durante el verano de 2016 el sur de Chile se vio enfrentado a una situación anómala en el viento, principalmente en términos de su dirección. El viento que normalmente sopla desde el océano hacia el continente tuvo muy baja intensidad, lo que se combinó con un nivel de radiación solar de los más altos desde 1948 (ver punto rojo en **Figura 10**).

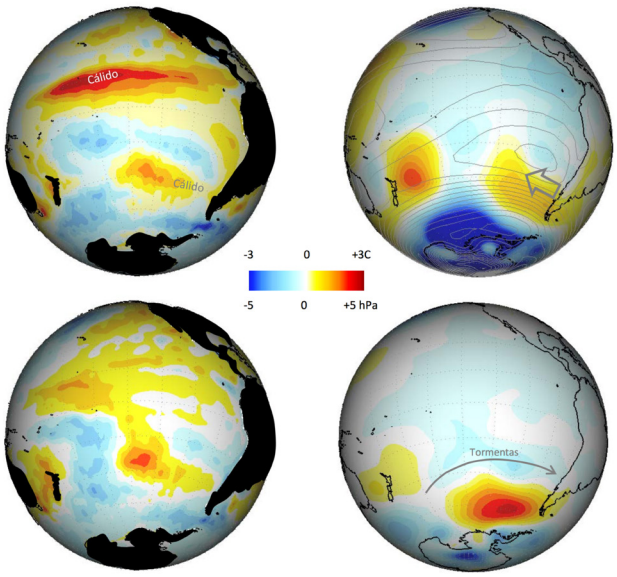


Figura 8. Anomalías en la temperatura superficial del mar (paneles de la izquierda) y en la presión atmosférica a nivel del mar (derecha) para el periodo enero-marzo 2016 (paneles superiores) y abril 2016 (paneles inferiores). Fuentes de datos: NOAA OISST para temperatura y re-análisis NCEP-NCAR para presión atmosférica. Figura gentileza de R. Garreaud (DGF-Universidad de Chile y CR2).

Consistente con esta anomalía detectada en la radiación de enero para un punto en el océano frente a Chiloé, al comparar los campos de radiación PAR (fotosintéticamente activa) detectados satelitalmente en el último verano con los campos promedio calculados para el periodo 2003-2015, se observó que en enero y marzo 2016 la radiación fue sustancialmente mayor que la esperada (**Figura 12**), principalmente en el mar interior de Chiloé y costa occidental de la isla. En abril 2016 se mantuvo una condición de radiación mayor que el promedio histórico, principalmente en el Mar Interior de Chiloé (**Figura 12**).

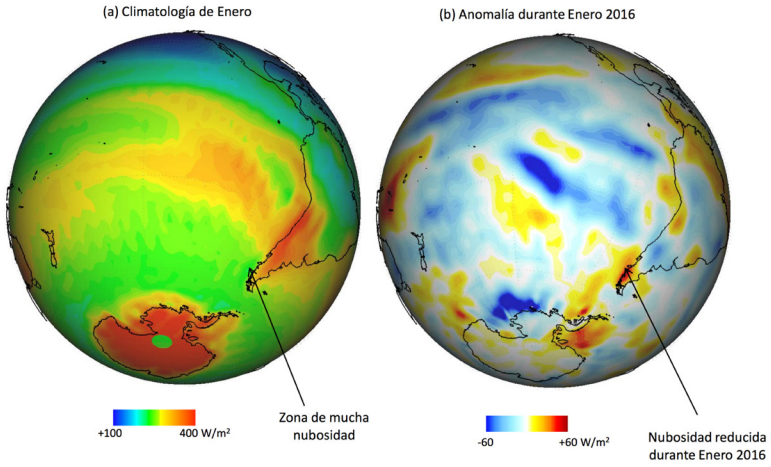


Figura 9. Condición promedio de radiación solar en superficie (*Downward Solar Radiation Flux*) para el Pacífico Sur en el mes de enero (izquierda) y anomalía de radiación solar en enero 2016 (derecha). Fuente de datos: re-análisis NCEP-NCAR. Figura gentileza de R. Garreaud (DGF-Universidad de Chile y CR2).

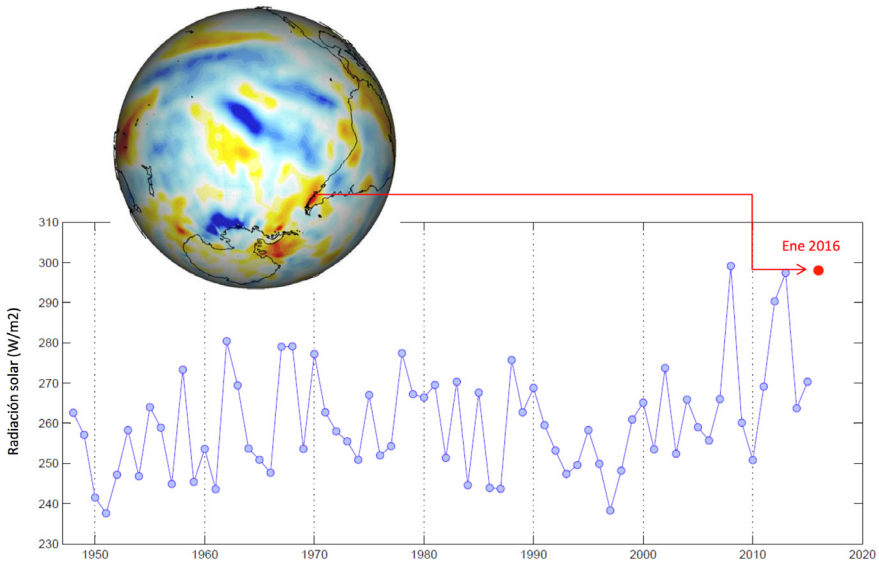


Figura 10. Variabilidad inter-anual de la radiación solar en superficie durante enero en la posición 45°S - 75°W. El símbolo en rojo muestra el valor correspondiente a enero 2016. Fuente de datos: re-análisis NCEP-NCAR. Figura gentileza de R. Garreaud (DGF-Universidad de Chile y CR2).

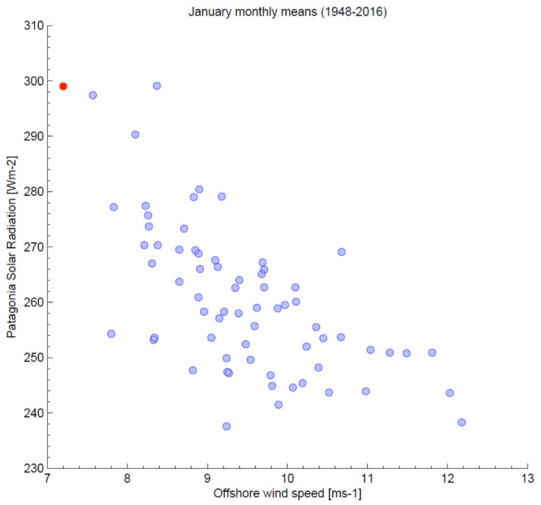


Figura 11. Relación entre la intensidad del viento en la dirección este-oeste y la radiación solar durante enero en la posición 45°S - 75°W para el periodo 1948-2016. El símbolo rojo corresponde a enero 2016. Fuente de datos: re-análisis NCEP-NCAR. Figura gentileza de R. Garreaud (DGF-Universidad de Chile y CR2).

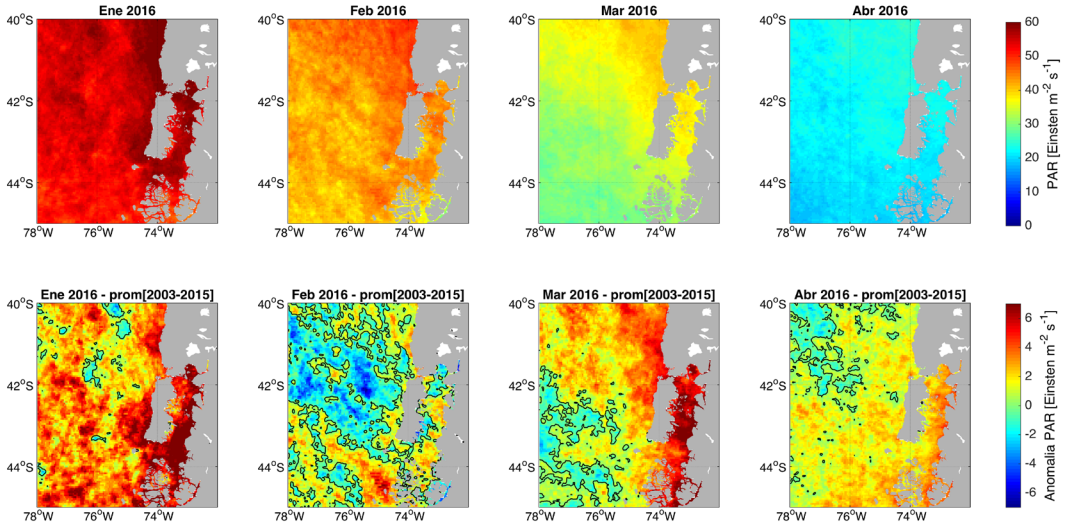


Figura 12. Radiación PAR en superficie en el mar interior y zona oceánica frente a Chiloé durante enero-abril 2016 (paneles superiores) y diferencia entre estos campos y el promedio para cada mes en el periodo 2003-2015 (paneles inferiores). Los colores amarillo y rojo de los paneles inferiores indican mayor radiación que lo normal para cada mes. Los contornos negros indican cero diferencia, i.e. paso de anomalías positivas a negativas. Datos derivados desde imágenes satelitales MODIS-Aqua con 4 km de resolución espacial.

Los campos de vientos predominantes para cada mes del verano-otoño 2016 se comparan con lo observado en el periodo 2009-2015 en la **Figura 13**. Al comparar la intensidad del viento (colores) en enero-febrero 2016 (paneles superiores) con el promedio 2009-2015 (paneles inferiores), se observó una condición de mayor calma que lo normal en enero-febrero 2016, con vientos más intensos que el promedio durante marzo-abril 2016. El campo de vectores en cada panel de la **Figura 13** muestra, además, que la dirección del viento tuvo una fuerte anomalía durante el verano 2016. De acuerdo al promedio climatológico, en marzo el viento

dominante debiera soplar de oeste a este, mientras que en abril debiera soplar de norte a sur. Sin embargo, tanto en marzo como en abril 2016 se registraron vientos intensos de sur a norte. Este patrón de viento constituye una condición favorable al proceso conocido como surgencia costera, resultante de la interacción entre el efecto del viento sobre las capas superficiales del océano y la rotación de la Tierra, y que genera el transporte de agua superficial hacia mar afuera conocido como transporte de Ekman, con el consiguiente afloramiento de aguas frías desde mayores profundidades. La manifestación más claramente visible de la surgencia, que en Chile central alcanza su mayor intensidad durante meses de primavera – verano, es la aparición en imágenes satelitales de una banda costera de agua superficial fría y de una zona donde la temperatura superficial cambia en forma abrupta en el eje costa-océano, conocida como "frente de surgencia" (ver ejemplo en **Figura 14**). Al mismo tiempo, el transporte de agua superficial hacia mar abierto genera una caída en el nivel del mar cerca de la costa, lo cual es detectado por altímetros satelitales y utilizado para calcular la dirección y velocidad de corrientes conocidas como "geostróficas", de menor intensidad que las forzadas por la acción directa del viento, y orientadas en la misma dirección del viento (i.e. hacia el norte), con una intensidad máxima en el frente de surgencia (**Figura 14**). De esta forma, en una condición de surgencia los flujos dominantes en las capas superficiales del océano están dirigidos hacia el oeste y norte-noroeste.

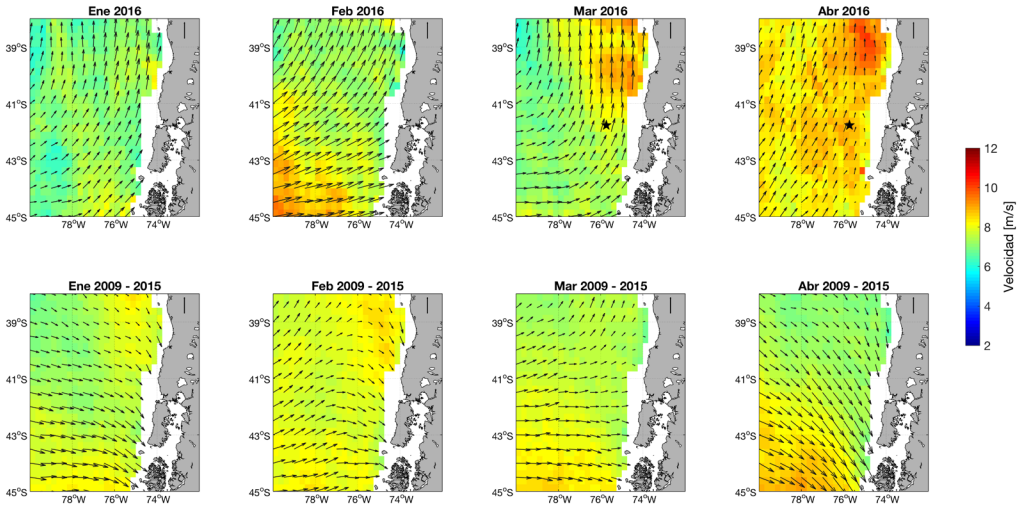


Figura 13. Comparación entre los campos de viento detectados por el sensor satelital ASCAT en la zona oceánica frente a Chiloé durante enero-abril 2016 (paneles superiores) y las condiciones promedio para cada mes calculadas a partir de información disponible para 2009-2015 (paneles inferiores). Los colores indican velocidad del viento y los vectores (flechas negras) indican dirección y magnitud. El símbolo en forma de estrella indica la posición del punto de vertimiento de salmones en marzo 2016.

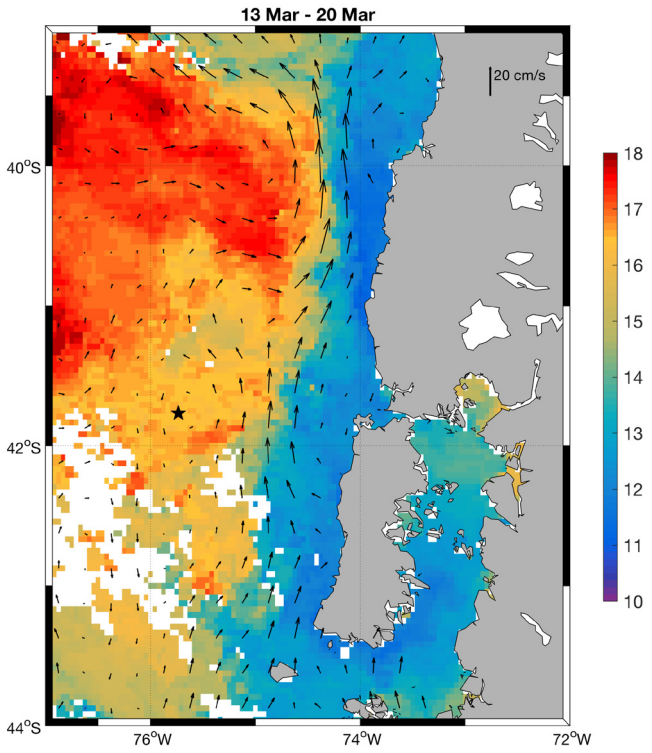


Figura 14. Ejemplo del patrón espacial de Temperatura Superficial del Mar (MODIS-Aqua) observado bajo condiciones de viento favorables a la surgencia costera, correspondiente al periodo comprendido entre el 13 y 20 de marzo de 2016. La escala de colores corresponde a temperatura en °C, y los vectores corresponden a velocidades geostróficas estimadas desde datos de altimetría. El punto indicado con una estrella negra corresponde a la zona de vertimiento de salmones en marzo 2016. Datos MODIS-Aqua gentileza de G. Saldías (Oregon State University, USA). Datos de altimetría obtenidos desde el servicio AVISO de la Agencia Espacial Europea (ESA).

Típicamente los eventos de surgencia tienen una duración de varios días, pudiendo darse excepcionalmente eventos de una y hasta dos semanas de duración. Entre eventos de surgencia, el viento se debilita o cambia de dirección. Por ello, el análisis de promedios mensuales de viento no es el mejor camino para analizar la ocurrencia, intensidad y variabilidad espacial de la surgencia costera. Por otro lado, el transporte de agua generado por surgencia depende de la latitud además de la intensidad del viento, dado el cambio latitudinal en el efecto de rotación de la Tierra. Por lo anterior, a partir del stress de viento y de la latitud se calculó – con resolución temporal diaria – el transporte de Ekman para puntos cercanos a la costa a lo largo de la región comprendida entre 45 y 35°S durante el periodo julio 2015 a junio 2016 (**Figura 15**). Este análisis se complementó con la elaboración de un mapa de anomalías diarias de Temperatura Superficial del Mar en puntos cercanos a la costa a lo largo de la misma región y durante el mismo periodo (**Figura 16**).

El patrón espacio-temporal del transporte de Ekman indicó que, si bien hubo surgencia frente a Chiloé durante buena parte de la primavera – verano (noviembre 2015 a abril 2016), el transporte de agua generado por este fenómeno no fue tan importante como lo ocurrido más al norte, por ejemplo en las cercanías de Valdivia y hasta Punta Lavapié, Región del Biobío (**Figura 15**). Consistente con la ocurrencia de surgencia costera, el agua superficial cerca de la costa estuvo más fría que lo esperado entre fines de enero y fines de marzo, aunque las anomalías no superaron 1°C frente a Chiloé, y superaron levemente este valor entre Valdivia y la costa del Biobío (**Figura 16**).

El otro hallazgo importante obtenido de este análisis fue el intenso hundimiento o "downwelling" (condición opuesta a la surgencia) ocurrido durante el otoño e invierno de 2015, con eventos de larga duración y extensa cobertura espacial en mayo, junio, julio-agosto

y agosto-septiembre (**Figura 15**). Esta condición de transporte de agua superficial más cálida desde mar afuera hacia la costa, generada por el efecto de viento persistente hacia el sur durante meses de invierno, queda de manifiesto en las anomalías cálidas registradas al norte de los 43 °S en el otoño-invierno de 2015 (**Figura 16**). Aunque este fenómeno no es nuevo, ni ocurre solamente en Chiloé, se desconoce los efectos que podría tener sobre las condiciones físico-químicas (nutrientes, salinidad superficial, estratificación) y biológicas (cambios en la composición de la comunidad fitoplanctónica) en aguas interiores y en la posterior respuesta del fitoplancton al incremento en radiación solar durante primavera-verano.

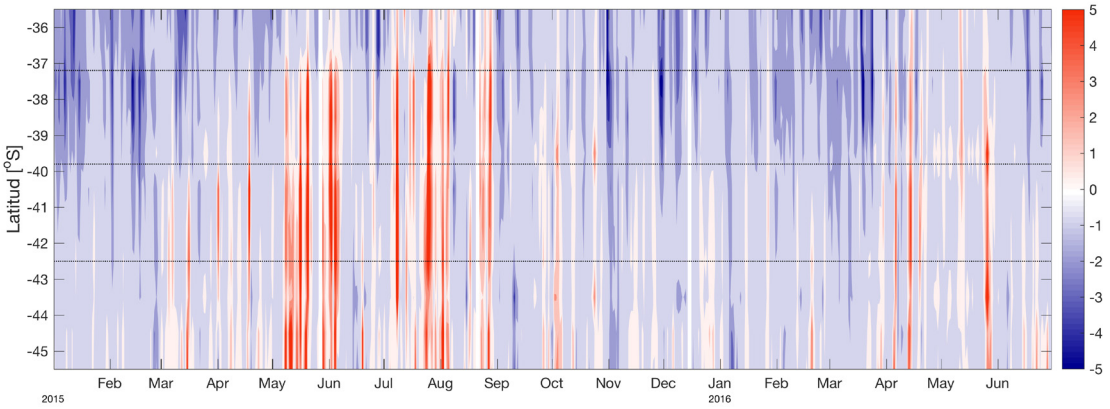


Figura 15. Variabilidad latitudinal y temporal del transporte de Ekman ($m^2\ s^{-1}$) calculado para puntos cercanos a la costa en el rango latitudinal comprendido entre los 35 y 45°S, para el periodo Julio 2015 a Junio 2016. Los tonos azules (valores negativos) indican surgencia, con agua superficial alejándose de la costa, mientras que los rojos indican la situación opuesta, conocida como "downwelling", con transporte de agua superficial hacia la costa. Las líneas horizontales indican, de sur a norte, la ubicación de la isla de Chiloé, Valdivia y Punta Lavapié.

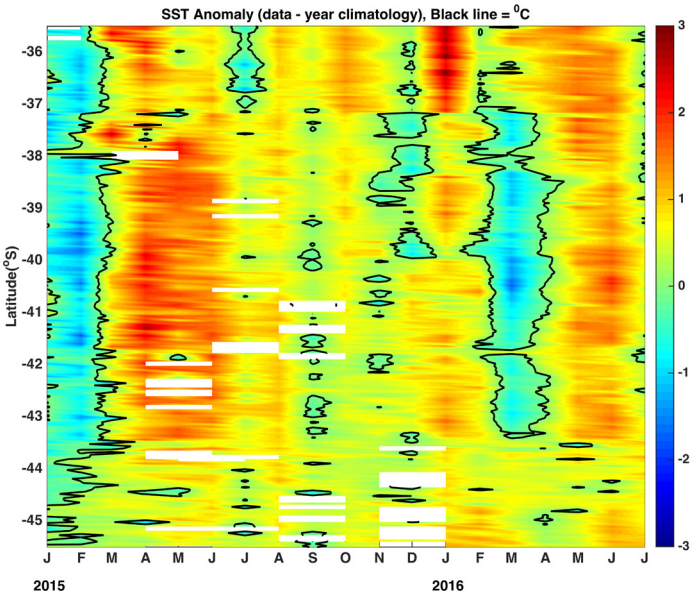


Figura 16. Variabilidad latitudinal y temporal de las anomalías diarias de Temperatura Superficial del Mar (colores, en °C) obtenidas a partir de imágenes satelitales MODIS-Aqua para puntos cercanos a la costa en el rango latitudinal comprendido entre los 35 y 45°S, para el periodo Julio 2015 a Junio 2016. Los tonos azules (valores negativos) indican enfriamiento y los rojos indican agua anómalamente cálida en relación al promedio climatológico para 2003-2015. Figura gentileza de D. Narváez (U. de Concepción).

3.2. Caracterización del viento en el contexto de la variabilidad histórica

Se analizó la variabilidad del viento del último año en relación a lo registrado durante las últimas décadas, con el fin de evaluar qué tan atípicas fueron las condiciones de forzamiento atmosférico registradas sobre el océano frente a Chiloé antes y durante el evento FAN del verano – otoño 2016. Para este análisis se complementó la información de viento satelital ya utilizada (proveniente del sensor satelital ASCAT para 2009-2016) con datos de re-análisis de NCEP-NCAR (http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis) para el periodo 1960-2016. Más específicamente, se utilizó un registro diario de velocidad del viento a 10 m de altura sobre el océano para el sector correspondiente a las coordenadas 42.5°S y 75°W, aproximadamente a 70 km al oeste de la playa de Cucao. Para dar un contexto espacial al análisis, se incluyó además información de viento para otros 2 puntos, ubicados a 40°S y 45°S de latitud, manteniendo la longitud de 75°W (**Figura 17**). Una comparación entre estos datos de re-análisis y los disponibles para las tres posiciones indicadas a partir de imágenes satelitales ASCAT indicó una buena correspondencia entre ambos (coeficientes de determinación por sobre el 60%), aunque con una mejor correlación entre los componentes zonales del stress del viento y una leve sub-estimación del stress meridional NCEP con respecto a ASCAT, sobre todo cuando el viento tiene dirección hacia el sur (**Figura 18**).

A partir del registro diario de stress de viento obtenido desde re-análisis, se caracterizó tanto la periodicidad como la intensidad del viento en la región comparando el stress de viento registrado en cada día durante el periodo julio 2015 – junio 2016 con el promedio climatológico calculado para cada día del año a partir del registro disponible para 1960-2010 (**Figura 19**).

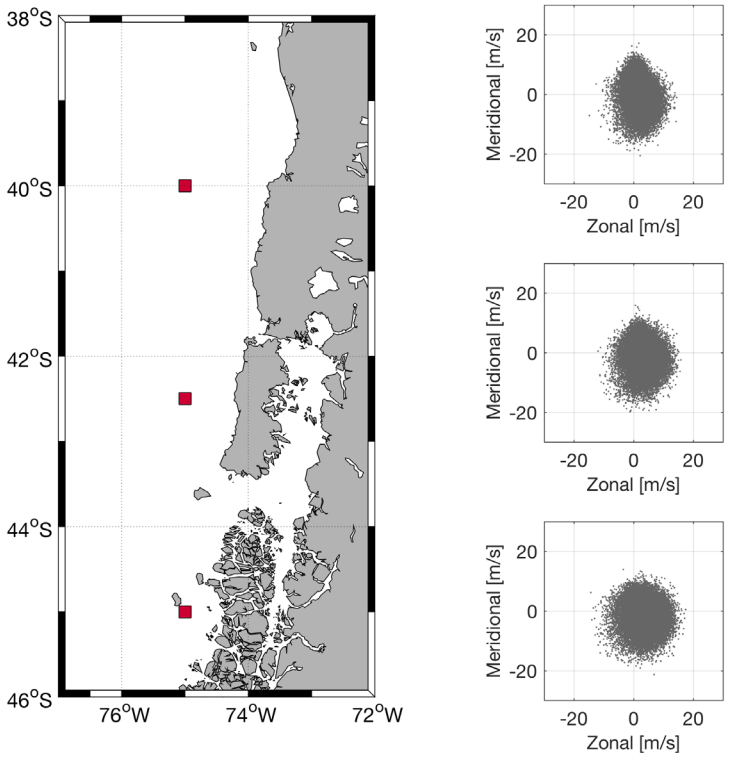


Figura 17. Ubicación geográfica de los puntos para los cuales se extrajo información de re-análisis sobre viento en el periodo 1960-2016 (izquierda). Los gráficos de dispersión en los paneles de la derecha resumen la data en términos de la orientación predominante del viento.

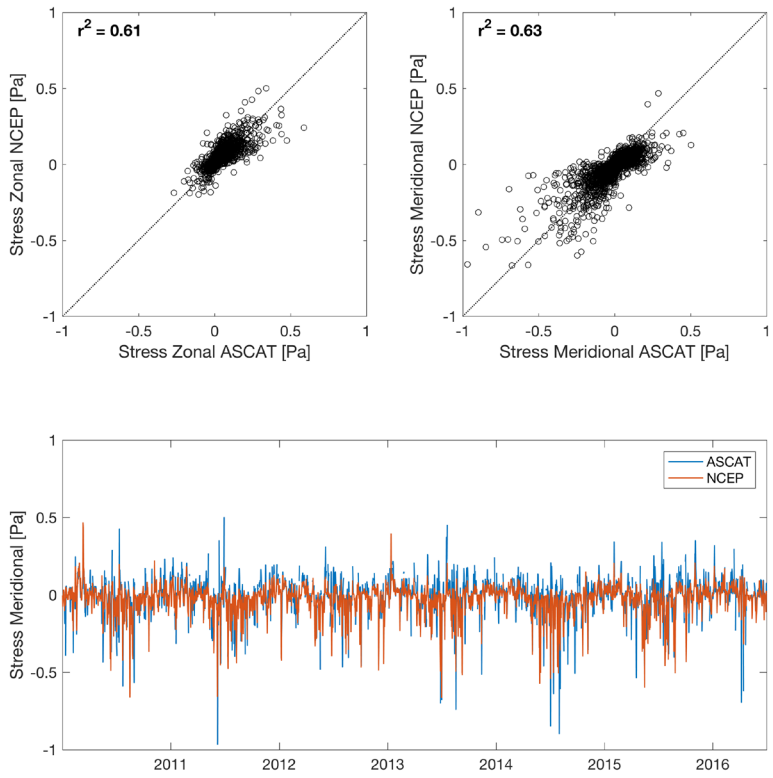


Figura 18. Comparación del stress de viento estimado a partir de imágenes satelitales ASCAT y el estimado por re-análisis. Los paneles inferiores muestran la correlación entre los componentes zonal y meridional del viento para ambas fuentes de información. El panel inferior muestra la correspondencia en fluctuaciones diarias del componente meridional del viento para el periodo 2009-2016.

Al examinar las series diarias de stress de viento en relación a la media climatológica se observó una clara anomalía positiva en el stress meridional durante todo el verano 2016 en los 40°S (**Figura 19**), confirmando la existencia de condiciones favorables a la surgencia costera. En la latitud frente a Chiloé se observaron periodos de días a semanas en que el stress meridional se salió del rango de valores considerados como normales para esa época del año, con viento claramente favorable a la surgencia a principios de noviembre 2015, enero 2016 y durante todo el mes de marzo 2016 (**Figura 19**). Los mismos eventos se observaron en la latitud 45°S, aunque más atenuados. No obstante estas diferencias, en las 3 latitudes se observó que existieron periodos de intenso viento hacia el sur, principalmente en el invierno y comienzos de primavera 2015, así como eventos más breves en abril 2016. En la componente zonal se observaron episodios de fuerte viento hacia el continente (valores positivos) en invierno y durante el verano, aunque estos últimos fueron más anómalamente intensos en la latitud 45°S (**Figura 19**). Este análisis confirmó además que en las latitudes de más al norte, y sobre todo en los 40°S, el viento zonal fue muy débil durante el verano 2016, y anómalamente negativo, es decir soplando desde el continente hacia el océano, a partir de abril-mayo 2016.

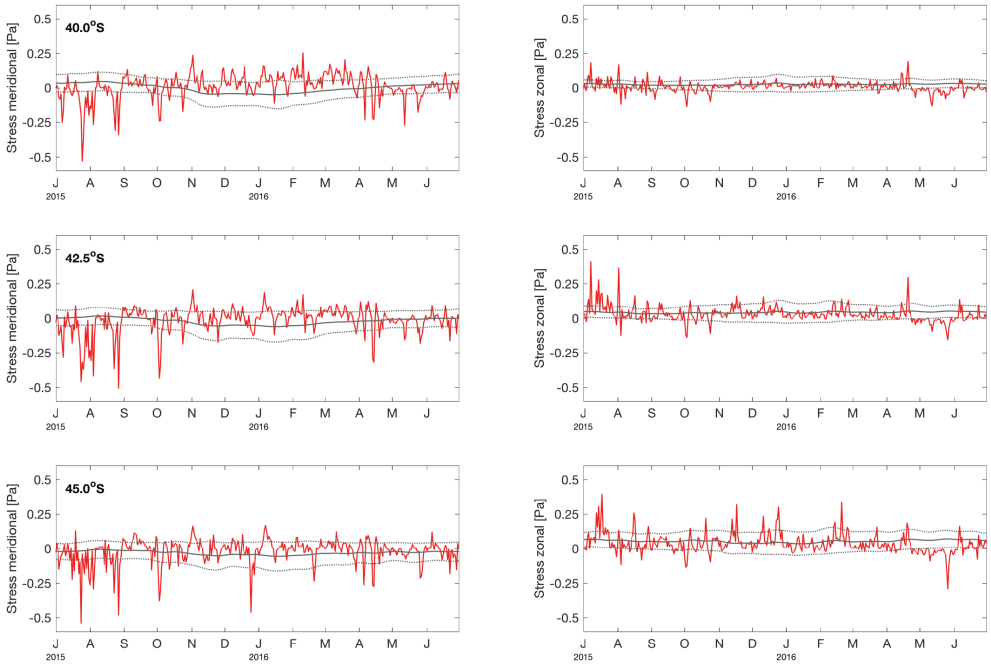


Figura 19. Variabilidad del stress de viento en sus dos componentes: meridional (paneles de la izquierda) y zonal (derecha). Se compara el registro diario para el periodo entre 1 de julio de 2015 y 30 de junio de 2016 con la media climatológica calculada para cada día del año a partir del registro disponible para 1960-2010. La línea gris continua en cada panel corresponde al promedio climatológico, y las líneas punteadas indican 1 desviación estándar por encima y por debajo de este promedio.

Para comparar el último año con los datos históricos en términos del efecto acumulativo de la acción del viento sobre el océano, para cada año en el registro disponible se calculó el stress de viento acumulado en cada componente y latitud. Los periodos anuales de integración del stress de viento comprendieron del 1 de julio de cada año al 30 de junio del año siguiente. De esta forma, para cada uno de los 56 años en el registro con que se trabajó, se produjo una trayectoria del stress de viento acumulado que es ascendente en periodos con valores positivos (hacia el norte en la componente meridional y hacia el este en la componente zonal), descendente en periodos con valores negativos (hacia el sur en la componente meridional y hacia el oeste en la componente zonal), y horizontal en periodos en que el stress de viento es débil. Para representar la condición normal de variabilidad en el stress de viento en cada una de las tres latitudes analizadas, se calculó una trayectoria promedio para los 50 años correspondientes al periodo julio 1960 a junio 2010, y se comparó con la trayectoria obtenida para el año comprendido entre el 1 de Julio de 2015 y el 30 de Junio de 2016.

Los resultados de este análisis confirmaron que la calma del viento zonal fue más extrema hacia los 40 °S, y se manifestó a partir de septiembre 2015, mes en que la trayectoria del stress zonal acumulado se salió del margen de variabilidad considerado normal (**Figura 20**). En la latitud de Chiloé y más al sur hubo una calma relativa en enero-febrero 2016, pero el cambio más importante y aparente fue la reversión del viento zonal registrada en mayo-junio, y que se refleja como una caída en las trayectorias del viento zonal acumulado que se muestran en los paneles de la izquierda de la **Figura 20**.

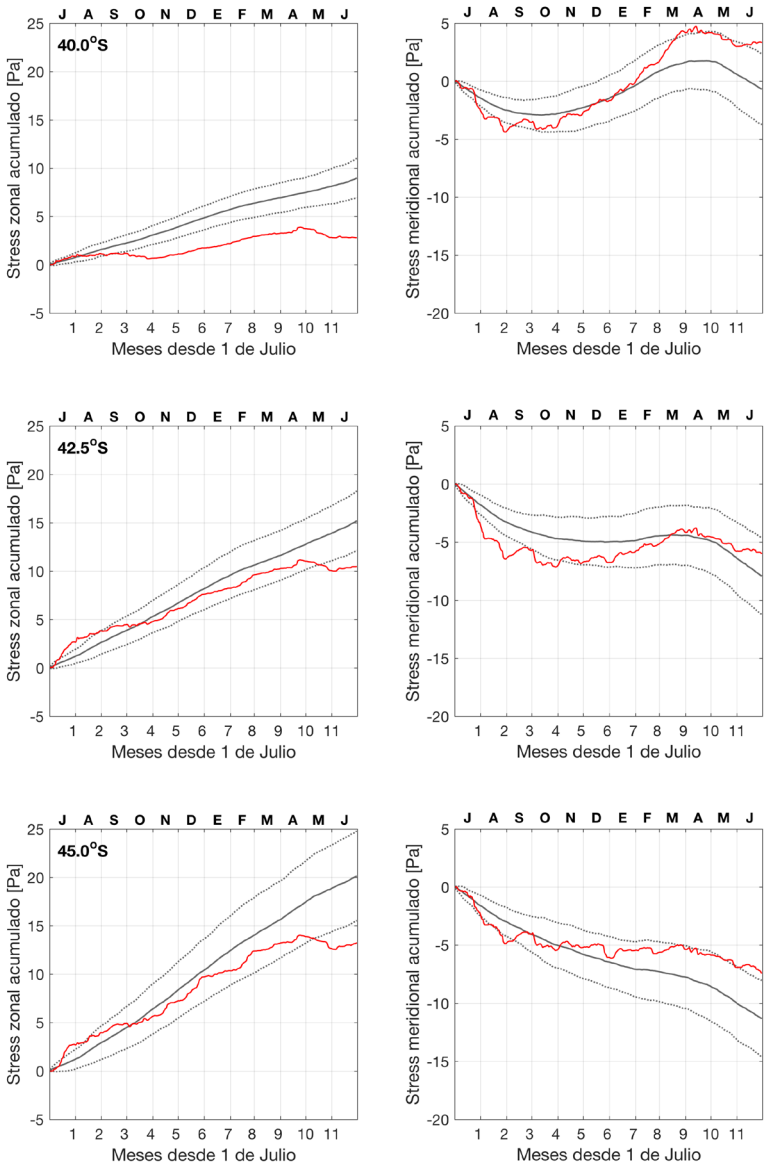


Figura 20. Comparación del stress de viento acumulado en las componentes zonal (izquierda) y meridional (derecha) durante 2015-2016 (línea roja) con el promedio climatológico calculado para el periodo 1960-2010 en un punto frente a Chiloé y en otras dos latitudes. La línea gris continua en cada panel corresponde al promedio climatológico para el periodo 1960-2010, mientras que las líneas punteadas indican 1 desviación estándar por encima y por debajo de este promedio. El periodo de integración abarca desde el 1 de julio al 30 de junio del año siguiente. En la parte superior del eje horizontal se indica el mes correspondiente, con los meses de verano ubicados al centro de cada gráfico.

En la componente meridional, la intensificación del viento hacia el norte fue más notoria al norte de Chiloé, en la latitud 40°S, y se registró principalmente en marzo 2016 (**Figura 20**). Frente a Chiloé también hubo condiciones favorables a la surgencia en marzo, pero de acuerdo al promedio climatológico del stress integrado, éstas fueron menos anómalas que más al norte. La anomalía más notoria en el stress meridional, sin embargo, ocurrió en las tres latitudes durante el invierno previo, en julio-agosto 2015 (**Figura 20**). En este periodo, el viento fue anómalamente intenso en dirección al sur, generando condiciones propicias para el fenómeno opuesto a la surgencia , conocido como hundimiento o "downwelling". Este hallazgo es consistente con el patrón ya descrito de transporte de Ekman, calculado en forma independiente y presentado en la **Figura 15**.

3.3. Condiciones de temperatura y pigmentos en el verano-otoño 2016

El análisis de la situación oceanográfica durante el verano y otoño 2016 a partir de imágenes satelitales de temperatura y color del océano señala que a comienzos de enero, inicio y fines de febrero, y durante marzo se registraron en la costa oeste de Chiloé eventos de surgencia costera, detectados en imágenes satelitales a partir de agua superficial fría cerca de la costa, y consistentes con el campo de viento observado (**Figuras 21a y 21b**). En las localidades afectadas por aguas frías de surgencia se observaron además altas concentraciones de clorofila-a superficial (**Figuras 22a y 22b**), lo que en parte podría estar asociado a la llegada de aguas ricas en nutrientes a las cercanías de la costa, y la proliferación de fitoplancton favorecida además por los altos niveles de radiación solar. No se observó un aumento de la clorofila superficial ni de la fluorescencia en la zona de vertimiento de salmones (**Figuras 22 y 23**), que pudiese indicar una relación causal entre el vertimiento y la proliferación de algas en la costa. El análisis conjunto de las distribuciones de temperatura y fluorescencia superficial (**Figuras 21 y 23**) mostró más claramente una mayor actividad fotosintética en zonas costeras afectadas por agua fría (surgencia) y no a la zona de vertimiento, que exhibió bajos niveles de fluorescencia durante las semanas y meses posteriores al vertimiento.

En relación a las imágenes satelitales de clorofila superficial, que durante la crisis en Chiloé fueron utilizadas en numerosas ocasiones como principal fuente de información para explicar el desarrollo y expansión geográfica de la FAN, es preciso señalar que éstas adolecen de limitaciones que deben considerarse al momento de interpretarlas. Primero, la estimación de cuánta clorofila-a hay en el mar se basa en que la concentración de clorofila-a se supone proporcional a la abundancia del fitoplancton. El problema de este supuesto es que no todos los organismos que constituyen el fitoplancton poseen la misma cantidad de pigmentos por célula, y que no toda la clorofila detectada está en células vivas. En segundo lugar, la estimación satelital de la concentración de clorofila-a se basa en el color del agua que el satélite detecta mediante sus sensores de radiación en diferentes bandas del espectro electromagnético, homologables a los colores del arco iris. En aguas muy cercanas a la costa y con fuerte influencia de agua dulce, como es el caso del Mar Interior de Chiloé, las mediciones satelitales utilizadas para estimar clorofila (en la banda de azul y verde) se ven afectadas por sedimentos en suspensión provenientes de plumas de ríos, sustancias coloreadas disueltas de origen terrestre, que entran al mar vía ríos y por escorrentía superficial, y por el mismo fondo marino por efecto de re-suspensión en zonas de baja profundidad. Es por esto que parte de la señal de alta clorofila en zonas como el mar interior de Chiloé puede no corresponder a biomasa fitoplanctónica, que es lo que se busca estimar cuando se mide clorofila, sino a otras sustancias y a partículas inertes. La estimación satelital de fluorescencia superficial, por otro lado, entrega un indicador más confiable de dónde está la biomasa activa, es decir el fitoplancton que está haciendo fotosíntesis. Por ello, este producto satelital debiese utilizarse como complemento de la clorofila al momento de hacer inferencias sobre la dinámica de una floración algal. Dicho esto, la fluorescencia satelital también tiene limitaciones. Por utilizar mediciones en la zona del espectro correspondiente al color rojo (de menor energía), la estimación de fluorescencia está restringida a una fina capa en la superficie, y es común que una fracción importante del fitoplancton vivo se concentre no en la superficie, sino a varios metros de profundidad. Por ello, es indispensable contar con mediciones *in situ*, a partir de recolección de agua y análisis de laboratorio, que permitan validar lo detectado a partir de imágenes satelitales.

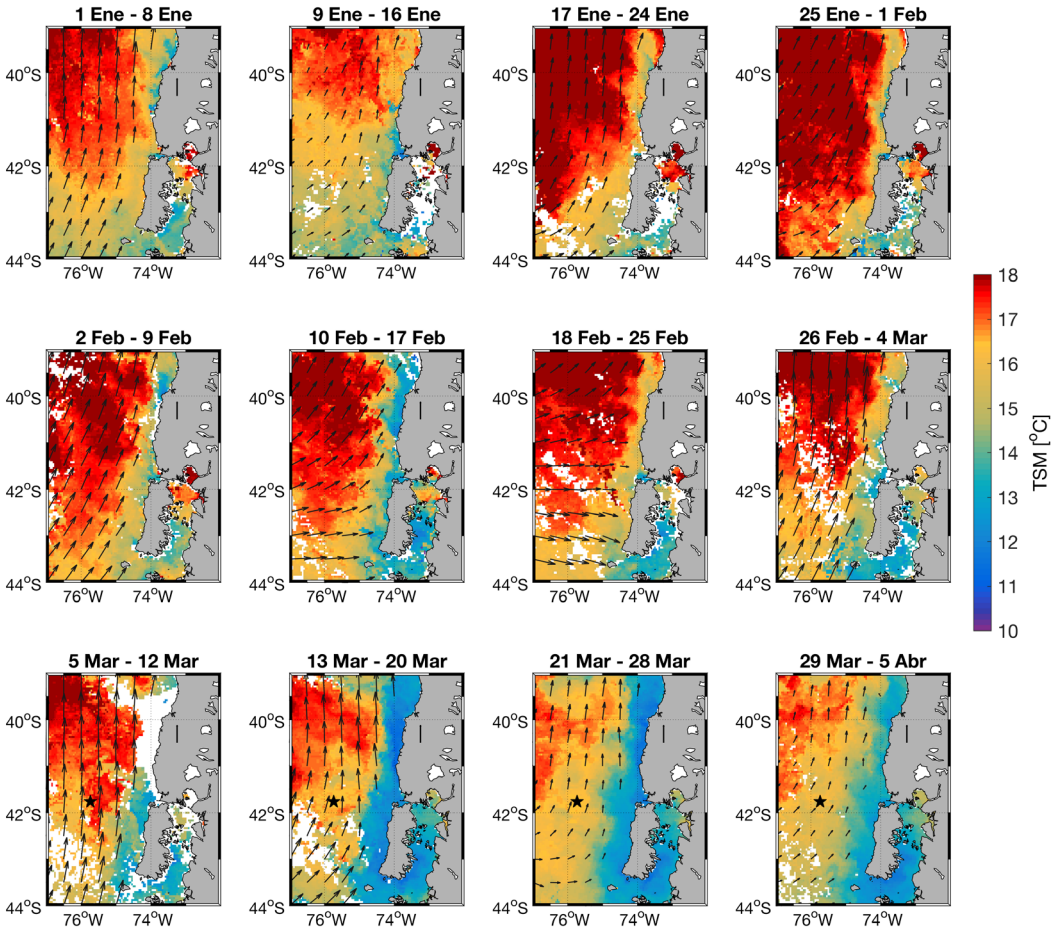


Figura 21a. Campos semanales de Temperatura Superficial del Mar (MODIS-Aqua, 1 km de resolución espacial) y viento satelital (ASCAT, 25 km de resolución espacial) en el mar interior y zona oceánica frente a Chiloé entre febrero y abril 2016. El vector vertical ubicado sobre tierra indica la escala de los vectores de viento, y corresponde a una velocidad de 20 km h^{-1}. El símbolo negro con forma de estrella indica el punto de vertimiento de salmones en marzo 2016. Datos MODIS-Aqua fueron procesados y proporcionados por G. Saldías (Oregon State University, USA).

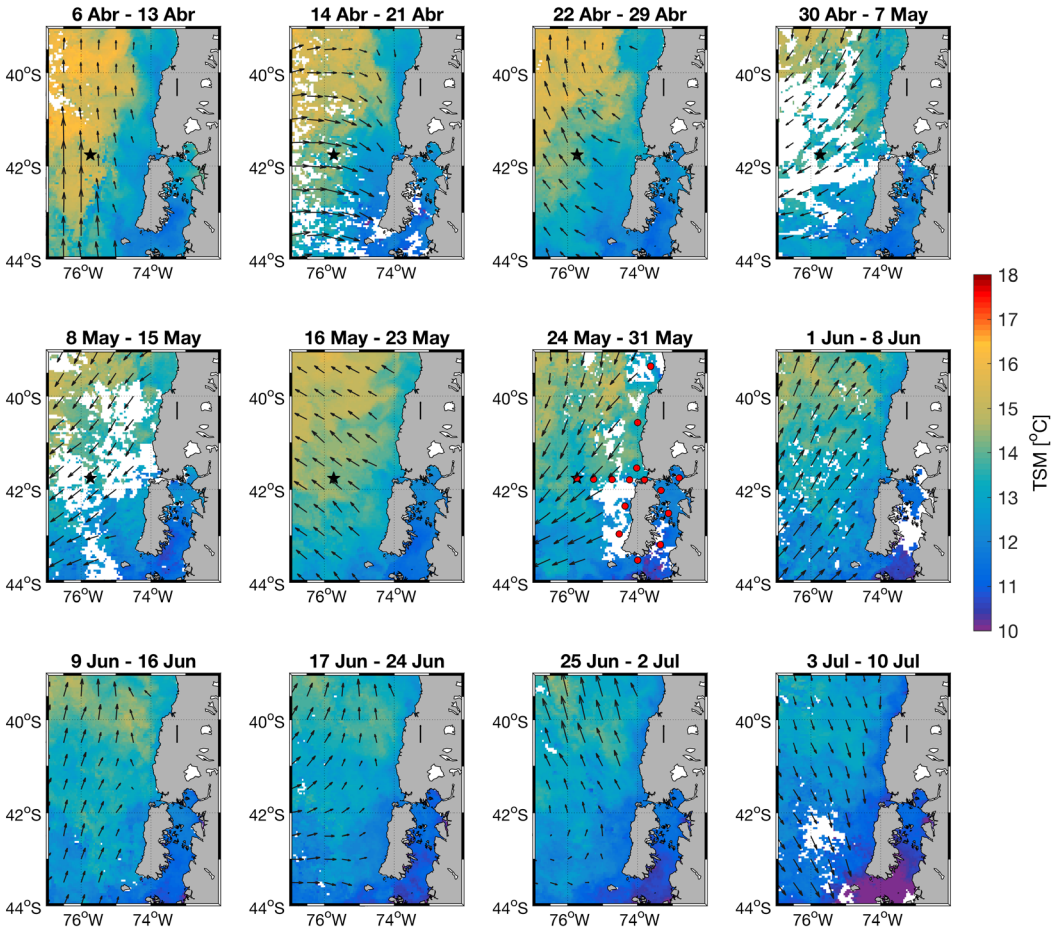


Figura 21b. Campos semanales de Temperatura Superficial del Mar (MODIS-Aqua, 1 km de resolución espacial) y viento satelital (ASCAT, 25 km de resolución espacial) en el mar interior y zona oceánica frente a Chiloé entre abril y julio 2016. El vector vertical ubicado sobre tierra indica la escala de los vectores de viento, y corresponde a una velocidad de 20 km h^{-1}. El símbolo negro con forma de estrella indica el punto de vertimiento de salmones en marzo 2016. Los puntos rojos en el panel de 24-31 mayo indican la posición de las estaciones de muestreo visitadas durante el crucero a bordo del Cabo de Hornos. Datos MODIS-Aqua fueron procesados y proporcionados por G. Saldías (Oregon State University, USA).

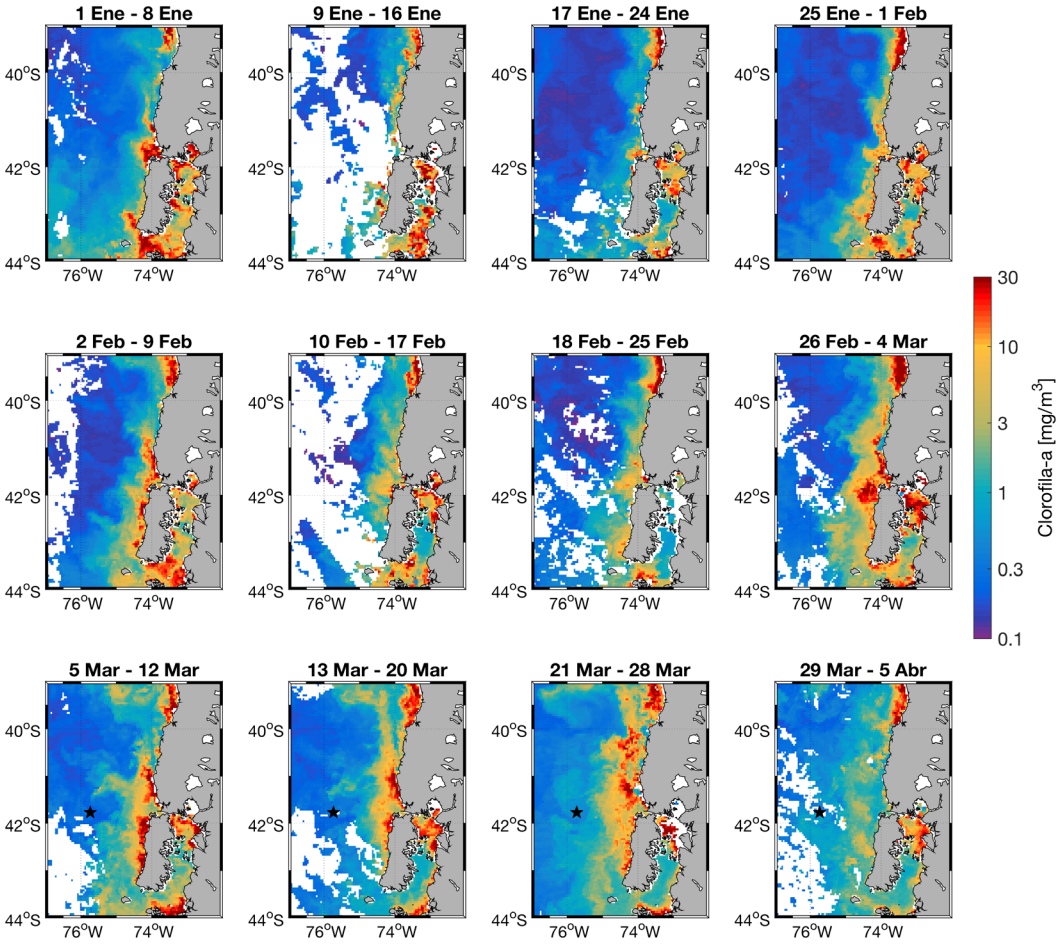


Figura 22a. Gráficos compuestos semanales de Clorofila-a superficial (mg m^{-3}) en el mar interior y zona oceánica frente a Chiloé entre enero y abril 2016, derivados de imágenes satelitales MODIS-Aqua con 1 km de resolución espacial. El símbolo negro con forma de estrella indica el punto de vertimiento de salmones en marzo 2016. Datos MODIS-Aqua fueron procesados y proporcionados por G. Saldías (Oregon State University, USA).

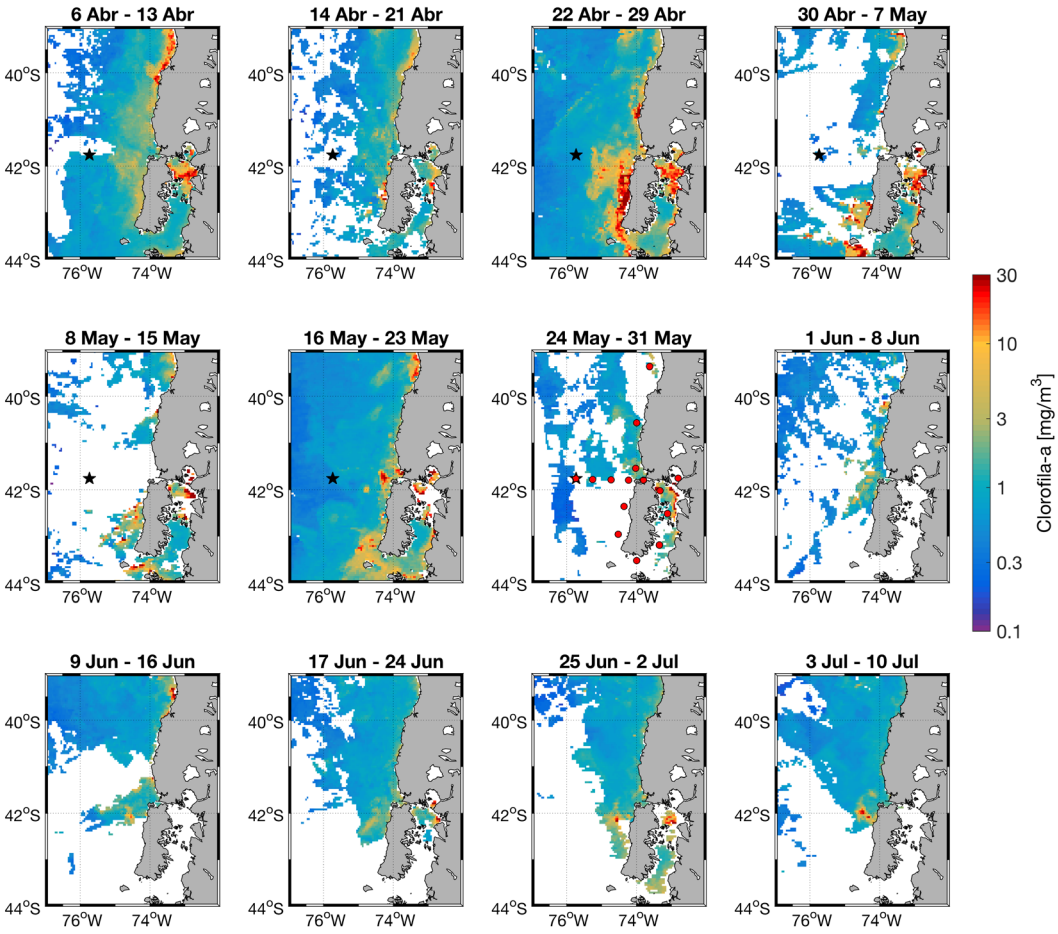


Figura 22b. Gráficos compuestos semanales de Clorofila-a superficial (mg m^{-3}) en el mar interior y zona oceánica frente a Chiloé entre abril y julio 2016, derivados de imágenes satelitales MODIS-Aqua con 1 km de resolución espacial. El símbolo negro con forma de estrella indica el punto de vertimiento de salmones en marzo 2016. Los puntos rojos en el panel de 24-31 mayo indican la posición de las estaciones de muestreo visitadas durante el crucero a bordo del Cabo de Hornos. Datos MODIS-Aqua fueron procesados y proporcionados por G. Saldías (Oregon State University, USA).

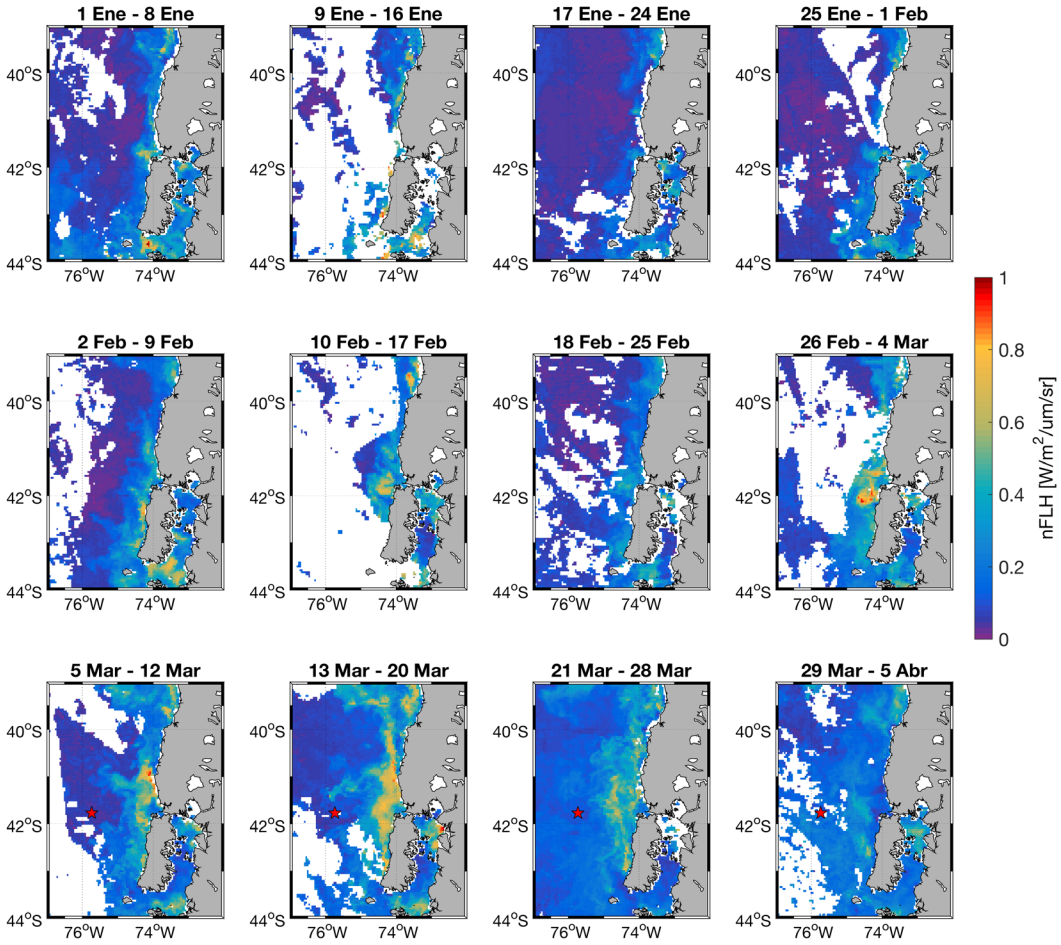


Figura 23a. Gráficos compuestos semanales de fluorescencia normalizada en aguas del mar interior y zona oceánica frente a Chiloé entre enero y abril 2016, derivados de imágenes satelitales MODIS-Aqua con 1 km de resolución espacial. El símbolo rojo con forma de estrella indica el punto de vertimiento de salmones en marzo 2016. Datos MODIS-Aqua fueron procesados y proporcionados por G. Saldías (Oregon State University, USA).

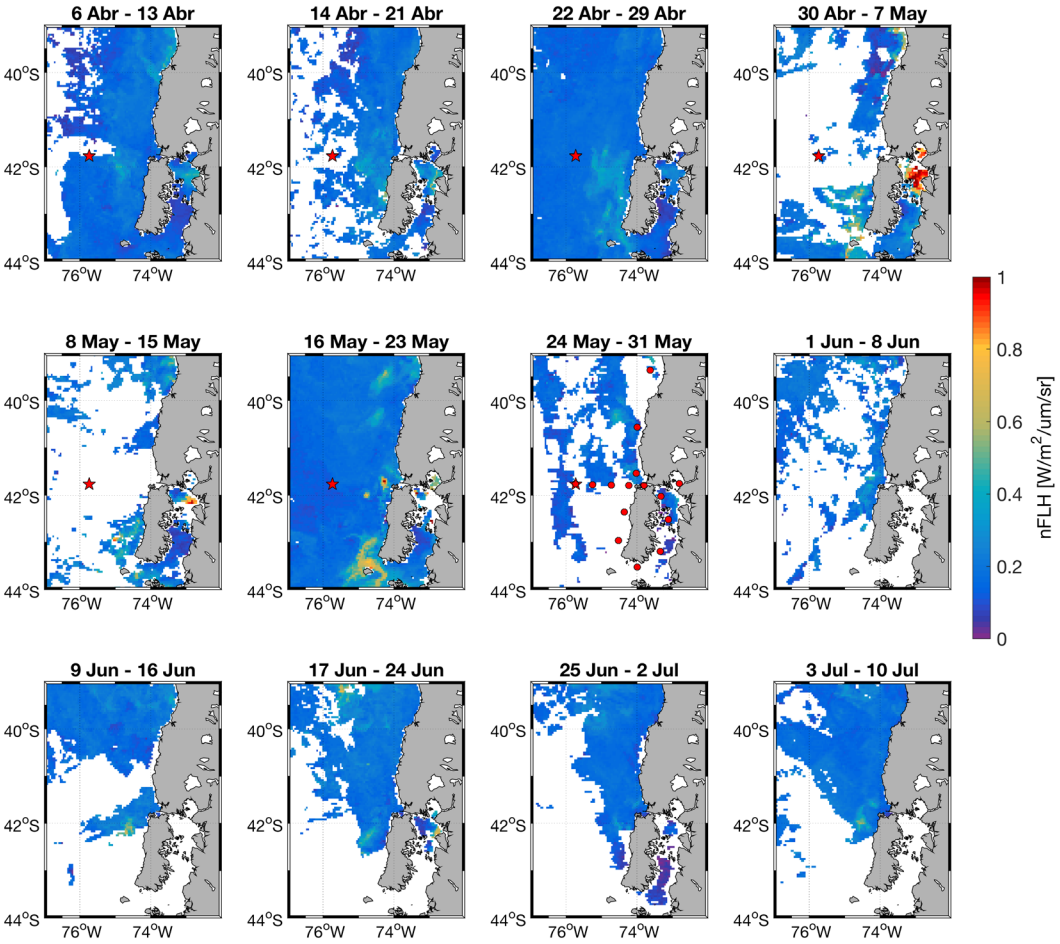
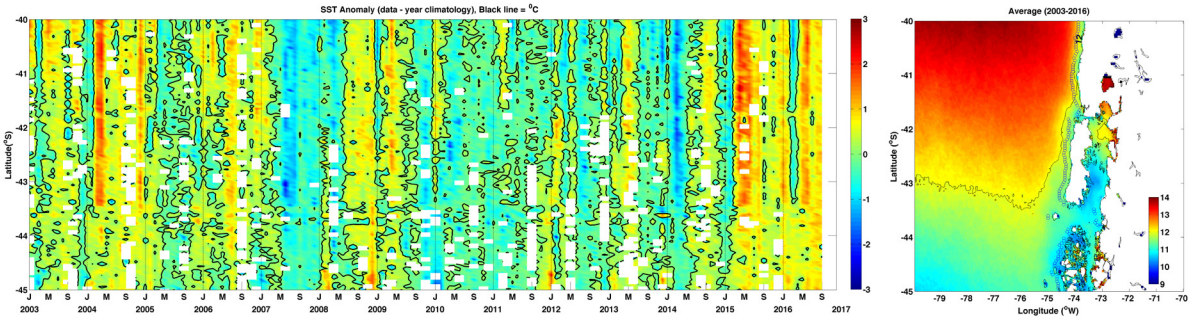


Figura 23b. Gráficos compuestos semanales de fluorescencia normalizada en aguas del mar interior y zona oceánica frente a Chiloé entre abril y julio 2016, derivados de imágenes satelitales MODIS-Aqua con 1 km de resolución espacial. El símbolo rojo con forma de estrella indica el punto de vertimiento de salmones en marzo 2016. Los puntos rojos en el panel de 24-31 mayo indican la posición de las estaciones de muestreo visitadas durante el crucero a bordo del Cabo de Hornos. Datos MODIS-Aqua fueron procesados y proporcionados por G. Saldías (Oregon State University, USA).

3.4. Condiciones satelitales recientes en el contexto de la última década

Para poner en contexto las condiciones oceanográficas detectadas mediante sensores satelitales en la zona sur durante la crisis ambiental de Chiloé, se realizó una comparación entre los registros de Temperatura Superficial del Mar (TSM) y clorofila-a superficial obtenidos para el último verano y los disponibles desde 2003 para pixeles costeros a lo largo de la región comprendida entre 40 y 40 °S. Los registros diarios de TSM y clorofila-a fueron convertidos a anomalías calculando la diferencia entre cada valor diario y la media climatológica mensual para el mes correspondiente, calculada con el registro de 2003 a 2015.

Los resultados muestran que durante el verano 2016 predominó una condición cálida a lo largo de toda la región, y que esta condición partió a fines del verano previo, en marzo-abril 2015 (**Figura 24**). Superpuesto en esta condición cálida, durante el verano 2016 se registró un enfriamiento que afectó desde los 43°S hacia el norte, y que fue consistente con la intensificación del viento favorable a la surgencia en el mes de marzo. Sin embargo, en periodos previos como el verano 2014 y el otoño-invierno 2007 se registraron enfriamientos más intensos que el de este último verano.


SST Anomaly (data - year climatology), Black line = °C
Latitude (°S)
-40
-41
-42
-43
-44
-45
J M S J M S J M S

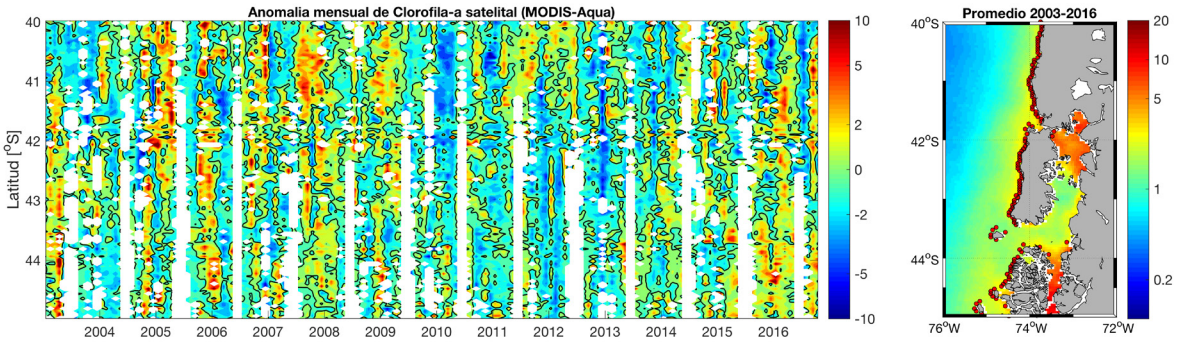


Figura 25. Anomalías diarias de la clorofila-a superficial (mg m^{-3}) detectada por MODIS-Aqua entre 2003 y 2016 para pixeles cercanos a la costa entre 40 y 45 °S. Los tonos amarillos a rojos muestran anomalías positivas, y los azules muestran valores negativos, i.e. menos clorofila de lo normal. Los contornos negros indican diferencia cero. El mapa de la derecha muestra la ubicación de los pixeles utilizados en este análisis.

3.5. Variabilidad oceanográfica frente a Chiloé y el vertimiento de salmones

El símbolo con forma de estrella en las **Figuras 21-23** marca el lugar de vertimiento de salmones durante un periodo de 10 días en marzo 2016. Por el avanzado estado de descomposición del material vertido, es esperable que buena parte del vertimiento no se haya permanecido en las capas más superficiales del océano (profundidades < 100 m) por varios días o semanas. Teniendo esto en consideración, y dada la ubicación del punto de vertimiento en relación al patrón de viento, temperatura superficial, transporte de Ekman calculados y velocidades de corrientes geostróficas examinadas, a juicio de este comité es altamente probable que la circulación dominante durante marzo y comienzos de abril 2016 haya transportado el material vertido hacia el oeste y norte-noroeste, y no de regreso a la costa de Chiloé.

Aunque se espera que, en el eje perpendicular a la costa, el transporte de Ekman generado por el viento sea compensado por una corriente de retorno, y que ésta transporte agua de mayor profundidad hacia la superficie (de ahí el término surgencia o afloramiento), este retorno a la costa de aguas sub-superficiales ocurre dentro de una banda cuyo ancho está definido por el parámetro conocido como Escala de Deformación de Rossby. Para la latitud de Chiloé, y las condiciones de densidad observadas en la columna de agua durante el crucero oceanográfico (ver más adelante), la escala de Rossby es de 45 km mar afuera. Es decir, el agua fría que aflora en la costa de Chiloé durante condiciones de surgencia podría venir de una distancia máxima de 45 km. Dado que el vertimiento ocurrió a más de 130 km de la costa, es incorrecto argumentar que la surgencia transportó agua profunda con restos del vertimiento de vuelta a la costa de Chiloé. Las mediciones de nutrientes realizadas durante el crucero oceanográfico del Cabo de Hornos así lo indican.

4. Crucero oceanográfico en el AGS-61 Cabo de Hornos

El crucero oceanográfico de Marea Roja a bordo del buque Cabo de Hornos zarpó desde Talcahuano el 25 de mayo de 2016 y recaló en Puerto Montt el día 31 del mismo mes. Durante este crucero se tomaron muestras de agua a distintas profundidades (máxima a 2000 m), muestras de sedimentos y se recolectaron muestras biológicas (especímenes) mediante buceo autónomo. En el crucero participaron 14 científicos y 3 observadores (representantes de la comunidad de Chiloé). Los sitios de muestreo se muestran en la **Figura 26** con puntos rojos. La localización de estos sitios de observación apuntó a (1) detectar la presencia de *Alexandrium catenella* y otras especies tóxicas tanto alrededor de la isla de Chiloé como en localidades más al norte, donde al momento de zarpar ya existía antecedentes de FAN, y (2) caracterizar la variabilidad espacial de condiciones físico-químicas y biológicas tanto a lo largo de la costa expuesta y Mar Interior de Chiloé, como en el sentido perpendicular frente al extremo norte de Chiloé y hasta el punto de vertimiento de salmones, a 75 millas náuticas del Faro Corona.

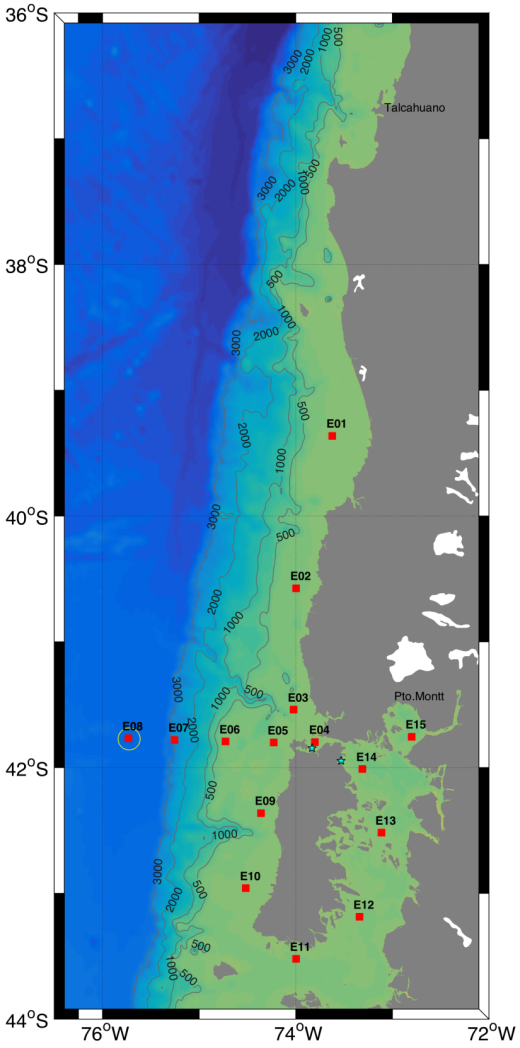


Figura 26. Mapa con la distribución geográfica de las 15 estaciones de muestreo (puntos rojos) visitadas durante el crucero oceanográfico a bordo del Cabo de Hornos, en mayo 2016. La estación más oceánica frente al extremo norte de Chiloé (E08) corresponde a la zona de vertimiento de salmones, a 75 millas náuticas de la costa.

La información obtenida durante el crucero Marea Roja a bordo del buque AGS-61 Cabo de Hornos (Armada de Chile), entre el 26 y 31 de mayo de 2016, se dividió en tres transectas de acuerdo a criterios oceanográficos, esto es:

- T1. Transecta a lo largo de la costa en sentido norte-sur, entre Valdivia y el extremo sur de Chiloé, que considera las estaciones 1-2-3-9-10 y cuyo recorrido se completó entre el 26y 29 de mayo
- T2. Transecta perpendicular a la costa, entre el extremo noroeste de la isla de Chiloé y el sitio de vertimiento, que incluye las estaciones 4-5-6-7-8 y fue completado entre el 27 y 28 de mayo.
- T3. Transecta a lo largo del Mar Interior de Chiloé en sentido sur-norte, desde la boca del Guafo al Seno de Reloncaví, incluye las estaciones: 11-12-13-14-15 y se completó entre el 29 y 30 de mayo.

4.1. Masas de agua presentes en la cuenca del Pacífico sur-oriental

La identificación de masas de agua se efectuó mediante diagramas T-S, utilizando para este efecto valores característicos de los tipos de agua originales (**Tabla 1**) y pares de temperatura/salinidad similares a los usados para aguas del Pacifico sur-oriental (Silva & Konow, 1975, Carrasco et al., 2016).

Tabla 1.Tipos de agua y valores de variables conservativas y semi-conservativas característicos en la cuenca del Pacífico Sur-Oriental.

Tipo de agua	AST	ASAA	AESS	AIAA	APP
Temperatura Potencial (°C)	24	13	10	3	1,7
Salinidad (psu)	35,5	34,1	34,8	34,0	34,7
Oxígeno (µmol L^{-1})	225	240	7	330	150
Fosfato (µmol L^{-1})	0,7	0,6	2,8	1,5	2,4
Nitrato (µmol L^{-1})	8	9	35	20	36
Silicato (µmol L^{-1})	1	1	35	10	120

AST: Agua SubTropical, ASAA: Agua SubAntártica, AESS: Agua Ecuatorial SubSuperficial, AIAA: Agua Intermedia Antártica y APP: Agua Profunda del Pacífico.

Tres masas de agua han sido detectadas en aguas oceánicas adyacentes a la isla de Chiloe (Sievers y Silva, 2008). En las dos primeras transectas (**Figura 27a y 27b**) se detecta básicamente el Agua Subantártica (ASAA) en la capa superficial (0-150 m), comprendida entre las líneas de densidad (σ_θ) entre ~ 25,5 y 26,25 kg m^{-3}. El ASAA es frecuentemente reconocida por un mínimo de salinidad y bajas temperaturas. Por debajo de esta masa de agua (profundidad >150 y < 300 m) se observa un remanente o el límite más austral del Agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS), cuyo límite más austral ha sido reconocido a los 45°S (Huyer et al., 1991), con σ_θ entre 26,25 y 27 kg m^{-3}, con salinidad y nutrientes relativamente altos y una mínima de oxígeno respecto a las masas de agua supra y subyacentes. Por último, a profundidades mayores que 300 metros se observa el Agua Intermedia Antártica (AIAA).

Las dos primeras de estas masas de agua penetran al mar interior del Chiloé (**Figura 27c**), pero las AESS tiene un penetración limitada, dadas las características batimétricas del área. De hecho se observa una influencia por debajo de los 200 m, con concentraciones de oxígeno por sobre 70 µmol L^{-1}. Superficialmente, el ASAA se mezcla con agua dulce en diferentes proporciones de acuerdo con las contribuciones de los ríos, glaciares, la escorrentía costera y la pluviosidad. El agua resultante de este proceso se conoce como agua SubAntártica Modificada (MSAAW), con σ_θ menores que 25 kg m^{-3} y con salinidades entre 31 y 33, con características muy diferentes a las del océano abierto. Los niveles de nutrientes y oxígeno observados en el océano adyacente a la isla de Chiloé son los esperados para la zona (Carrasco et al., 2016).

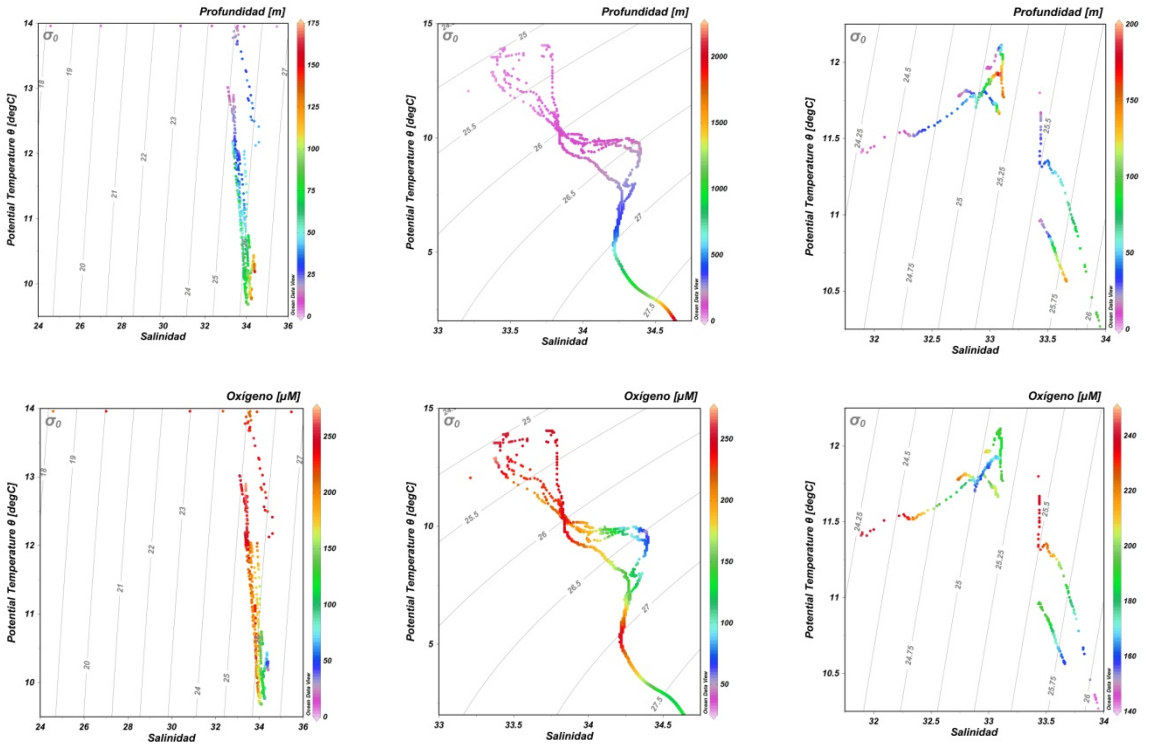


Figura 27. Diagramas T-S obtenidos para cada transecta: T1 (columna izquierda), T2 (columna central) y T3 columna derecha, ilustrando en las barras la profundidad y los niveles de nutrientes

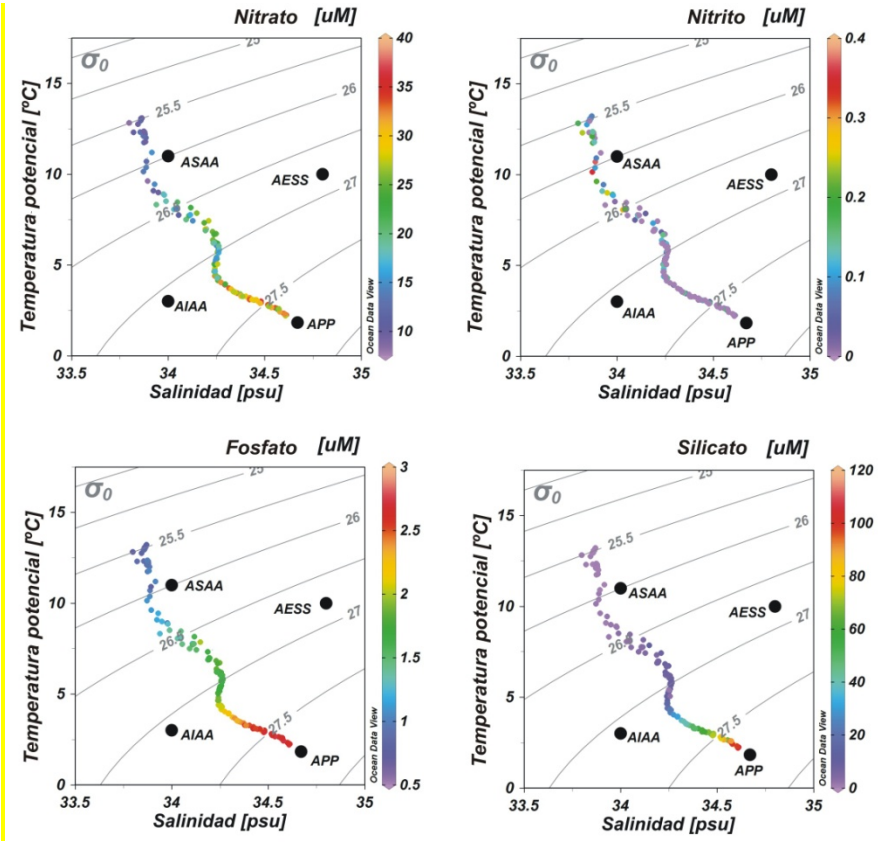


Figura 28. Diagramas T-S de datos obtenidos en la zona oceánica, donde se muestra la presencia de tipos y masas de agua en el Pacífico Sur-Oriental y los niveles de nutrientes (nitrato, nitrito, fosfato y silicato) característicos de cada masa de agua.

La estructura de la columna de agua durante el otoño de 2016 (bajo condición El Niño) no parece ser diferente a lo registrado históricamente. En la **Figura 28** se muestra el diagrama T-S construido sobre la base de datos del crucero Sonne 1995. De la comparación entre las **Figuras 27** y **28** no se observan cambios en la estructura y geometría de las masas de agua, ni tampoco se ha reportado una intensificación en la corriente de origen ecuatorial (contracorriente de Chile-Perú) que pudiera haber advectado agua con distintas concentraciones de oxígeno y nutrientes. El impacto de eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) en las propiedades del agua y la distribución de la masa sólo ha sido reportado en la parte superior de la columna de agua (hasta 200 m de profundidad) y en la zona norte del Pacífico Sur-Oriental, desde la costa de Ecuador a los 10°S (Lanillo et al., 2013). Al respecto ENOS promueve el movimiento vertical de la zona de oxígeno mínimo (ZMO) asociado a AESS (superficialización o profundización en fase fría y cálida del ENOS, respectivamente). Además de un calentamiento superficial en términos de anomalía de temperatura (0,5 a 1 unidad) se ha observado en aguas oceánicas aledañas y en el mar interior de Chiloé, lo que puede deberse a advección de aguas más cálidas debido a El Niño o a la mayor radiación solar descrita para la región en el último verano.

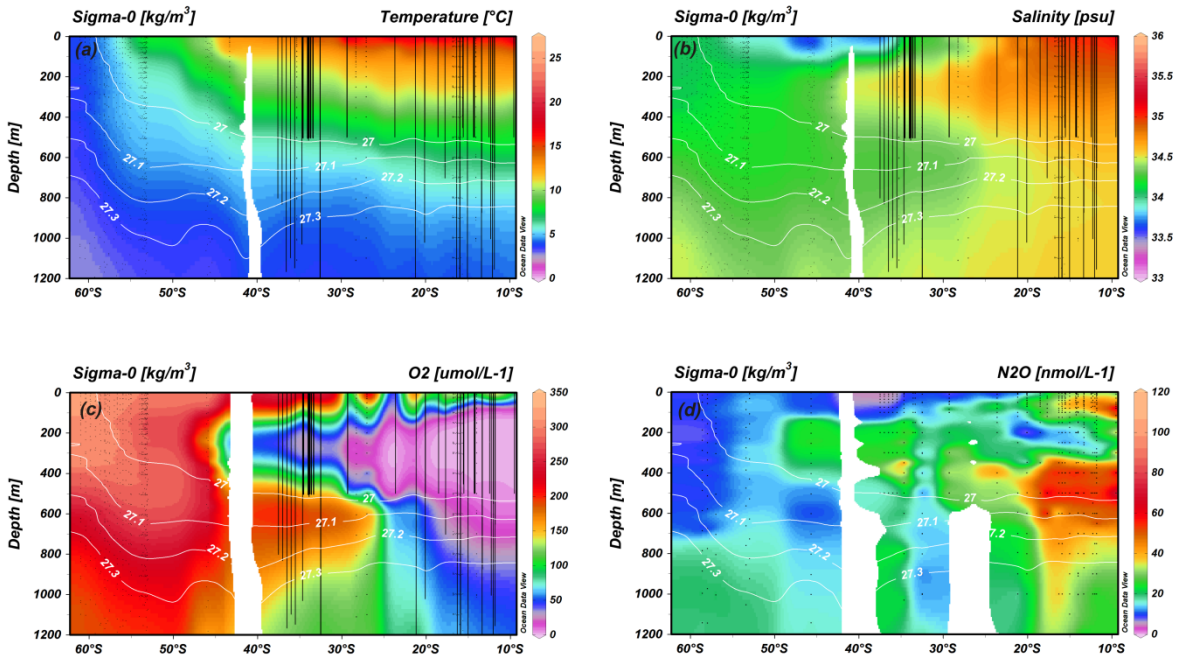


Figura 29. Distribución meridional de temperatura, salinidad, oxígeno y óxido nitroso a largo de la costa oeste de Sudamérica, desde los 10° a los 60°S. Se distingue, entre las latitudes 40°-50°S, la disminución de la salinidad superficial y el límite más meridional de la ZMO, ya a esta latitud con niveles de oxígeno mayores a 80 µM. El óxido nitroso, gas invernadero sensible a las concentración de oxígeno, corrobora tal distribución.

4.2. Distribución de variables físico-químicas por transecta

La estadística básica de variables oceanográficas se muestra en la **Tabla 1**. Para dicho análisis, la columna de agua fue dividida en capas sobre la base de los diagramas T-S, esto es: capa superficial entre 0-150 metros que corresponde a la ASSA, dicha capa se dividió en tres capas; capa de 0-30 m(fótica) capa de 30-150 m y capa de 150 -300 m (con lapresencia de AESS).

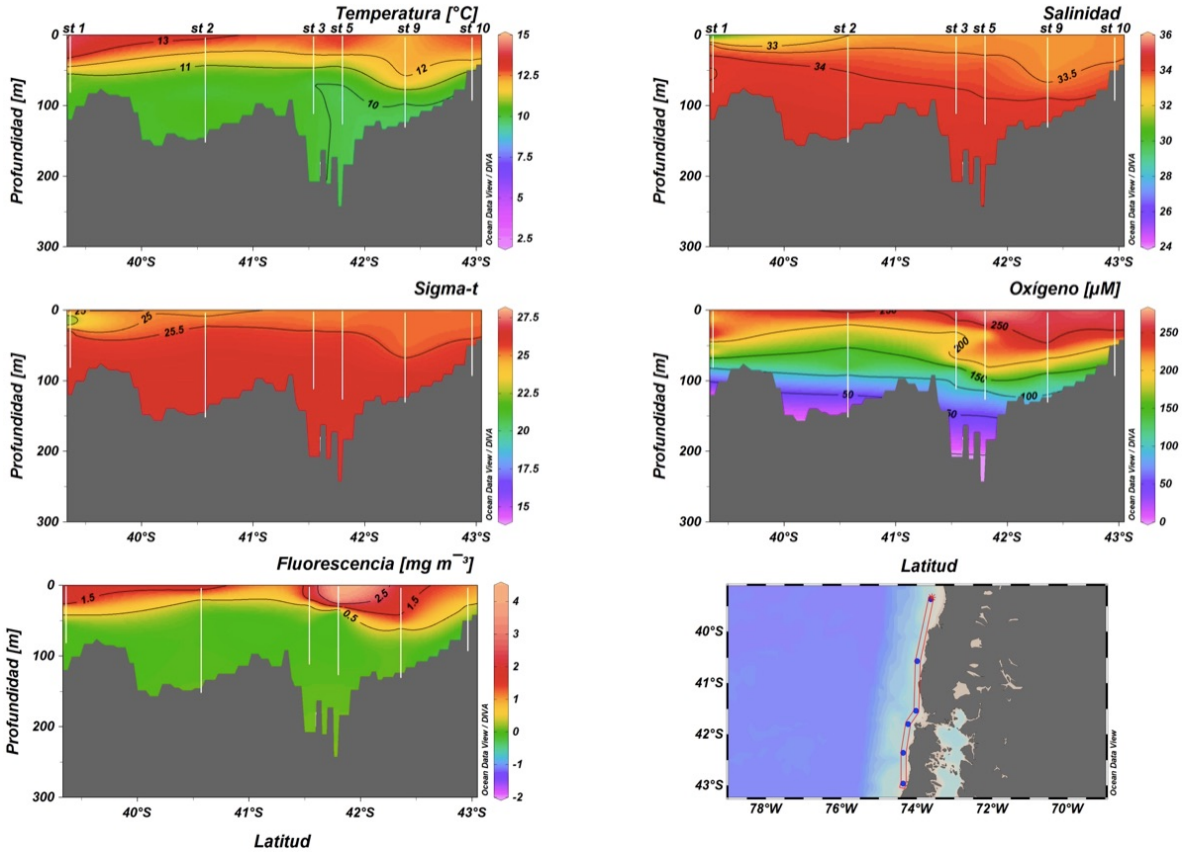


Figura 30. Distribución de variables oceanográficas a lo largo de la **transecta 1**, incluyendo: Temperatura, Salinidad, Sigma-t, Oxígeno y Fluorescencia. El panel inferior izquierdo indica la ubicación geográfica de la transecta 1.

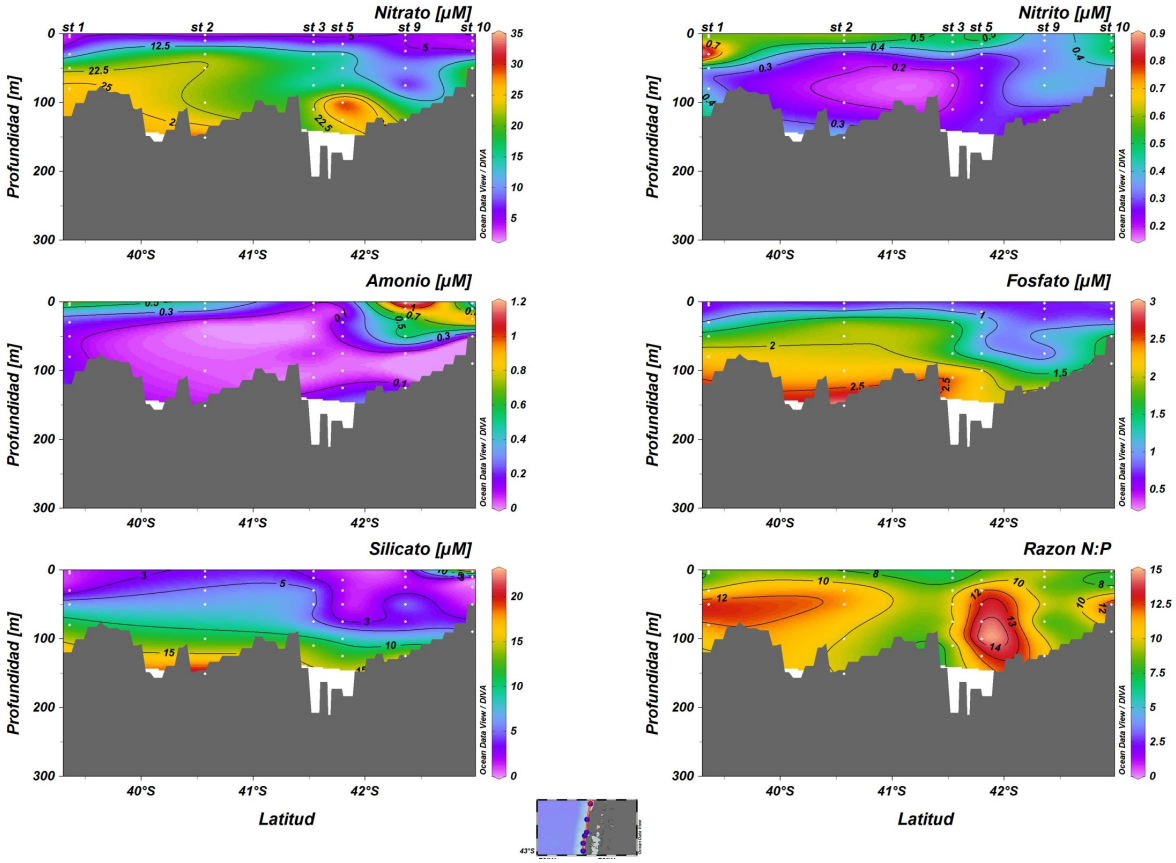


Figura 31. Distribución de variables químicas a lo largo de la **transecta 1**, incluyendo: Nitrato, Nitrito, Amonio, Fosfato, Silicato y la Razón N:P. El pequeño panel central indica la ubicación geográfica de la transecta 1

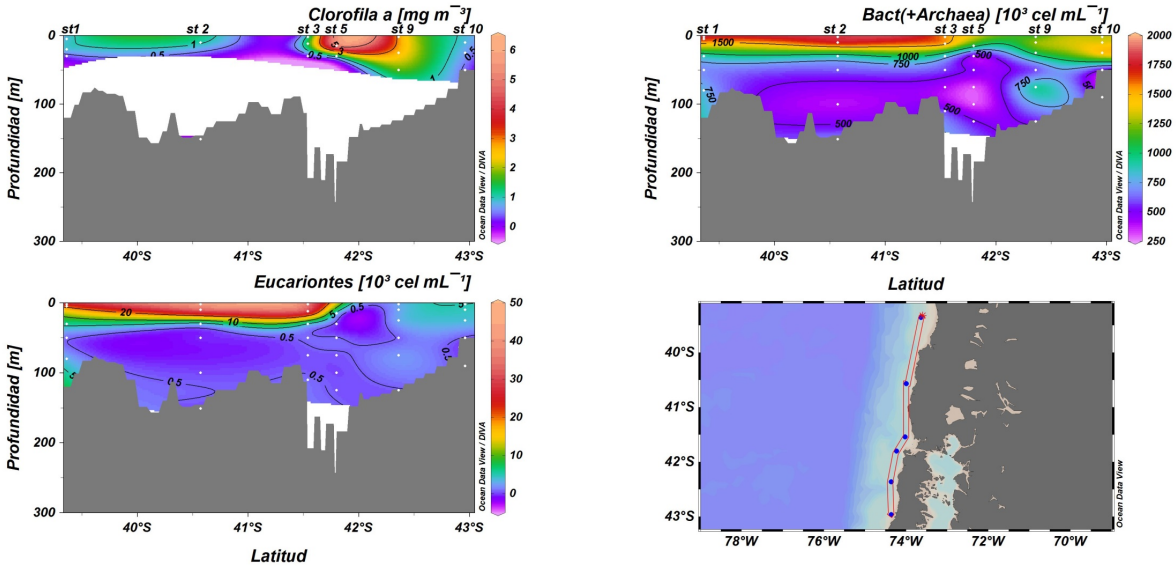


Figura 32. Distribución de clorofila-a y de la abundancia de bacterias (+ Archaea) y Eucariontes a lo largo de la **transecta 1**. El panel inferior izquierdo indica la ubicación de la transecta 1.

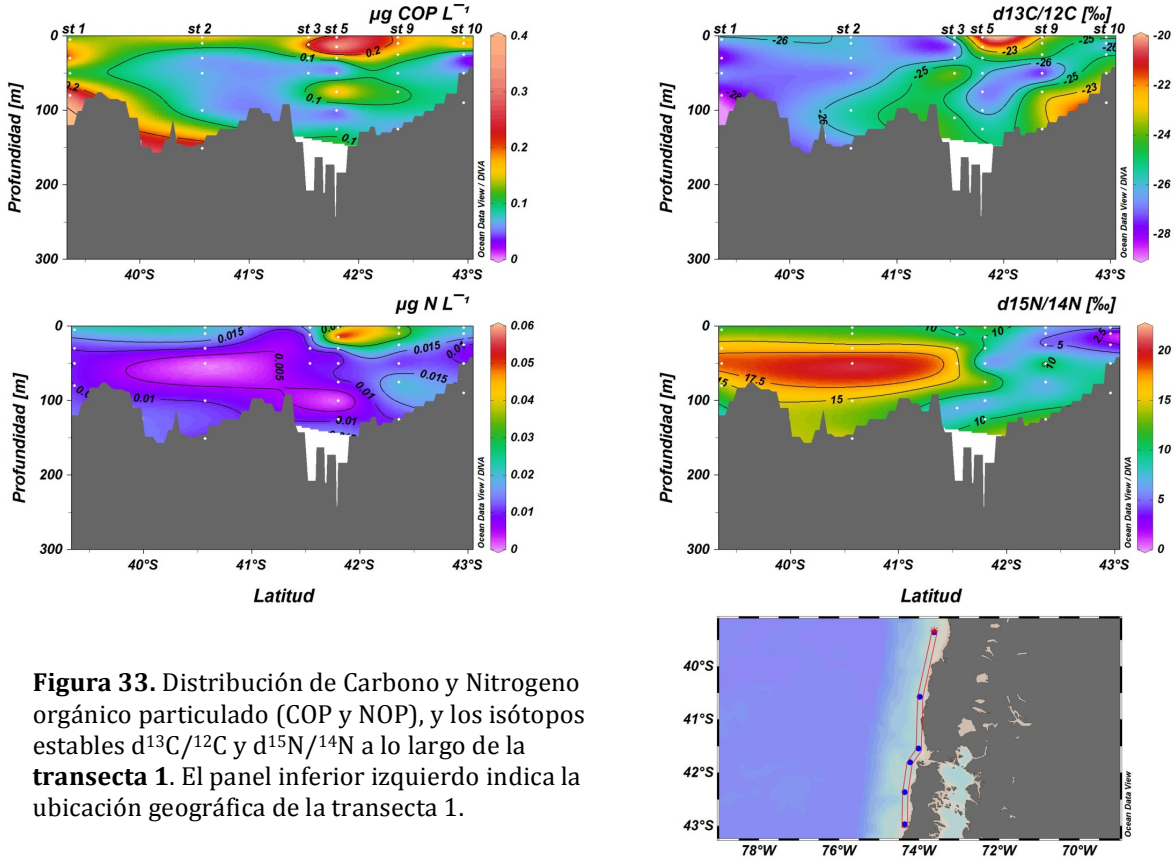


Figura 33. Distribución de Carbono y Nitrogeno orgánico particulado (COP y NOP), y los isótopos estables $d^{13}C/^{12}C$ y $d^{15}N/^{14}N$ a lo largo de la **transecta 1**. El panel inferior izquierdo indica la ubicación geográfica de la transecta 1.

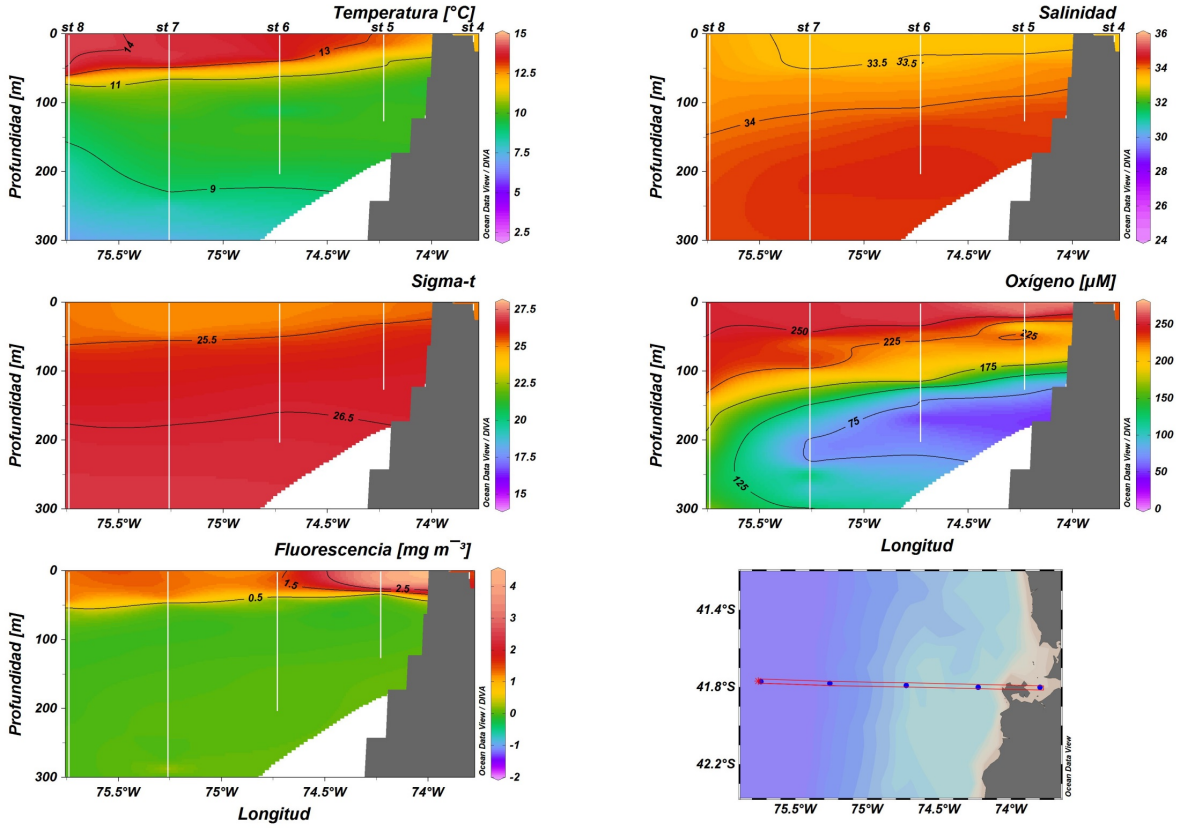


Figura 34. Distribución de variables oceanográficas a lo largo de la **transecta 2**, incluyendo: Temperatura, Salinidad, Sigma-t, Oxígeno y Fluorescencia. El panel inferior izquierdo indica la ubicación geográfica de la transecta 2.

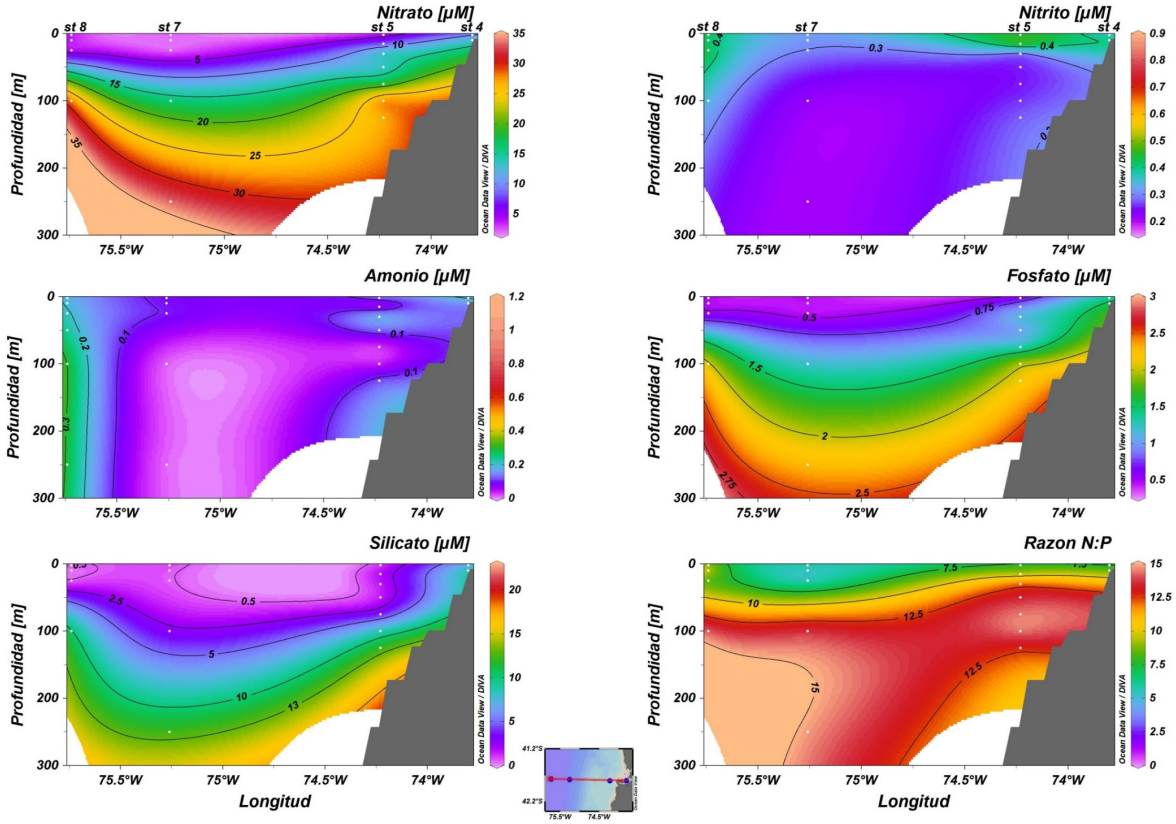


Figura 35. Distribución de variables químicas a lo largo de la **transecta 2**, incluyendo: Nitrato, Nitrito, Amonio, Fosfato, Silicato y la Razón N:P. El pequeño panel central indica la ubicación geográfica de la transecta 2.

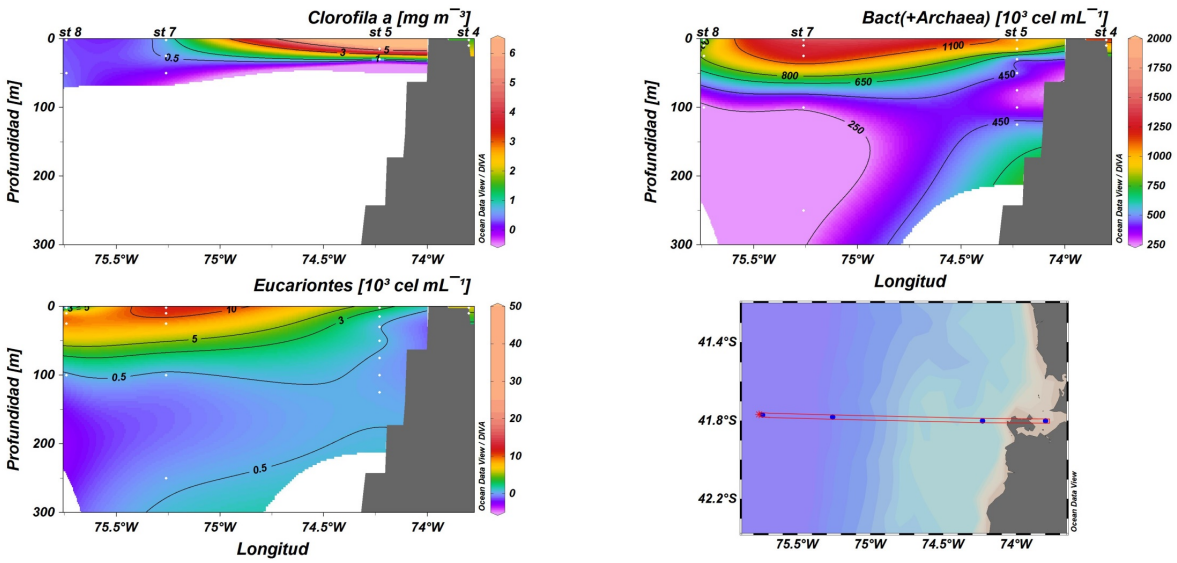


Figura 36. Distribución de clorofila-a y de la abundancia de bacterias (+ Archaea) y Eucariontes a lo largo de la **transecta 2**. El panel inferior izquierdo indica la ubicación de la transecta 2.

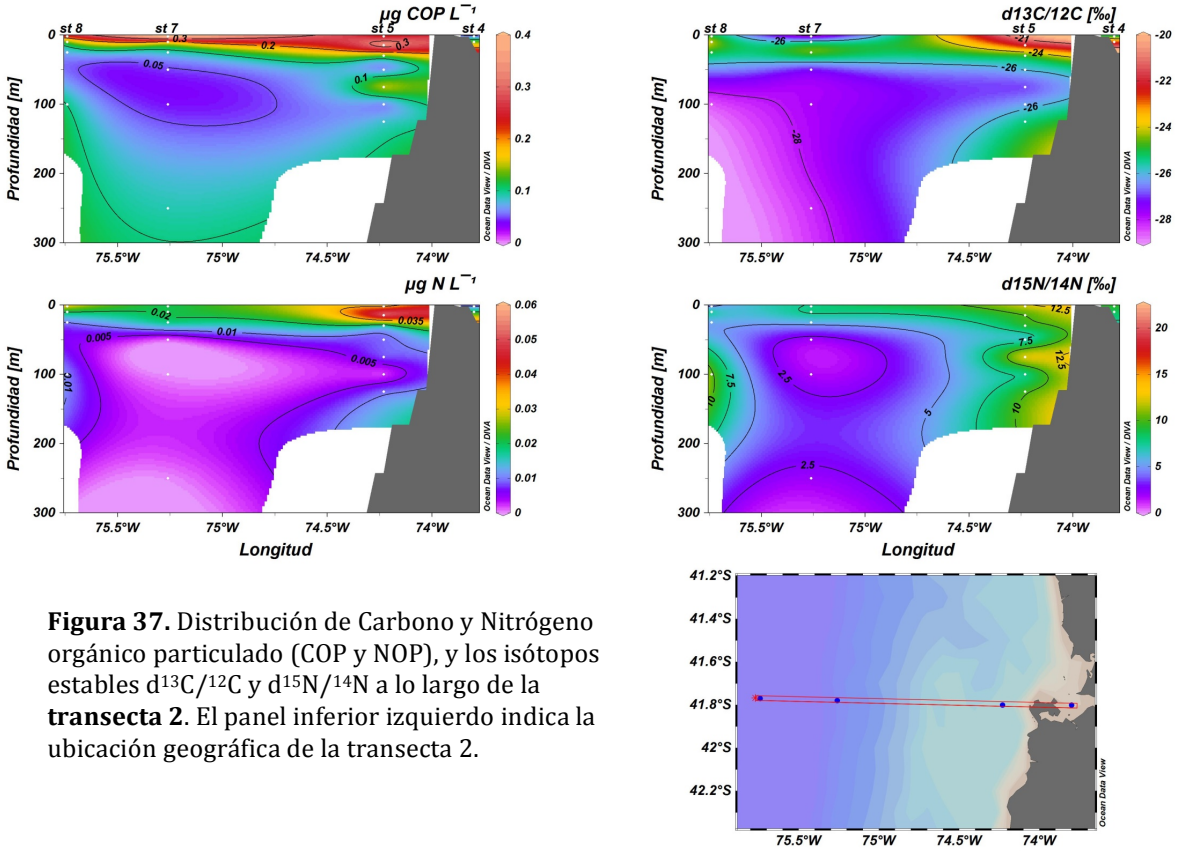


Figura 37. Distribución de Carbono y Nitrógeno orgánico particulado (COP y NOP), y los isótopos estables $d^{13}C/^{12}C$ y $d^{15}N/^{14}N$ a lo largo de la **transecta 2**. El panel inferior izquierdo indica la ubicación geográfica de la transecta 2.

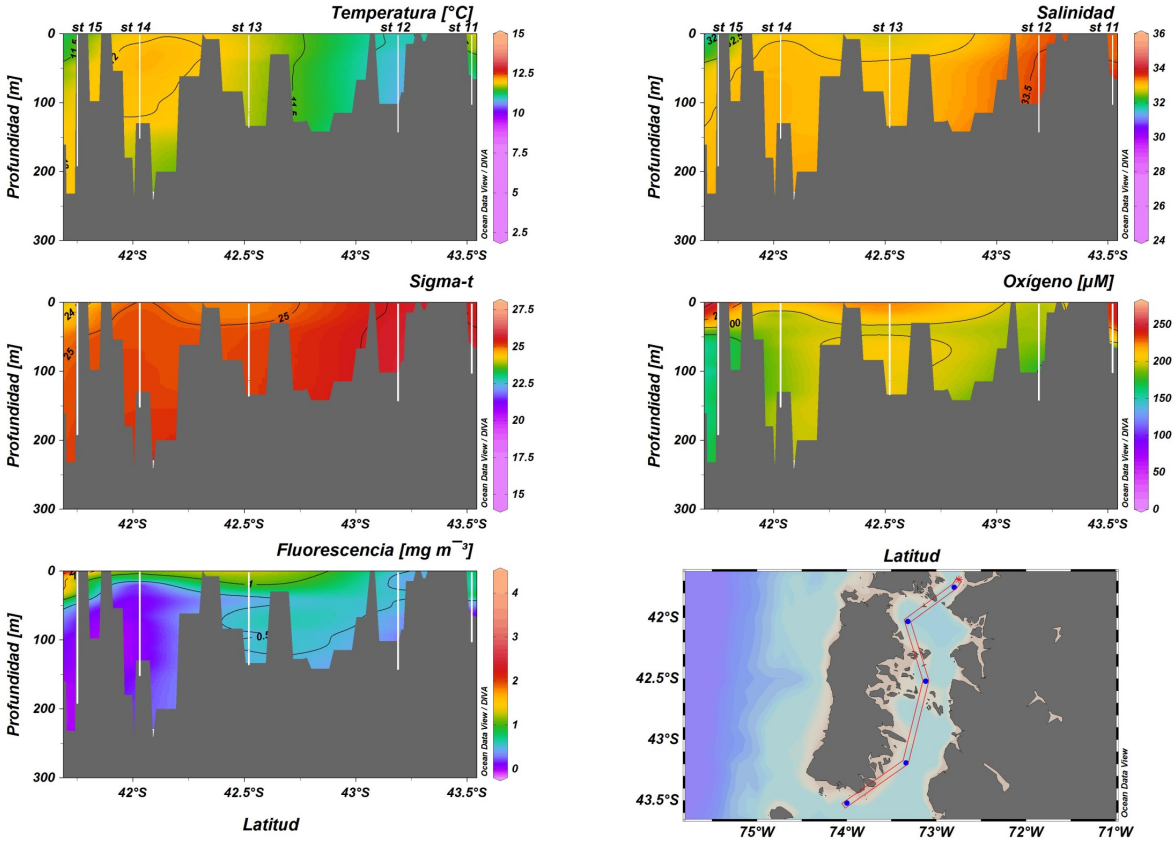


Figura 38. Distribución de variables oceanográficas a lo largo de la **transecta 3**, incluyendo: Temperatura, Salinidad, Sigma-t, Oxígeno y Fluorescencia. El panel inferior izquierdo indica la ubicación geográfica de la transecta 3.

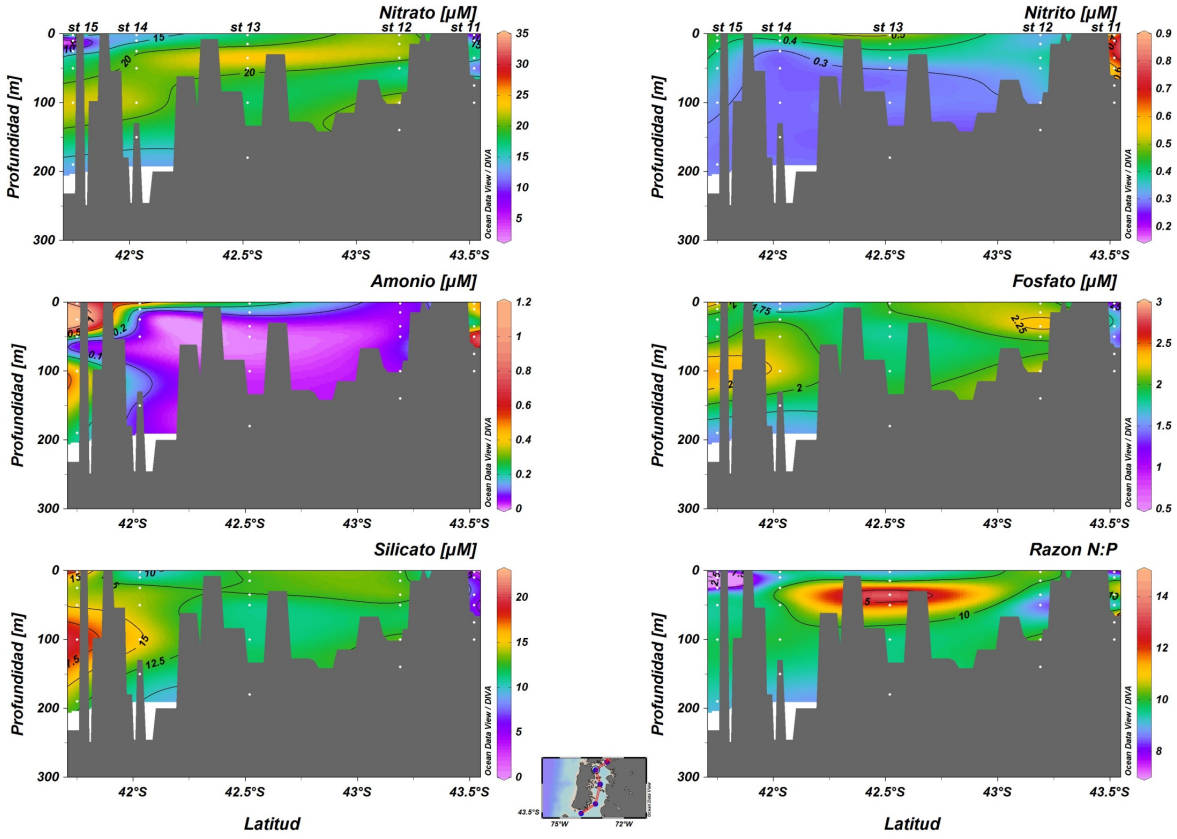


Figura 39. Distribución de variables químicas a lo largo de la **transecta 3**, incluyendo: Nitrato, Nitrito, Amonio, Fosfato, Silicato y la Razón N:P. El pequeño panel central indica la ubicación geográfica de la transecta 3.

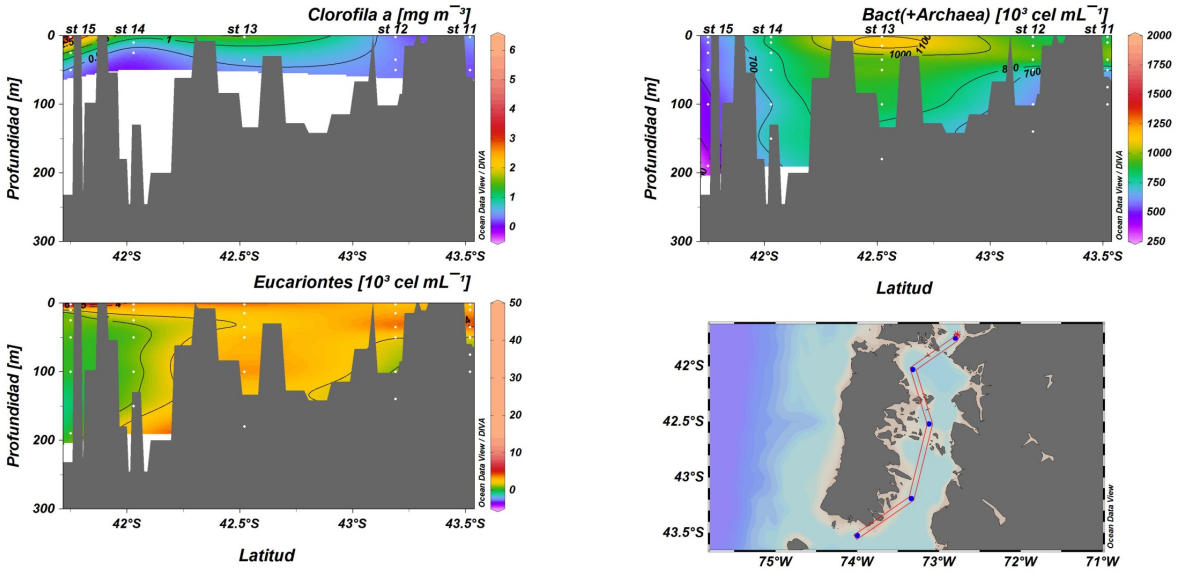


Figura 40. Distribución de clorofila-a y de la abundancia de bacterias (+ Archaea) y Eucariontes a lo largo de la **transecta 3**. El panel inferior izquierdo indica la ubicación de la transecta 3.

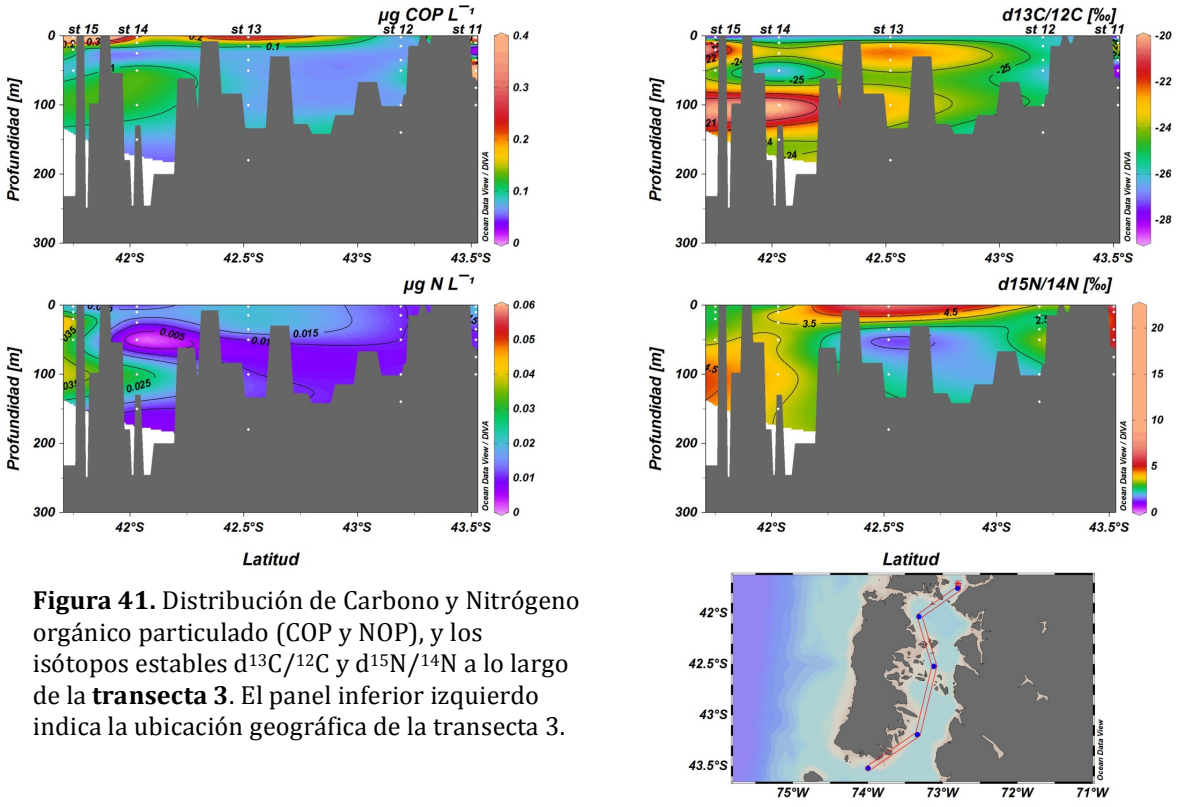


Figura 41. Distribución de Carbono y Nitrógeno orgánico particulado (COP y NOP), y los isótopos estables $d^{13}C/^{12}C$ y $d^{15}N/^{14}N$ a lo largo de la **transecta 3**. El panel inferior izquierdo indica la ubicación geográfica de la transecta 3.

4.3. Distribución de oxígeno por transecta

El oxígeno es una variable clave para la distribución de organismos superiores (peces, crustáceos), por cuanto su fisiología requiere de oxígeno para sus funciones metabólicas (respiración aeróbica). La concentración de este gas en el agua de mar depende de su solubilidad, que a su vez es función de la temperatura y la salinidad, y del proceso de intercambio con la atmósfera, además de procesos biológicos de consumo o producción de oxígeno. Por debajo de la capa que está en contacto con la atmósfera, el oxígeno puede ser considerado como una variable semi-conservativa y refleja los niveles de oxígeno preformado en la masa de agua y el consumo de éste por respiración aeróbica.

La distribución de oxígeno en las transectas estudiadas se corresponde con la distribución de masas de agua descritas (**Figuras 30, 34** y **38**). Todas las masas de agua se encuentran bien oxigenadas incluso el AESS, que ocupa la capa entre 150-300 m. Cabe destacar que el AESS, de origen ecuatorial, se caracteriza por presentar un mínimo de oxígeno muy pronunciado en el norte de Chile, llegando a niveles anóxicos (ausencia de oxígeno, ver Canfield et al., 2010). Sin embargo, a medida que ésta avanza latitudinalmente a través de la corriente sub-superficial de Perú-Chile, se va oxigenando debido a la mezcla con aguas supra y subyacentes (Carrasco et al., 2016). A la latitud de los 42°S, frente a Chiloé, la concentración de oxígeno presente fue mayor que 70 µM, equivalente a 1,5 mL L^{-1}, a los 150 m. Por lo tanto, se descarta que haya existido una advección de aguas superficiales pobres en oxígeno hacia el Mar Interior de Chiloé, que pudiera haber causado la mortandad de peces u otra fauna allí presente. La Transecta 2 presentó los mayores niveles de oxígeno (201±47 µM), respecto a las transectas 1 y 3, con valores de 158±58 y 188±20 µM, respectivamente. La menor concentración de

oxígeno se observó en la T1 con un valor de 17 µM, en una estación cercana la desembocadura del río Valdivia.

4.4. Distribución de nutrientes por transecta

La variación de nutrientes nitrogenados (nitrato, nitrito y amonio) y fosfatos por transecta se observan en las **Figuras 31, 35** y **39**. En general, el nitrato representa más del 98% de los nutrientes nitrogenados, mientras que el amonio y el nitrito permanecen bajo un 1%. La capa superficial muestra una concentración relativamente baja de nitrato, fosfato y silicato, probablemente debido al consumo de nutrientes por el fitoplancton (fotosíntesis), pero éstos nunca estuvieron agotados en su totalidad (e.g. la mínima concentración de nitrato fue > 4 µM). Por otro lado, en la transecta a lo largo de la costa (desde Valdivia al sur de la Isla de Chiloé), el amonio muestra una acumulación en aguas superficiales en las desembocaduras de ríos (Est. 1 y 2). Sin embargo, dicha situación es claramente diferente a lo observado en la estación de la zona central de la isla de Chiloé, frente a la costa de Abtao (Est. 9), donde se observó un aumento de este nutriente a niveles ~1,2 µM en superficie. Dicha situación podría ser explicada por algún aporte continental no identificado o ingreso y descomposición de material proteico (ver abajo). En estas estaciones también se observó un aumento de clorofila y de carbono (COP) y nitrógeno orgánico particulado (NOP) (**Figuras 32** y **33**). Esto sugiere un aumento local de la productividad primaria, sustentado por un incremento local en la concentración de amonio cuyo origen no tiene una clara explicación. Dos hipótesis para explicar el origen de los altos niveles de amonio detectados en esta localidad costera a fines de mayo son (1) la mortandad y descomposición de fauna marina en las cercanías de la estación de muestreo, y (2) la descarga no supervisada de materia orgánica.

Las concentraciones de nutrientes medidas en el transecto perpendicular a la costa, desde la boca del Canal de Chacao (Est. 4) hasta el área de vertimiento de salmones (Est. 8) se muestran en la **Figura 35**. En general, en este transecto se observaron bajas concentraciones de nutrientes en aguas superficiales, donde el principal nutriente es el nitrato y el amonio está en concentraciones sub-micromolares, con un aumento en las concentraciones hacia aguas más profundas. Esta es la estructura típica de aguas oceánicas. No obstante, en el punto más oceánico del transecto, correspondiente al punto de vertimiento de salmones, se observó un aumento localizado de amonio, alcanzando concentraciones > 0,3 µM por debajo de los 100 m de profundidad. Dado el patrón espacial encontrado, con estaciones más costeras sin acumulación de amonio, se concluye que esta alta concentración es una señal del efecto del vertimiento de salmones realizado en la segunda quincena de marzo del 2016, toda vez que la presencia de amonio en aguas oceánicas no puede ser explicada sin existir la descomposición y respiración de materia orgánica (proteínas) que ha sedimentado.

Las concentraciones de nutrientes medidas en el mar interior de Chiloé fueron claramente más altas que las encontradas en mar abierto (**Figura 39**), pero no se encontraron valores por encima de los normalmente reportados en la literatura científica para esta zona. El amonio registró valores superficiales altos dentro del Seno de Reloncaví (**Figura 39**). También se observa cierta acumulación clorofila-a, COP y NOP (**Figura 40** y **41**), pero en menor grado que el observado en la Transecta 1 frente a la costa de Abtao.

Las capas subsuperficial (30-150 m) e intermedia (150 - 300 m) de profundidad muestran un aumento gradual de los nutrientes acorde con los nutrientes reformados en cada masa de agua y procesos de mineralización de la materia orgánica. Se destaca la acumulación de

fosfato y silicatos en aguas intermedias del seno del Reloncaví, con lo cual se vislumbra el posible efecto de actividad antrópica asociada al desarrollo urbano de la ciudad de Puerto Montt y la actividad acuícola.

4.5. Distribución de Carbono y Nitrógeno orgánico y su composición isotópica

La composición del plancton marino y la razón relativa de Carbono, Nitrógeno y Fósforo elemental es fundamental para explicar la proporción de nutrientes disueltos en el agua de mar y el origen de la materia orgánica que está siendo degradada. La distribución de material particulado, incluyendo la clorofila medida en las transectas T1, T2 y T3 se observan en la **Figuras 33, 37** y **41** respectivamente. La materia orgánica de origen fito-planctónica marina tiene una proporción elemental, en términos de número de átomos (o moles), de C:N:P de 106:16:1, es decir una razón C:N y N:P de 6,6 y 16, respectivamente. Esta proporción es conocida como la relación de Redfield (Redfield, 1934). Esta composición difiere de la de otros grupos taxonómicos como de las macroalgas marinas, que son ricas en celulosa y por lo tanto tienen una razón C:N >10, o de músculo de peces, donde dominan las proteínas y la razón C:N es ~3,5. La **Tabla 2** ilustra la razón C:N y la composición isotópica del C y N en distintas matrices orgánicas, desde peces a macro-algas.

Tabla 2. Composición isotópica de C y N en distintas matrices orgánicas y su razón C:N

MATRIZ ORGÁNICA	$\delta^{13}C$ (‰)	$\delta^{15}N$ (‰)	razón C:N	Referencia
Plantas (Spartina)	-14,8	10,5	22,0	Cloern et al., 2002
Fitoplancton	−21,8 ± 1	2,5 ± 2,1	6,8 ± 0,5	Rau et al., 1991
copépodos	-23,7 ± 1,1	10,7 ± 1,0		Aita et al. 2011
Eufáusido	-20,4 ± 0,9	12,3 ± 1,7		
Seston	-24,1 ± 2,2	6,6 ± 2,0	8,1 ± 2,0	Cloern et al., 2002
Salmón cultivado	−19,2 ± 0,2	11,0 ± 0,2	4	Dempson and Power, 2004
Salmón silvestre	−20,5 ± 0,2	12,8 ± 0,4	4,6	Dempson and Power, 2004
Cetáceo	−12,0 ± 1,6	22,0 ± 2,0	1,7 ± 0,7	Rodríguez et al. 2010
Proteína de soya	-25,3 ± 0,2	1,0 ± 0,1	3,5	Gamboa-Delgado et al., 2011
Harina de pescado	-22,0 ± 0,3	10,3 ± 0,2	3,8	Gamboa-Delgado et al, 2011

La **Figura 33** muestra la distribución de COP y NOP, indicando valores máximos en estaciones cercanas a descargas de ríos (e.g. en la región de Los Ríos). Estas concentraciones se correlacionan significativamente con la biomasa fito-planctónica (clorofila), indicando que parte del material particulado es de origen fito-planctónico, y que éste a su vez parece estar siendo estimulado por concentraciones de nitrógeno amoniacal. Se destaca que las más alta concentración de material particulado orgánico (N y C) fue observada en la estación a la cuadra de Abtao (**Figura 33**), y una leve acumulación en el área de vertimiento (**Figura 37**) y en seno del Reloncaví (**Figura 41**).

Las proporciones de isótopos estables de carbono ($\delta^{13}C$) y nitrógeno ($\delta\ ^{15}N$) también son parámetros ampliamente utilizados en la ecología trófica, por cuanto revelan la fuente de C y N (Svensson et al., 2014) y permite inferir el traspaso de materia y energía en una red trófica marina (Boecklen et al., 2011; Fry, 2006). En general, la señal de $\delta^{13}C$ cambia poco durante la transferencia trófica (DeNiro y Epstein, 1978), por lo tanto los isótopos de carbono son

utilizados principalmente para distinguir señales de $\delta^{13}C$ sólo entre fuentes de productores primarios marinos y terrestres como plantas C3 y C4 (Boecklen et al., 2011); mientras que la señal de $\delta^{15}N$ cambia (se incrementa) en promedio de 3 ‰ por nivel trófico y es ampliamente utilizado para los estudios sobre las interacciones tróficas (DeNiro y Epstein, 1981; Minagawa y Wada, 1984). Coincidentes con las estaciones donde se muestra acumulación de amonio y material particulado, también se encontró que la composición isotópica en términos de C y N esta enriquecida respecto a la señal marina, indicando que el origen de ese material no es planctónicos, sino más bien de origen proteico dado los valores de referencia (ver **Tabla 2**).

4.6. Descomposición de proteínas de pescado

Las moléculas complejas como hidratos de carbono, lípidos y proteínas se despolimerizan en compuestos solubles por acción de enzimas hidrolíticas (celulasas, hemicelulasas, amilasas, lipasas y proteasas). Los compuestos hidrolizados son mineralizados (fermentados) en ácidos grasos volátiles (acetato, propionato, butirato y lactato) y nitrógeno amoniacal. La proporción en que este último se encuentra en el agua, i.e., forma ionizada como ión amonio o NH_4^+ o no ionizada como amoniaco o NH_3, depende del pH y temperatura del agua. La forma no ionizada o amoniaco (NH_3) es un gas extremadamente tóxica para los peces, pero al pH del agua de mar (~8) éste se encuentra principalmente en forma de amonio NH_4^+.

El amonio es un nutriente, y en el océano puede ser rápidamente asimilado por el fitoplancton, promoviendo su crecimiento, u oxidado por bacterias y arqueas amonio-oxidantes, proceso conocido como nitrificación, por cuanto conduce a la generación de nitrato. El amonio es el mayormente preferido por el fitoplancton, debido a que su estado de oxidación es igual al de un aminoácido (AA), por lo que el costo energético de su asimilación es menor que en el caso del nitrato. No obstante, el amonio raramente se acumula, y se encuentra en niveles traza (sub-micromolares) por debajo del 0,5% de todos los nutrientes nitrogenados en el océano.

A modo de ilustración, se realizó el cálculo de cuánto amonio produce la descomposición de 100 g de proteína de pescado por descomposición anaeróbica, de manera de estimar lo que implicó el vertimiento de ~ 5 mil toneladas en términos de acumulación de amonio en diferentes volúmenes de agua (dilución). Basados en cálculos estequiométricos, la descomposición anaeróbica de la concentración 100 g de proteínas representa 34 g de N-amonio. Por lo tanto, en 5 mil toneladas de salmón generarían 1.700.000 kilogramos de NH_4^+ o 121.500.000 moles de $N\text{-}NH_4^+$.

Si se supone que el vertimiento se diluyó inicialmente en una parcela de agua de 100 m de profundidad y un área de superficie 0,01 km^2, lo que se traduce en un volumen de 1 millón de metros cúbicos o 0,001 km^3, la concentración final de amonio en dicho volumen sería cercana a 0,12 M (molar). Esta es una concentración un millón de veces mayor que la que se puede encontrar normalmente en el océano costero. La concentración final de amonio, como es de esperar, disminuye proporcionalmente a medida que se aumenta el volumen de la parcela de agua considerada para su dilución (**Tabla 3**). Para alcanzar una concentración de amonio semejante a la detectada, el vertimiento tuvo que diluirse o dispersarse en un volumen equivalente a 1.000 km^3, que resultaría de una superficie de 2.000 km^2 (100 km a lo largo de la costa x 20 km en sentido perpendicular a la costa) y 500 m de profundidad. Dado el perfil de amonio obtenido en el punto de vertimiento (**Figura 35**), con concentraciones altas de amonio al menos hasta los 300 m de profundidad, se consideró adecuado suponer una profundidad de dilución de 500 m.

Tabla 3. Estimación de amonio producido por vertimiento de salmones y concentración de amonio resultante en volúmenes crecientes de agua de mar.

Concentración final de amonio [uM]	Área [km²]	Volumen [m³]	Volumen [km³]
121500	0,01	10^6	0,001
1215	1	10^8	0,1
12,1	100	10^{10}	10
0,12	10000	10^{12}	1000

Por lo tanto, al momento del vertimiento se generó una alta concentración de N amoniacal, pudiendo afectar la micro-biota existente. La acumulación de amonio resultante fue diluída y dispersada por efectos físicos, al mismo tiempo que fue consumido y oxidado por acción microbiológica. Cabe destacar que, en el lugar del vertimiento, la concentraciones de amonio a nivel sub-micromolar (~0,3 µM) aún persistían después de casi dos meses de acontecido el vertimiento de salmones. Una respuesta más precisa para este problema requiere aplicar un modelo de degradación acoplado a un modelo hidrodinámico, para entender el efecto de este vertimiento en el tiempo y espacio. La **Figura 42** ilustra la eventual dimensión espacial del efecto del vertimiento en términos de nitrógeno amoniacal y su concentración final en volúmenes crecientes de agua de mar.

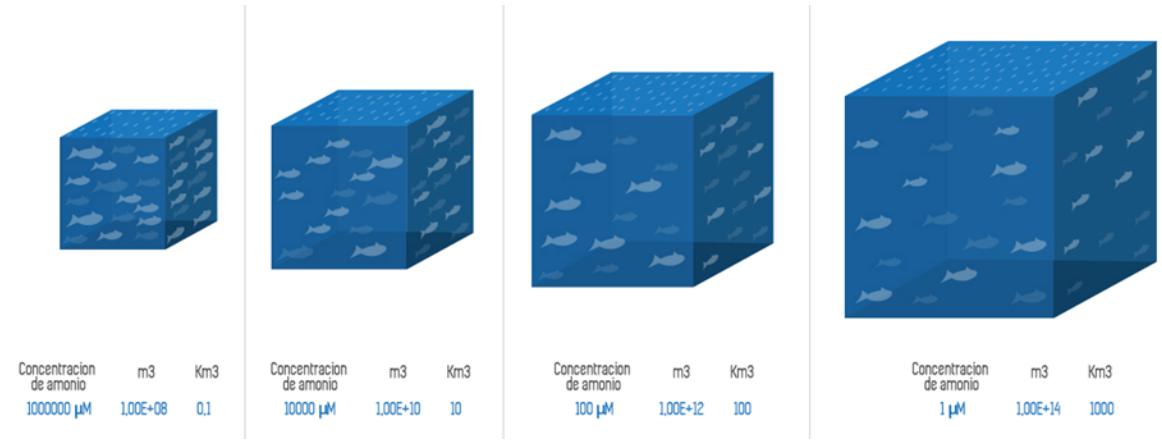


Figura 42. Estimación de la eventual dimensión espacial del efecto del vertimiento en términos de nitrógeno amoniacal y su concentración final en volúmenes crecientes de agua de mar.

4.7. Muestreo de fitoplancton y toxinas en el crucero del Cabo de Hornos

Las muestras de fitoplancton, colectadas en las diferentes estaciones a lo largo de las tres transectas seguidas por crucero, evidenciaron una casi total dominancia de diatomeas y usencia de microalgas tóxicas en el agua. En todas las estaciones evaluadas, de las tres transectas, la dominancia de las diatomeas fue del 99% (**Figura 43**). El 1% restante fue representado por silicoflagelados en el transecto latitudinal por la costa pacífica, mientras que fue representado por dinoflagelados en el transecto perpendicular a la costa de Chiloé y el del mar interior. La mayor abundancia fue observada en las estaciones 4, 5, ubicadas frente al canal de Chacao. También lo fue en la 9, cerca de la costa de Abtao, y las estaciones 12 y 15, que corresponde al sur de Chiloé o la Boca de Guafo y el Seno de Reloncaví respectivamente. Los géneros de diatomeas dominantes en estas estaciones fueron *Thalassiosira*, *Ditylum*, *Skeletonema* y *Navicula*. Especies del géneros *Pseudo-nitzchia*, como *P. australis* y *P. pseudodelicatissima* aparecieron como raras en las estaciones 4, 9, 14 y 5.

En cuanto a las toxinas, no se encontró la toxina paralizante del marisco (VPM) que produce el dinflagelado *Alexandrium catenella*. No obstante, en mayo durante el muestreo llevado a cabo en el Crucero del Cabo de Hornos se constató la presencia de diversas toxinas (**Figuras 44 y 45**) señalando lo complejo del fenómeno de marea roja observado durante este año. La evidencia de otras toxina en la columna de agua revela la presencia de otras especies de microalgas productoras de toxinas, que aunque en baja cantidad, aún permanecían en las aguas del sur de Chile. Se debe destacar que su presencia era más regular en la zona del mar interior de Chilóé, aunque también en algunos sitios del Pacífico (**Figuras 44 y 45**).

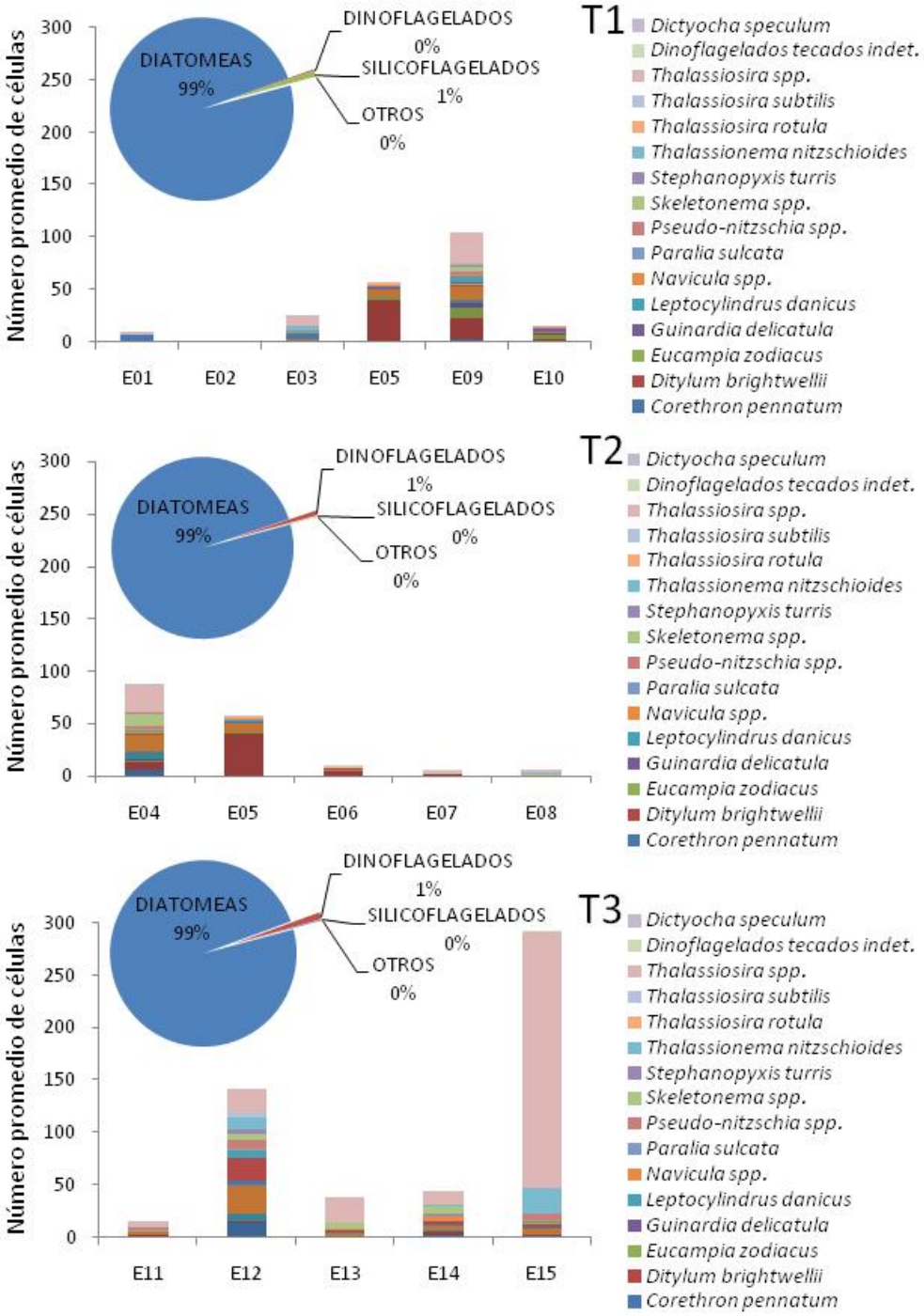


Figura 43. Porcentaje de participación de la muestra (en gráficos de torta) y abundancia relativa de direntes especies de diatomeas (barras), a lo largo de las tres transectas de crucero realizado por el Cabo de Hornos. La abundancia relativa corresponde al número de células promedio bajo un cubreobjeto de 18x18 mm en 3 alícuotas de 0,1 ml cada una.

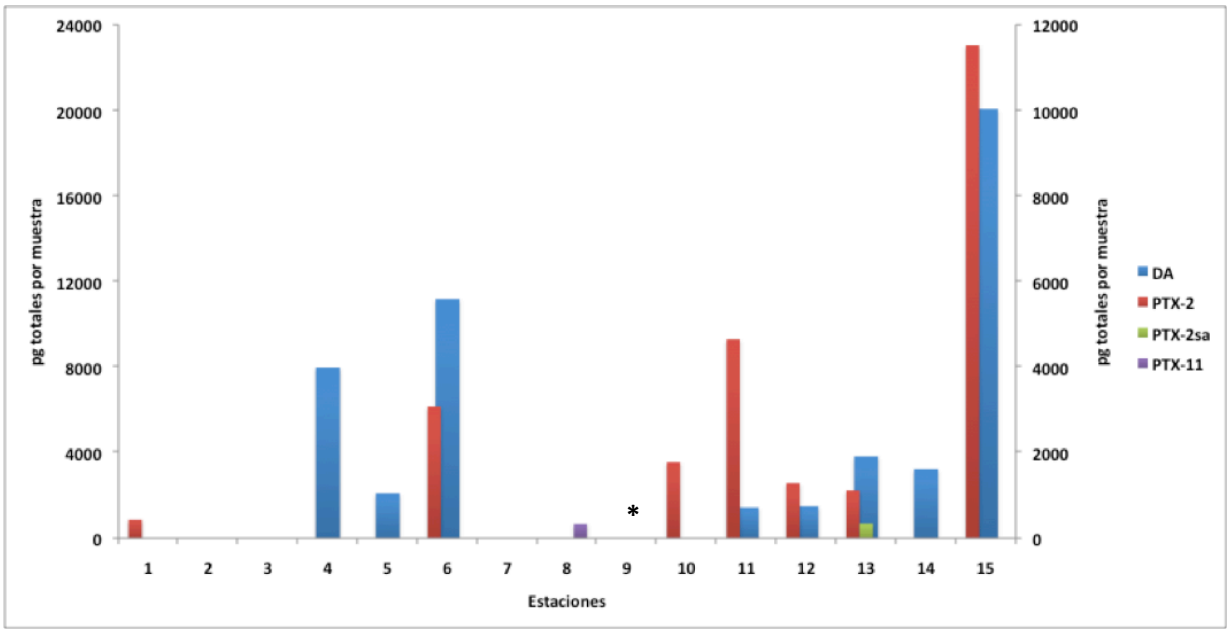


Figura 44. Niveles de las toxinas detectadas por LC-MS/MS en muestra de red (50 ml) obtenidas en las 15 estaciones. Los valores de Ácido Domoico (DA) están representados en el eje de la izquierda, en pg totales por muestra. Los valores de toxinas de Pectenotoxinas (PTX-2; PTX-2sa; PTX-11) se representan en el eje de la derecha, también en pg totales por muestra. El asterisco indica que en la estación 9 no se obtuvo muestra.

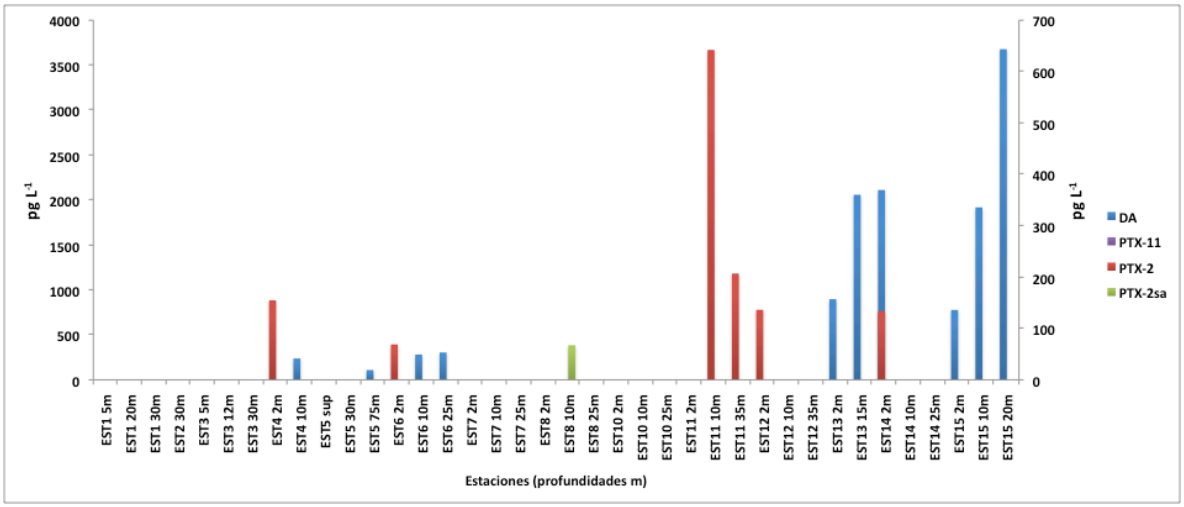


Figura 45. Niveles de las toxinas detectadas por LC-MS/MS en muestras de 5 litros de agua de mar, obtenida desde roseta entre 0 y 75 m. Se muestran los valores detectados en las 15 estaciones, a excepción de la estación 9, en donde no fue posible obtener muestras. Los valores de Ácido Domoico (DA) están representados en el eje de la izquierda, en pg L^{-1}. Los valores de toxinas de Pectenotoxinas (PTX-2; PTX-2sa; PTX-11) se representan en el eje de la derecha, también en pg L^{-1}.

5. Conclusiones

Los resultados presentados en este informe permiten señalar que:

En relación a las floraciones algales nocivas:

1. Las especies con mayor impacto socio-productivo en las regiones del sur de Chile fueron *Pseudochattonella verruculosa* y *Alexandrium catenella*. La presencia y efectos de ambas especies ya habían sido registradas en años anteriores. Sin embargo, las floraciones del último verano cubrieron un área geográfica más extensa y tuvieron un mayor impacto.

2. Durante el verano-otoño 2016 se constató además la floración de varias otras especies de microalgas nocivas o tóxicas, especialmente en las regiones de Aysén y Los Lagos.

3. Entre las especies más significativas, por su eventual efecto en la salud humana, se encuentran: *Pseudo-nitzschia* cf*. pseudodelicatissima* y *Pseudo-nitzschia* cf*. australis*, *Dinophysis acuminata*, *Dinophysis acuta* y *Protoceratium reticulatum*. Sin embargo, existen antecendentes que indican la presencia de varias otras especies nocivas que pueden afectar, por ejemplo, la actividad productiva.Todo esto refuerza la noción de que las floraciones de algas nocivas son un fenómeno altamente complejo tanto en su origen como en su dinámica espacial y temporal.

4. El complejo de floraciones ocurridas en el verano – otoño 2016 parecen haberse originado desde fines de primavera e inicios del verano de 2015, en diferentes sectores de las regiones de Aysén y Los Lagos, alcanzando su máxima expresión en verano y otoño del 2016.

En relación al escenario climático – oceanográfico

1. La zona costera de la región de Los Lagos estuvo sujeta a una serie de anomalías climáticas y oceanográficas durante el verano y otoño del 2016 que permiten explicar la proliferación de fitoplancton, incluyendo especies nocivas.

2. La costa oeste de la Isla de Chiloé presentó condiciones de surgencia durante el verano, aunque de menor intensidad que las típicamente observadas en Chile central, y con diferencias esperadas en términos del origen del agua aflorada (sub-antártico en el caso de Chiloé y ecuatorial en Chile central). La condición de viento favorable a la surgencia fue consistente con una disminución de la Temperatura Superficial del Mar, y con un posterior incremento en la concentración de pigmentos, indicativa de un aumento en la productividad primaria.

En relación al vertimiento de salmones

1. Las condiciones de viento observadas en marzo-abril 2016 y el patrón de circulación esperado a partir de éstas, consistente además con los patrones de Temperatura Superficial del Mar y corrientes geostróficas derivadas de mediciones satelitales para el mismo periodo, sugieren que el transporte de agua y material en suspensión durante y con posterioridad al vertimiento de salmones ocurrió mayoritariamente de este a oeste (hacia mar afuera) y de sur a norte, y no hacia la isla de Chiloé.

2. Considerando la cantidad de biomasa vertida en marzo 2016, los cálculos estequiométricos y estimaciones de la tasa de degradación de amonio a las temperaturas observadas, las concentraciones de amonio detectadas en aguas oceánicas durante el crucero oceanográfico del Cabo de Hornos en mayo 2016 efectivamente podrían ser un resabio del vertimiento. Las condiciones de viento predominantes en el periodo de vertimiento, y la circulación superficial generada por estas condiciones, contribuyeron a que los productos de degradación de la materia orgánica vertida (principalmente amonio) se dispersaran mayoritariamente en forma paralela a la costa.

En relación a los resultados del crucero oceanográfico

1. La columna de agua en el punto de vertimiento de salmones presentó altas concentraciones de amonio, que fueron más altas bajo los 100 m de profundidad. Junto con esto se observó una leve acumulación de Carbono y Nitrógeno Orgánico Particulado (COP y NOP), con señales isotópicas en C y N que son consistentes con las esperadas a partir de las dietas de los salmones y de su posterior descomposición en el océano, y que por lo tanto apuntan a un origen en el material vertido en marzo 2016.

2. Las aguas costeras de la zona central de Chiloé, frente a las costas de Abtao (estación 9), permanecían con altas concentraciones de amonio y alta biomasa fitoplanctónica, indicando un incremento local en la productividad primaria. Dicha situación podría ser explicada por algún aporte continental no identificado de materia orgánica, o ingreso y descomposición de material proteico.

3. El seno del Reloncaví es claramente un lugar de acumulación de amonio e intensa remineralización, con altos niveles de clorofila-a, COP y NOP. La boca del Guafo, en el extremo sur de la isla de Chiloé, también presentó concentraciones relativamente altas de amonio y nitrito.

4. Al momento del muestreo realizado durante el crucero oceanográfico del Cabo de Hornos no se encontraron células de microalgas tóxicas en la zona, pero si se detectó la presencia de varios tipos de toxinas, que podrían estar asociadas a diferentes especies estaban presente en el medio.

6. Recomendaciones

El grupo de expertos que componen esta comisión sugiere, en base a los resultados recopilados y analizados, que el Estado de Chile considere una aproximación más proactiva para lidiar con las floraciones algales nocivas y su impacto sobre la matriz productiva y patrimonio natural del país, así como con sus consecuentes efectos en la sociedad civil. Por una parte se constata una fortaleza a nivel país, dadas las capacidades de poder prevenir efectos sobre la vida de las personas a partir del monitoreo de abundancia de microalgas y concentraciones de toxinas. Esto se tradujo en la ausencia de víctimas fatales durante las floraciones del último verano-otoño. Por otro lado, sin embargo, no se logró anticipar y mitigar en forma efectiva los efectos económicos y sociales que dichas floraciones tuvieron en la región. Esta debilidad del sistema radica principalmente en que aún no se logra monitorear las condiciones ambientales a escalas adecuadas y con la continuidad necesaria, lo que obstaculiza los esfuerzos por dilucidar efectos causales y lograr alguna capacidad predictiva, que permita anticiparse a la ocurrencia de eventos FAN de gran magnitud y así mitigar de mejor forma sus impactos económicos y sociales. Por estas razones esta comisión sugiere lo siguiente:

1. Profundizar las capacidades y acciones de monitoreo de microalgas nocivas, tanto espacial como temporalmente, así como de análisis de las muestras y distribución de la información, para tener resultados en tiempos mucho más reducidos que permitan tomar con antelación medidas de mitigación. Esto requiere re-evaluar el volumen de recursos, tanto humanos como financieros, destinados a este esfuerzo, considerando la magnitud y complejidad del problema.

2. Evaluar la actual cobertura espacial y periodicidad del monitoreo de marea roja realizado por IFOP. Habiendo realizado este monitoreo durante varios años, un análisis de toda la información generada podría indicar que algunas estaciones de muestreo no aportan significativamente con información adicional (son redundantes), y que por otro lado hay puntos donde debiese aumentarse el esfuerzo de observación, como la costa exterior de la isla de Chiloé. Realizar un ejercicio de este tipo, similar a lo realizado en el Golfo de Maine (USA) tras 9 años de monitoreo de quistes en los sedimentos (Solow et al. 2014), podría ser beneficioso tanto para la calidad de la información recolectada como para el uso eficiente de los recursos.

3. Implementar el monitoreo de sedimentos para generar un registro sistemático y de acceso público de la abundancia de quistes en una serie de puntos de interés tanto en la región de Aysén y los Lagos como en la costa de regiones más al norte.

4. Instalar y mantener una red pública de monitoreo ambiental y climático en el sur de Chile, que permita generar series de observaciones sistemáticas y sostenidas en el tiempo. La información generada por esta red será clave tanto para el monitoreo de condiciones que propician la proliferación de algas tóxicas como para la validación de modelos de circulación.

5. En relación a la red de monitoreo sugerida en el punto anterior, y para asegurar su continuidad en un horizonte de años a décadas, se debe considerar el costo en el tiempo de la mantención, reparación y/o reposición del instrumental, así como de las calibraciones periódicas que aseguren la calidad de los datos generados. Además, se

requiere contar con personal altamente calificado que lleve a cabo la recopilación, control de calidad, distribución y respaldo de la información.

6. Instalar y mantener un sistema en línea y de acceso público que permita centralizar y distribuir la información relevante para el monitoreo y alerta temprana de floraciones algales, de tal forma que un mayor número de actores pueda beneficiarse del acceso expedito a la información, incluyendo a expertos que puedan aportar al conocimiento de los mecanismos y condiciones que determinan la ocurrencia, intensidad y dinámica espacial de las FAN en las costas del sur de Chile.

7. Apoyar la constitución de un grupo multi-institucional de expertos en modelación hidrodinámica, actualmente dispersos entre diferentes instituciones académicas y organismos científico-técnicos del Estado, que colabore en la implementación y validación de modelos numéricos de circulación para la región, que en el futuro cercano se acoplen a modelos biogeoquímicos. Una combinación de este tipo permitirá entender cómo la carga de nutrientes en aguas estuarinas, de gran relevancia para la ocurrencia de floraciones algales, responde tanto a la variabilidad climática y oceanográfica como a variaciones en los aportes de nutrientes provenientes de actividades humanas.

8. Promover y apoyar la formación de una instancia de colaboración permanente entre la Academia y los organismos científico-técnicos encargados del monitoreo ambiental y de floraciones algales, para facilitar el análisis y la síntesis de la información existente por parte de grupos multi-disciplinarios, coordinar futuras acciones de monitoreo ambiental y biológico, y generar un plan de investigación a largo plazo que permita mejorar nuestra capacidad país de anticipar y responder a eventos como el registrado durante el verano de 2016.

9. Revisar las actuales exigencias a la industria acuícola en términos de monitoreo ambiental y planes de contingencia para enfrentar futuras floraciones de microalgas y sus consecuencias, toda vez que estos eventos se han vuelto recurrentes en nuestro territorio y por lo tanto no debieran generar el tipo de emergencia sanitaria ocurrida a fines del verano de 2016.

10. Destinar recursos a investigar en mayor detalle localidades costeras de especial interés por su alto contenido de nutrientes de origen orgánico (Seno de Reloncaví, Guafo, Abtao). Aportes desmedidos de material orgánico a estas localidades costeras, originados ya sea por actividad acuícola-pesquera como por las descargas de centros urbanos, podrían tener relación con niveles exacerbados de productividad primaria y eventual eutrofización costera en la región.

11. Ante la eventual necesidad futura de realizar nuevos vertimientos de peces en descomposición, es clave contar con una mejor caracterización de la biomasa vertida en términos de su densidad y tasas de hundimiento, así como con proyecciones de dispersión generadas por un modelo hidrodinámico que, además de estar adecuadamente validado, permita simular escenarios de dispersión con base en las condiciones meteorológicas observadas y no en las esperadas para un año normal. Contar con predicciones de modelos que asimilen en tiempo cuasi-real la información meteorológica y que generen proyecciones de dispersión actualizadas permanentemente, como ocurre con los modelos meteorológicos, es un objetivo de

mediano a largo plazo que debiese recibir mayor atención y apoyo en un país con niveles crecientes de dependencia en el océano.

12. Dada la fuerte señal en términos de amonio detectada en la zona a dos meses de realizado el vertimiento, y el potencial impacto que dicho aporte de nutrientes podría tener sobre la comunidad planctónica y tramas tróficas en la región, se recomienda que ante futuras mortandades de peces similares a la ocurrida en 2016 se consideren otras alternativas al vertimiento, o al menos un arreglo espacial de puntos de vertimiento que, junto con minimizar el riesgo de transporte hacia la costa, asegure una mayor dilución de los nutrientes derivados de la descomposición de la materia orgánica. La toma de este tipo de decisiones debiese contar el apoyo de un grupo dedicado a la modelación hidrodinámica como el que se recomienda en el punto 7.

7. Agradecimientos

Los autores de este informe desean agradecer a todas aquellas personas que aportaron con información, experticia y/o juicio experto durante la realización de este informe. Deseamos destacar los aportes de información, críticas y sugerencias de: René Garreaud (U. de Chile), Marcus Sobarzo (U. de Concepción), Carlos Molinet (U. Austral de Chile), José Luis Iriarte (U. Austral de Chile), Gonzalo Saldías (Oregon State University, USA), Diego Narváez (U. de Concepción) Iván Pérez (U. de Los Lagos), Alejandro Clement (Plankton Andino), Leonardo Guzmán (IFOP), Oscar Espinoza (IFOP), Rodrigo Martínez (IFOP), Pamela Carbonel(IFOP), Miriam Seguel (U. Austral de Chile), Carlos Lara (CEAZA), Nicole Trefault (U. Mayor), y Eduardo Aguilera (Sernapesca Los Lagos) . Se deja constancia que toda interpretación final señalada en este informe es de exclusiva responsabilidad de la comisión.

Los autores desean además agradecer la contribución del Instituto Milenio de Oceanografía Integrativa IMO (U. de Concepción) por su aporte en la organización e implementación del crucero oceanográfico a bordo del Cabo de Hornos, así como con la administración de los recursos, en especial al Sr. Atilio Morgado. Los centros de excelencia CONICYT COPAS Sur-Austral e INCAR también aportaron con equipos y personal especializado requeridos durante el crucero oceanográfico. Se agradece además al centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) por poner a disposición información climática en su plataforma web. También se debe señalar el aporte que diferentes proyectos adjudicados por los autores contribuyeron a hacer posible las diferentes actividades y mediciones realizadas: Alejandro Buschmann reconoce al proyecto FONDECYT 1150978 y al Programa Basal de CONICYT (FB-001); Fabián Tapia agradece el financiamiento del Programa Basal de CONICYT (PFB-31), así como al FONDAP INCAR y al proyecto FONDECYT 1161512; Laura Farías al proyecto FONDECYT 1161138; Mónica Vásquez al proyecto FONDECYT 1161232; y Daniel Varela al proyecto FONDECYT 1130954. Los análisis de nutrientes, incluyendo amonio, de contenido y composición isotópica de Carbono orgánico y Nitrógeno orgánico, además de clorofila fueron realizados en el laboratorio de biogeoquímica isotópica (Laura Farías). Los análisis de sedimentos (Universidad de Concepción) , de fitoplancton (Universidad de Los Lagos), así como la información molecular del fitoplancton y presencia/concentración de toxinas (P. Universidad Católica de Chile en colaboración con Universidad Mayor y el Alfred Wegener Institute en Alemania) están aun en proceso.

Finalmente la comisión agradece a la Armada de Chile y al comandante y tripulación del Cabo de Hornos por el apoyo prestado durante el crucero, y por otra parte la confianza prestada por la Academia de Ciencias de Chile.

8. Referencias

Aita et al. (2011) Linear relationship between carbon and nitrogen isotope ratios along simple food chains in marine environments. Journal of Plankton Research, 33 (11): 1629 - 1642. doi:10.1093/plankt/fbr070

Anderson, D. M., A. D. Cembella & G. M. Hallegraeff (2012) Progress in Understanding Harmful Algal Blooms: Paradigm Shifts and New Technologies for Research, Monitoring, and Management. Annual Review of Marine Science, 4: 143–176.

Boecklen, W.J., Yarnes, C.T., Cook, B.A. & James, A.C. (2011). On the use of stable isotopes in trophic ecology. Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst., 42: 411–440.

Canfield, D. E., F. J. Stewart, B. Thamdrup, L. De Brabandere, T. Dalsgaard, E. F. DeLong, N. P. Revsbech & O. Ulloa (2010).A cryptic sulfur cycle in oxygen-minimum zone waters off the Chilean coast. Science, 330: 1375-1378.

Carrasco, C., J. Karstensen & L. Farías (en prensa) Abrupt increase of N_2O in intermediate waters of the South East Pacific Ocean. Frontier in Marine Biogeochemistry.

Clement, A., Lincoqueo, L., Saldivia, M., Brito, C., Muñoz, F., Fernandez, C., Perez, F., Maluje, C. Silva, N., Moncada, V. & G. Contreras (2016) Climatic anomalies and harmful flagellates blooms in Southern Chile. The 17th International Conference on Harmful Algal Blooms. 09 – 14 October. Florianopolis, Brazil.

Cloern et al. (2002) Stable carbon and nitrogen isotope composition of aquatic and terrestrial plants of the San Francisco Bay estuarine system. Limnology and Oceanography, 47(3): 713–729

Dempson, J.B. & M. Power (2004) Use of stable isotopes to distinguish farmed from wild Atlantic salmon, *Salmo salar*. Ecology of Freshwater Fish, 13: 176–184

DeNiro, M.J. & S. Epstein (1978) Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. Geochim. Cosmochim. Acta, 42: 495–506.

DeNiro, M.J. & S. Epstein (1981) Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. Geochim. Cosmochim. Acta, 45: 341–351.

Espinoza, O., Pinilla, E., Besoaín, B. & L. Guzmán (2016) Temporal and spatial variability of *Alexandrium catenella* blooms in estuarine fjords of the Aysén region, Chile. The 17th International Conference on Harmful Algal Bloom. 09 – 14 October. Florianopolis, Brazil.

Fry, B. (2006) Stable Isotope Ecology. 6th Edition. Springer New York

Gamboa-Delgado, J., et al. (2011) Recent Advances in the Application of Stable Isotopes as Nutritional Tools in Aquaculture. En: Cruz-Suárez, L.E., Ricque Marie, D., Tapia-Salazar, M., Nieto-López, M.G., Villarreal-Cavazos, D. A., Gamboa-Delgado, J., Hernández-Hernández, L. (Eds), Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México, pp. 373-392.

Guzmán, L., G. Vidal, X. Vivanco, V. Arenas, L. Iriarte, S. Mercado, C. Alarcón, H. Pacheco, M. Palma, C. Espinoza, P. Mejías, E. Fernández-Niño, J. Monsalve, G. Pizarro, P. Hinojosa, C. Zamora, P. Zamora & N. Pesse (2009) Manejo y Monitoreo de las mareas rojas en las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes. Informe Final. 187p. + Figuras + Tablas + Anexos. Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción- Subsecretaría de Pesca.

Guzmán, L., G. Vidal, X. Vivanco, V. Arenas, L. Iriarte, S. Mercado, C. Alarcón, H. Pacheco, M. Palma, C. Espinoza, P. Mejías, E. Fernández-Niño, J. Monsalve, G. Pizarro, P. Hinojosa & C. Zamora (2010) Manejo y Monitoreo de las mareas rojas en las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes. Informe Final. 193p. + Figuras + Tablas + Anexos. Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción- Subsecretaría de Pesca.

Huyer, A., M. Knoll, T. Paluszkiewicz & R.L. Smith (1991) The Peru undercurrent: A study in variability. Deep-Sea Res., 38, Suppl.1, S247-S271.

Llanillo, P.J., Karstensen, J., Pelegrí, J. L. & L. Stramma (2013) Physical and biogeochemical forcing of oxygen and nitrate changes during El Niño/El Viejo and La Niña/La Vieja upper-ocean phases in the tropical eastern South Pacific along 86°W. Biogeosciences, 10: 6339-6355.

Mardones, J., Clement, A., Rojas, X. & C. Aparicio (2010) *Alexandrium catenella* during 2009 in Chilean waters, and recent expansion to coastal ocean. Harmful Algae News, 41: 8–9.

Mardones, J., Clement, A. & X. Rojas (2012) Monitoring potentially ichthyotoxic phytoflagellates in southern fjords of Chile. Harmful Algae News, 45: 6–7.

Martínez, R., Guzmán, L., Espinoza, O. & P. Carbonell (2016) Diverse algal blooms in fjords and channels of southern Chile, increased abundance and geographic coverage during summer 2016. The 17th International Conference on Harmful Algal Bloom. 09 – 14 October. Florianopolis, Brazil.

McCabe, R. M., B. M. Hickey, R. M. Kudela, K. A. Lefebvre, N. G. Adams, B. D. Bill, F. M. D. Gulland, R. E. Thomson, W. P. Cochlan, & V.L. Trainer (2016) An unprecedented coastwide toxic algal bloom linked to anomalous ocean conditions. Geophys. Res. Lett., 43: 10366–10376, doi:10.1002/2016GL070023.

Minagawa, M. & E. Wada (1984) Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: further evidence and the relation between $\delta^{15}N$ and animal age. Geochim. Cosmochim. Acta, 48: 1135–1140.

Molinet, C., Lafon, A., Lembeye, G. & C. Moreno (2003) Patrones de distribución espacial y temporal de floraciones de *Alexandrium catenella* (Whoedon & Kofoid) Balech, 1985, en aguas interiores de la Patagonia noroccidental de Chile. Rev. Ch. Hist. Nat., 76: 681–698.

Paredes, J., Aguilera, A., Olivares, B. Uribe, C., Urrutia5, G., Seguel, M., Villanueva, F., Vargas, M. & D. Varela (2016a) Morphological variability and genetic identification of ichthyotoxic species *Pseudochattonella sp.* isolated from severe outbreak in 2016 at the Northern Patagonian Fjord, southern Chile. The 17th International Conference on Harmful Algal Bloom. 09 – 14 October. Florianopolis, Brazil.

Paredes, J., Zúñiga, A., Olivares, B., Martínez, C. & D. Varela (2016b) Vegetative cells of *Alexandrium catenella* from the first bloom reported in southern Chile along Pacific Ocean coast: growth attributes and genetic identification. The 17th International Conference on Harmful Algal Bloom. 09 – 14 October. Florianopolis, Brazil.

Redfield, A.C. (1934) On the proportions of organic derivatives in seawater and their relations to the composition of plankton. James Jhonstone (ed.) Liverpool, England.

Rau, et al. (1998) Suspended particulate nitrogen $d^{15}N$ versus nitrate utilization: Observations in Monterey Bay, CA. Deep Sea Res., Part II, 45: 1603 – 1616.

Rodríguez, M. et al. (2010) Composición elemental e isotópica estable de $\delta^{13}C$ y $\delta^{15}N$ en *Phocoena sinus*. 60 Años de la Colección Nacional De Mamíferos del Instituto de Biología, UNAM. Aportaciones al Conocimiento y Conservación de los Mamíferos Mexicanos.

Schoeninger, M.J. & M.J. DeNiro (1984). Nitrogen and carbon isotopic composition of bone collagen from marine and terrestrial animals. Geochim. Cosmochim. Acta, 48: 625–639.

Sievers, H.A & N. Silva (2008) Water masses and circulation in austral Chilean channels and fjords. Progress in the oceanographic knowledge of Chilean interior waters, from Puerto Montt to Cape Horn In N. Silva & S. Palma (eds.). 2008. Comité Oceanográfico Nacional - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, pp. 53-58.

Silva, N. & D. Konow (1975) Contribución al conocimiento de las masas de agua en el Pacífico Sudoriental. Rev. Com. Perm. Pacífico Sur, 3: 63-75.

Solow, A. R., A. R. Beet, B. A. Keafer & D. M. Anderson (2014) Testing for simple structure in a spatial time series with an application to the distribution of *Alexandrium* resting cysts in the Gulf of Maine. Marine Ecology Progress Series, 501: 291–296.

Svensson, E., V. Freitas, S. Schouten, J. J. Middelburg, H. W. van der Vee & J.S. Sinninghe Damsté (2014) Comparison of the stable carbon and nitrogen isotopic values of gill and white muscle tissue of fish. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 457: 173–179

Villanueva, F., Urrutia, G., Uribe, C., Seguel, M., Aguilera, A., Olivares, B., Varela, D. & J. Paredes (2016) Harmful Algal Bloom of *Pseudochattonella verruculosa* (Dictyochophyceae, Florenciellales) associated with salmon farm mortalities in the South of Chile. The 17th International Conference on Harmful Algal Bloom. 09 – 14 October. Florianopolis, Brazil.