

Floraciones de dinoflagelados tóxicos moduladas por anomalías térmicas extremas en los fiordos de la Patagonia noroccidental



Patricio A. Díaz^{1,2*}, Cecile Pujol³, Iván Pérez-Santos^{1,4}, Gonzalo Álvarez^{5,6}, Michael Araya⁶, Daniel Varela¹, Rosa I. Figueroa⁷, Camilo Rodríguez-Villegas¹, Carlos Lara⁸, Valentina Iturra¹, Felipe Tucca⁹, Camila Barria¹⁰, David Cassis¹¹, Beatriz Reguera⁷

¹ Centro i-mar, Universidad de Los Lagos, Puerto Montt, Chile

² Centro Interdisciplinario para la Investigación Acuicola - Investigación Aplicada (INCAR2), Universidad de Concepción, Concepción, Chile

³ GeoHydrodynamics and Environment Research, University of Liège, Liège, Belgium

⁴ Centro de investigación oceanográfica COPAS COASTAL, Universidad de Concepción, Chile

⁵ Departamento de Acuicultura, Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Católica del Norte, Larrondo 1281, Coquimbo, Chile

⁶ Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Algas (CIDTA), Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Católica del Norte, Coquimbo, Chile

⁷ Centro Oceanográfico de Vigo (IEO-CSIC), Subida a Radio Faro 50, 36390 Vigo, Spain

⁸ Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile

⁹ Emic Ambiental, Llanquihue, Chile

¹⁰ Instituto Tecnológico de la Mitilicultura (INTEMIT), Castro, Chile

¹¹ AquaBC Chile Spa, Puerto Varas, Chile

* Autor de correspondencia: patricio.diaz@ulagos.cl

El sistema de fiordos y canales Patagónicos es reconocido mundialmente como una de las principales regiones afectadas por eventos de floraciones algales nocivas (FAN), particularmente aquellos que involucran especies de microalgas tales como *Alexandrium catenella*, *Dinophysis acuta* y *Protoceratium reticulatum* (Barria et al., 2022; Díaz et al., 2019; Díaz and Figueroa, 2023). Floraciones de estas especies de dinoflagelados han afectado las actividades costeras de la Patagonia noroccidental durante los últimos 30 años, particularmente la acuicultura de moluscos, las pesquerías bentónicas y la salud pública (Alves de Souza et al., 2014; Díaz et al., 2024; Lembeye et al., 1993). Estas floraciones, que pueden verse exacerbadas por el cambio climático, la eutrofización y la intensificación de la acuicultura, generan desafíos críticos para la seguridad alimentaria, la biodiversidad y la sostenibilidad de la acuicultura, particularmente en sistemas de fiordos estratificados como los de la Patagonia chilena. Evidencia científica reciente subraya la necesidad de comprender las FAN a escala regional, considerando los rasgos específicos de cada especie y las interacciones físico-biológicas a microescala que modulan su dinámica espacial y temporal.

La relación entre el cambio climático y la intensificación de las FAN ha sido motivo de intenso debate en el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) y destacado como un tema prioritario en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas (UN DESA, 2023). A pesar de la falta de evidencia clara de un aumento global en la frecuencia de las FAN, existe una sólida evidencia regional de eventos intensificados y más extendidos geográficamente, especialmente en relación con especies

productoras de biotoxinas marinas (Hallegraeff et al., 2021). En el sistema de fiordos patagónicos, estas floraciones se han asociado con anomalías climáticas de gran escala, como las fases positivas de El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) y del Modo Anular del Sur (SAM) (Díaz and Figueroa, 2023). Sin embargo, su asociación con condiciones oceanográficas anómalas de gran escala ha sido poco estudiada.

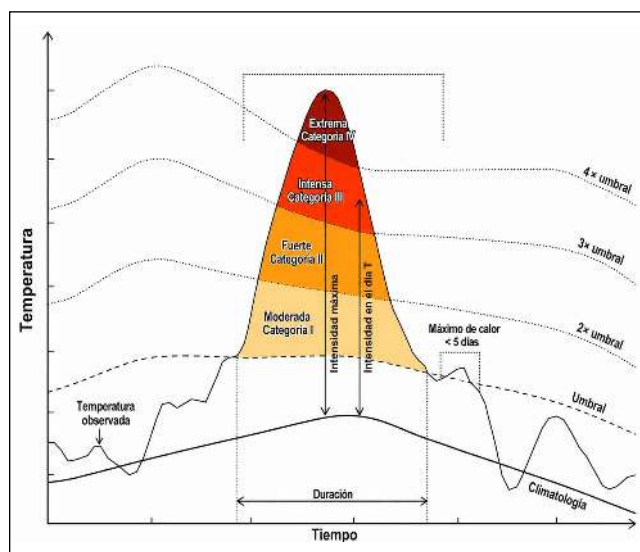


Figura 1: Esquema conceptual de una ola de calor marina (MHW), mostrando su duración, intensidad y clasificación en categorías según la magnitud con que la temperatura observada supera el umbral climatológico.

Las anomalías hidroclimáticas, que corresponden a desviaciones persistentes o extremas de las condiciones ambientales (precipitaciones, caudales de ríos, salinidad, temperatura del aire y del océano, entre otras) respecto a sus valores habituales (media histórica o climatológica), han sido sugeridas como uno de los principales moduladores o promotores de FAN en el sistema de fiordos y canales de la Patagonia (Díaz et al., 2021; Díaz et al., 2023; León-Muñoz et al., 2018; Mardones et al., 2023). Dentro de estos eventos, las olas de calor marinas (MHW por sus siglas en inglés) representan períodos prolongados en los que la temperatura superficial del mar se mantiene excepcionalmente elevada en comparación con su climatología local. Las MHW son eventos de aguas anormalmente cálidas observados en todos los océanos, con una duración de al menos 5 días hasta varias semanas y, ocasionalmente, meses (Hobday et al., 2016). Las MHW se caracterizan habitualmente mediante varias métricas: frecuencia (evento/año), intensidad media y máxima (°C) y duración (días). Además, las MHW se clasifican en categorías según su intensidad: un evento de Categoría I (moderado) presenta una intensidad entre

1 y 2 veces la diferencia entre el umbral y la climatología; la Categoría II (fuerte) corresponde a 2 a 3 veces dicha diferencia; la Categoría III (intensa), a 3 a 4 veces; y la Categoría IV (extrema), a 4 veces o más (Fig. 1) (Hobday et al., 2018). Su frecuencia e intensidad han aumentado durante las últimas décadas en relación con el calentamiento global (Capotondi et al., 2024; Frölicher et al., 2018). Las MHW alteran las condiciones ambientales al aumentar directamente la temperatura y reforzar la estratificación, provocando con ello graves impactos en los ecosistemas marinos (Oliver et al., 2018). Estos impactos incluyen eventos de mortalidad masiva, pérdida de hábitat tras la desaparición de especies clave como los bosques de kelp y los arrecifes de coral, cambios en la distribución de las especies, mayor ocurrencia e intensidad de FAN generando repercusiones económicas para las industrias pesquera y acuícola (Smith et al., 2023).

Al modificar las condiciones ambientales, las MHW también pueden generar condiciones favorables para el inicio y el desarrollo de las FAN, que proliferan en aguas cálidas y estratificadas (Gobler, 2020;

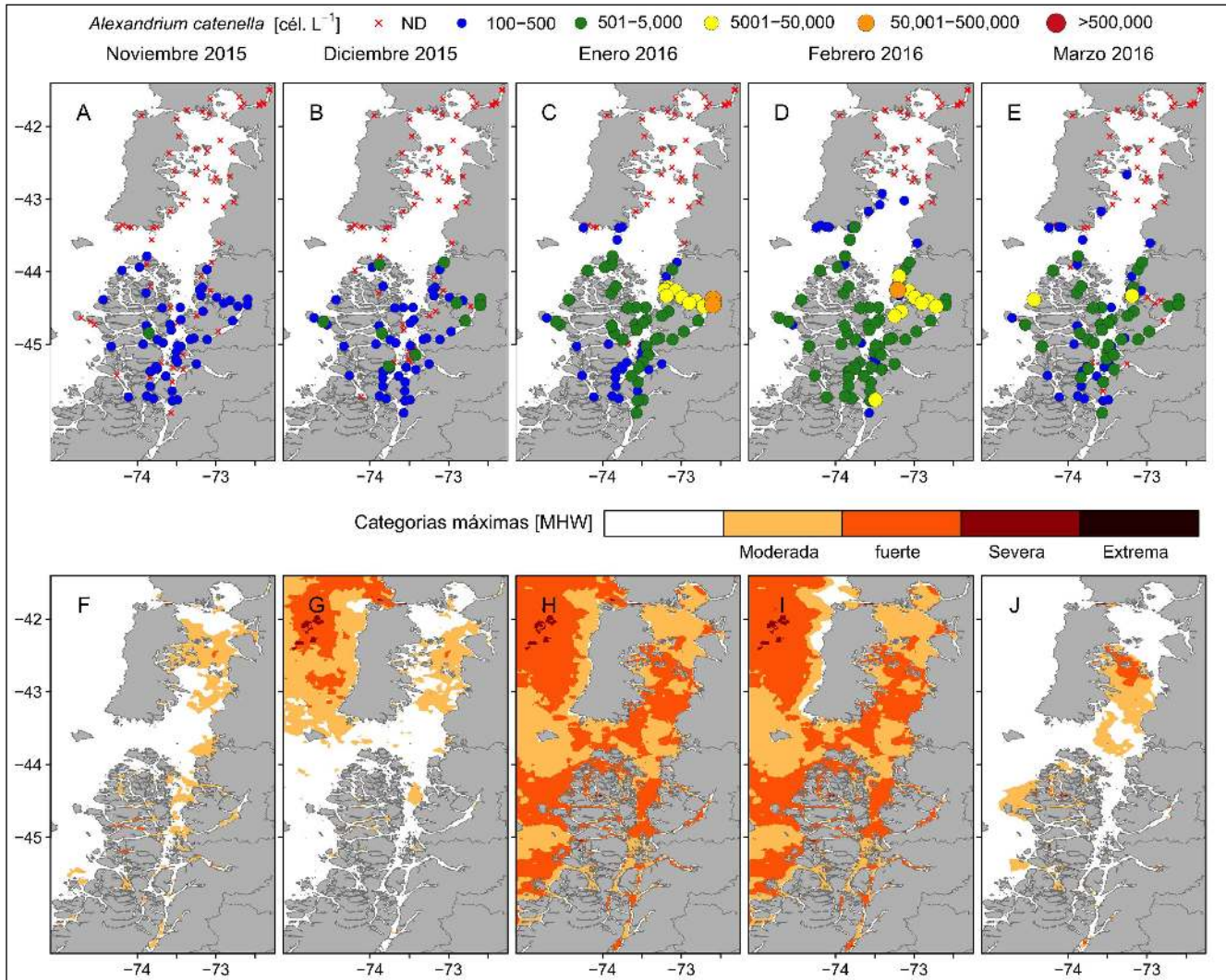


Figura 2: Distribución espacial de *Alexandrium catenella* (A-E) y categorías máximas de olas de calor marinas (MHW; F-J) entre noviembre de 2015 y marzo de 2016 en la Patagonia noroccidental.

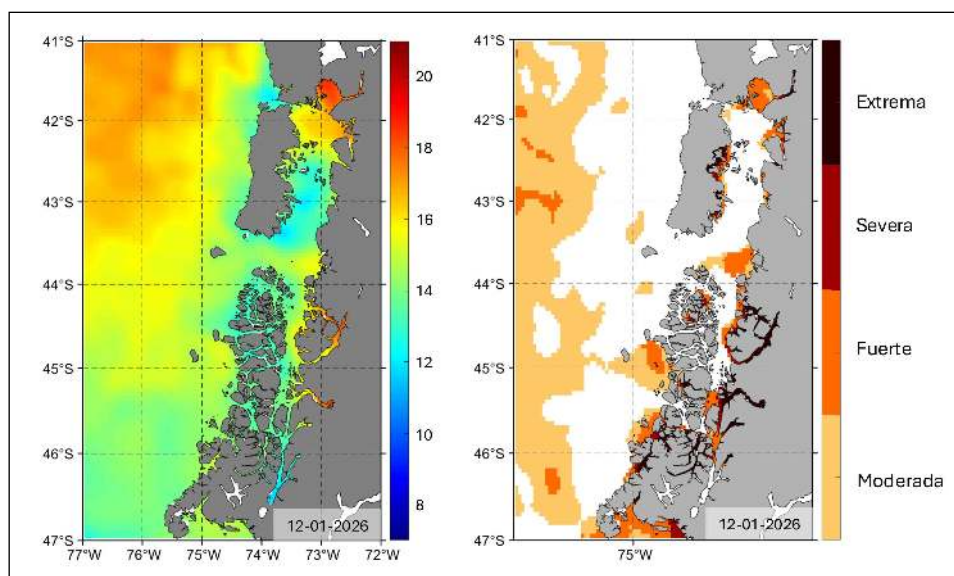


Figura 3: Distribución espacial de la temperatura superficial del mar (izquierda) y categorías de olas de calor marinas (derecha) en la Patagonia noroccidental para el 12 de enero de 2026.

Trainer et al., 2020). La coocurrencia de MHW y FAN se ha registrado en diferentes regiones del mundo (Kuroda et al., 2021; Lim et al., 2021; McCabe et al., 2016), pero escasamente en Chile, aunque tanto las FAN como las MHW han sido reportadas frecuentemente de manera independiente (Garreaud, 2018; León-Muñoz et al., 2018; Pujol et al., 2022; Pujol et al., 2025). Estos eventos de FAN han tenido consecuencias devastadoras, incluida la mortalidad de ~25 millones de salmones de cultivo, que representaron una biomasa total de 40.000 toneladas y una pérdida económica estimada de 800 millones de US\$ (León-Muñoz et al., 2018; Mardones et al., 2021).

La relación entre las FAN y las anomalías de la temperatura del mar, particularmente su asociación con las MHW, ha sido escasamente estudiada en la Patagonia noroccidental, aunque esta región sustenta una importante industria acuícola de peces (especialmente salmónidos) y moluscos (mejillones), particularmente sensibles a los eventos de FAN (Díaz et al., 2019; Díaz and Figueroa, 2023). Un estudio reciente demostró que las anomalías térmicas positivas y las MHW generan condiciones favorables para el inicio y la intensificación de las floraciones de *Alexandrium catenella* en la Patagonia noroccidental, aunque el forzamiento térmico por sí solo no siempre es

suficiente para desencadenar el desarrollo de una floración (Pujol et al., 2026).

El año 2016 fue excepcional en términos hidroclimáticos, ya que combinó la mayor frecuencia de MHW, con un promedio de 4,5 eventos y máximos cercanos a 6 eventos en Los Lagos y 3,5 en Aysén, la mayor duración (promedio de 29 días en la Patagonia noroccidental) y la mayor exposición acumulada, con un promedio de 35 días en la Patagonia noroccidental. Se observó una marcada disparidad regional, con 60 días en Los Lagos y 15 días en Aysén. Este evento fue modulado por patrones climáticos

de gran escala, como fue la coocurrencia de las fases positivas del ENOS (El Niño Oscilación de Sur) y el SAM (Modo Anular del Sur) (Garreaud, 2018). Estas condiciones, favorecieron al desarrollo de una intensa floración de *A. catenella* que abarcó gran parte del sistema de fiordos y canales de la región de Aysén y la costa oceánica de la región de Los Lagos (Fig. 2). Así, la presencia temprana *A. catenella* fue registrada en noviembre de 2015 únicamente en la región de Aysén (< 500 células L⁻¹), seguida de un aumento progresivo durante el verano, alcanzando en enero valores entre 500 y 5.000 células L⁻¹ en el norte del archipiélago de los Chonos, el canal Moraleda y el fiordo Puyuhuapi. En el canal Jacaf se registraron

densidades celulares más altas, entre 5×10³ y 50×10³ células L⁻¹, mientras que en la cabecera del fiordo Puyuhuapi se alcanzaron valores máximos entre 50×10³ y 500×10³ células L⁻¹. En febrero, la floración se extendió hacia el norte, alcanzando las costas meridionales de la isla de Chiloé, con un máximo a comienzos de marzo antes de disminuir progresivamente. Hacia marzo, las densidades celulares habían disminuido, quedando por debajo de 5.000 células L⁻¹ en casi toda el área (Fig. 2A-E). Esta floración estuvo asociada con anomalías térmicas positivas generalizadas y sostenidas, que en enero superaron +1 °C en toda el área. Se registraron anomalías superiores a +1,5 °C

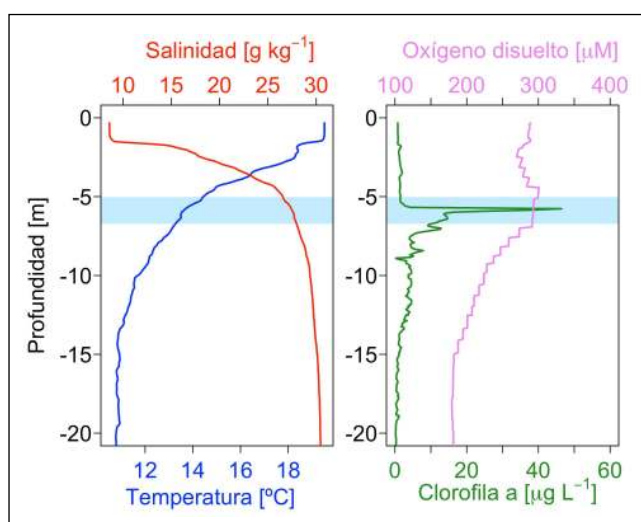


Figura 4: Perfiles verticales de temperatura y salinidad (izquierda) y de clorofila a y oxígeno disuelto (derecha), registrado en la cabecera del fiordo Puyuhuapi (región de Aysén) el 29 de enero de 2026. El polígono celeste (5-6.75) señala la profundidad donde se colectaron muestras en alta resolución con el MAR (Aravena et al., 2025).

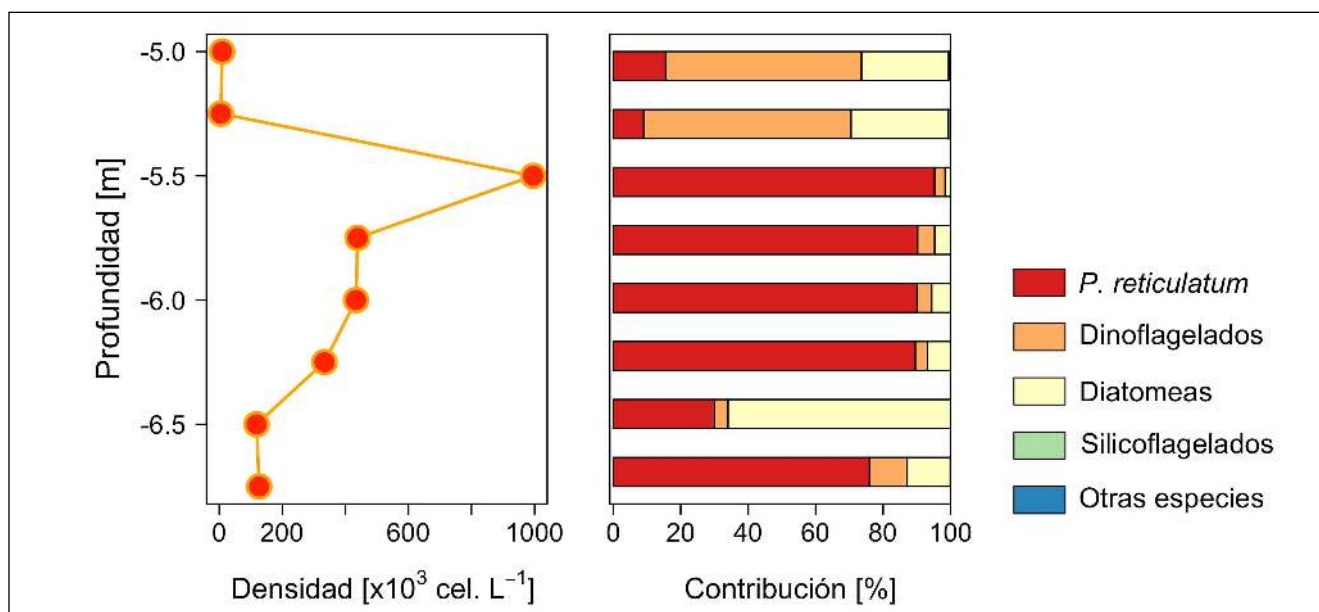


Figura 5: Distribución vertical de la densidad de *Protoceratium reticulatum* (izquierda) y contribución relativa de los principales grupos fitoplanctónicos (derecha) entre 5 y 6.75 m de profundidad registrado en la cabecera del fiordo Puyuhuapi (región de Aysén) el 29 de enero de 2026.

alrededor de las islas Desertores, el Seno de Reloncaví, los canales del archipiélago de Los Chonos, Moraleda y Jacaf, y los fiordos Comau, Puyuhuapi y Aysén. Estas condiciones estuvieron vinculadas a una MHW persistente que comenzó en noviembre de 2015 alrededor de las islas Desertores, el archipiélago de los Chonos, el canal Moraleda y los fiordos Puyuhuapi y Aysén. La MHW se intensificó en enero de 2016 alrededor de las islas Desertores y en el archipiélago de los Chonos (Categoría II), expandiéndose hasta cubrir por completo el área de estudio desde mediados de enero hasta febrero (durante la fase de floración), con una cobertura del 95% de la Patagonia noroccidental (Fig. 2F-J).

Las anomalías térmicas positivas y su influencia sobre el desarrollo de FAN no necesariamente ocurren bajo la fase positiva del ENOS. Así, floraciones algales de gran intensidad se han registrado en la Patagonia Noroccidental asociadas principalmente a fases positivas del SAM, como son los eventos de *Dinophysis acuta* en verano de 2018 (Díaz et al., 2021) y *Heterosigma akashiwo* a inicios de otoño de 2021 (Díaz et al., 2023; Mardones et al., 2023). Uno de los casos más recientes corresponde a una intensa floración del dinoflagelado *Protoceratium reticulatum* en la región de Aysén durante verano de 2026, el cual se generó bajo una fase negativa del ENOS (La Niña) y una fase positiva del SAM, en un contexto de marcado calentamiento superficial del mar y una MHW que alcanzó intensidades de moderadas a extremas, particularmente en sectores costeros, fiordos y canales interiores, entre ellos el fiordo Puyuhuapi (Fig. 3). En la cabecera de este fiordo la columna de agua presentó una marcada estratificación termo-halina, con aguas superficiales más cálidas y menos salinas (Fig. 4). Además, un máximo subsuperficial de clorofila a cercano a los 6 m de profundidad, coincidente con elevados niveles de oxígeno disuelto, evidenció la presencia de una capa fina (CF) de fitoplancton en una capa bien definida de la columna de agua (Fig. 4). La máxima densidad

fitoplanctónica se concentró alrededor de los 5,5 m de profundidad, alcanzando cerca de 1000×10^3 células L^{-1} (Fig. 5). En esta capa, *Protoceratium reticulatum*, dinoflagelado productor de yesotoxinas, dominó ampliamente la comunidad fitoplanctónica, con una contribución cercana al 90 %, confirmando que el máximo subsuperficial de biomasa estuvo asociado principalmente al desarrollo de esta especie. Esta elevada densidad celular corresponde a la densidad máxima registrada para esta especie a nivel nacional, superando en más del doble la densidad celular registrada en el mismo fiordo durante el evento de otoño de 2022 (407×10^3 células L^{-1}), donde se registró el primer cierre sanitario por YTX en Chile (Díaz et al., 2024).

Estas densidades excepcionalmente altas plantean diversas interrogantes: ¿Está incrementando la severidad de los eventos o hemos cambiado la forma de registrarlas? ¿Son *Protoceratium reticulatum* y *Alexandrium catenella*, dos especies que se están viendo beneficiadas por el cambio climático? ¿Son las anomalías térmicas extremas los principales forzantes implicados en el desarrollo de FAN de estas y otras especies? ¿Es posible contar con modelos predictivos confiables en tiempo y espacio para determinadas especies? En este sentido, Hallegraeff (2010) sugirió algunas respuestas que se pueden esperar frente al escenario del cambio climático global y planteó la hipótesis de que algunas especies de FAN pueden llegar a ser más competitivas, mientras que otras pueden disminuir considerablemente en áreas donde generalmente son recurrentes, es decir, que habrá “ganadores” y “perdedores”. Gobler et al. (2017) por su parte, destacó que períodos prolongados de temperaturas elevadas pueden favorecer ciertos taxones de FAN y aumentar su ventaja competitiva frente a especies no nocivas. En cualquier caso, para buscar respuestas a las diferentes interrogantes en torno a los eventos FAN y otros procesos que ocurren en el océano es clave estudiarlos y entenderlos en sus diferentes escalas

espaciales y temporales como lo siguió Henry Stommel hace más de 6 décadas (Stommel, 1963), sin dejar de lado la complejidad de interacciones físico-biológicas a pequeña escala, muchas de las cuales aún estamos lejos de comprender.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo fue financiado por el proyecto FONDECYT 1262020 "A microscale approach to explore the role of species traits and interactions during superimposed lipophilic toxin events in a Patagonian fjord" y por el Centro Interdisciplinario para la Investigación Acuicola - Investigación Aplicada (INCAR², CIA250009), ambos de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID).

REFERENCIAS

- Alves de Souza, C., Varela, D., Contreras, C., de la Iglesia, P., Fernández, P., Hipp, B., Hernández, C., Riobó, P., Reguera, B., Franco, J.M., Diogene, J., García, C., Lagos, N., 2014. Seasonal variability of *Dinophysis* spp. and *Protoceratium reticulatum* associated to lipophilic shellfish toxins in a strongly stratified Chilean fjord. *Deep Sea Res.* 111, 152-162.
- Aravena, Á., Díaz, P.A., Cantarero, B., Rantul, R., Altamirano, R., Miranda, C., Pérez-Santos, I., Álvarez, G., Araya, M., Reguera, B., 2025. High-vertical resolution sampling reveals sharp thin layers of toxic phytoplankton in the Patagonian fjords, Southern Chile. *Harmful Algae News* 79, 16-18.
- Barría, C., Vasquez-Calderon, P., Lizama, C., Herrera, P., Canto, A., Conejeros, P., Beltrami, O., Suarez-Isla, B., Carrasco, D., Rubilar, I., Guzman, L., Duran, L.R., Oliva, D., 2022. Spatial temporal expansion of harmful algal blooms in Chile: A review. *Journal of Marine Science and Engineering* 10, 1868.
- Capotondi, A., Rodrigues, R.R., Gupta, A.S., Benthuisen, J.A., Deser, C., Frölicher, T.L., Lovenduski, N.S., Amaya, D.J., Le Grix, N., Xu, T., Hermes, J., Holbrook, N.J., Martinez-, Villalobos, C., Masina, S., Roxy, M.K., Schaeffer, A., Schlegel, R.W., Smith, K.E., Wang, C., 2024. A global overview of marine heatwaves in a changing climate. *Communications Earth & Environment* 5, 701.
- Díaz, P.A., Álvarez, A., Varela, D., Pérez-Santos, I., Díaz, M., Molinet, C., Seguel, M., Aguilera-Belmonte, A., Guzmán, L., Uribe, E., Rengel, J., Hernández, C., Segura, C., Figueroa, R.I., 2019. Impacts of harmful algal blooms on the aquaculture industry: Chile as a case study. *Perspect. Phycol.* 6, 39-50.
- Díaz, P.A., Araya, M., Cantarero, B., Miranda, C., Varela, D., Figueroa, R.I., Basti, L., Carbonell, P., Araverana, Á., Pérez-Santos, I., Nieves, M.G., Álvarez, G., 2024. Are yessotoxins an emerging problem in Chile? Context and perspectives following the first report of YTX levels exceeding the regulatory limit in the Patagonian fjord system. *Environ. Pollut.* 361, 124844.
- Díaz, P.A., Figueroa, R.I., 2023. Toxic algal bloom recurrence in the era of global change: Lessons from the Chilean Patagonian fjords. *Microorganisms* 11, 1874.
- Díaz, P.A., Pérez-Santos, I., Álvarez, G., Garreaud, R., Pinilla, E., Díaz, M., Sandoval, A., Araya, M., Álvarez, F., Rengel, J., Montero, P., Pizarro, G., López, L., Iriarte, L., Igor, G., Reguera, B., 2021. Multiscale physical background to an exceptional harmful algal bloom of *Dinophysis acuta* in a fjord system. *Sci. Total Environ.* 773, 145621.
- Díaz, P.A., Pérez-Santos, I., Basti, L., Garreaud, R., Pinilla, E., Barrera, F., Tello, A., Schwerter, C., Arenas-Urbe, S., Soto-Riquelme, C., Navarro, P., Díaz, M., Álvarez, G., Linford, P., Altamirano, R., Mancilla-Gutiérrez, G., Rodríguez-Villegas, C., Figueroa, R.I., 2023. The impact of local and climate change drivers on the formation, dynamics, and potential recurrence of a massive fish-killing microalgal bloom in Patagonian fjord. *Sci. Total Environ.* 865, 161288.
- Frölicher, T.L., Fisher, E.M., Gruber, N., 2018. Marine heatwaves under global warming. *Nature* 560, 360-364.
- Garreaud, R., 2018. Record-breaking climate anomalies lead to severe drought and environmental disruption in western Patagonia in 2016. *Climate Research* 74, 217-229.
- Gobler, C.J., Doherty, O.M., Hattenrath-Lehmann, T.K., Griffith, A.W., Kang, Y., Litaker, R.W., 2017. Ocean warming since 1982 has expanded the niche of toxic algal blooms in the North Atlantic and North Pacific oceans. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 114, 4975-4980.
- Gobler, J.C., 2020. Climate change and harmful algal blooms: Insights and perspective. *Harmful Algae* 91, 101731.
- Hallegraeff, G., 2010. Ocean climate change, phytoplankton community responses, and harmful algal blooms: A formidable predictive challenge. *J. Phycol.* 46, 220-235.
- Hallegraeff, G., Enevoldsen, H., Zingone, A., 2021. Global harmful algal bloom status reporting. *Harmful Algae* 102, 101992.
- Hobday, A., Oliver, E., Sen Gupta, A., Benthuisen, J., Burrows, M., Donat, M., Holbrook, N.J., Moore, P.J., Thomsen, M.S., Wernberg, T., Smale, D.A., 2018. Categorizing and naming marine heatwaves. *Oceanography* 31, 162-173.

- Hobday, A.J., Alexander, L.V., Perkins, S.E., Smale, D.A., Straub, S.C., Oliver, E.C.J., Benthuyzen, J.A., Burrows, M.T., Donat, M.G., Feng, M., Holbrook, N.J., Moore, P.J., Scannell, H.A., Gupta, A.S., Wernberg, T., 2016. A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Prog. Oceanogr.* 141, 227-238.
- Kuroda, H., Azumaya, T., Setou, T., Hasegawa, N., 2021. Unprecedented outbreak of harmful algae in Pacific coastal waters off Southeast Hokkaido, Japan, during late summer 2021 after record-breaking marine heatwaves. *Journal of Marine Science and Engineering* 9, 1335.
- Lembeye, G., Yasumoto, T., Zhao, J., Fernández, R., 1993. DSP outbreak in Chilean fjords, in: Smayda, T.J., Shimizu, Y. (Eds.), *Toxic Phytoplankton Blooms in the Sea*, Elsevier, Amsterdam, pp. 525-529.
- León-Muñoz, J., Urbina, M.A., Garreaud, R., Iriarte, J.L., 2018. Hydroclimatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016). *Sci. Rep.* 8, 1330.
- Lim, Y.K., Park, B.S., Kim, J.H., Baek, S.-S., Baek, S.H., 2021. Effect of marine heatwaves on bloom formation of the harmful dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*: Two sides of the same coin? *Harmful Algae* 104, 102029.
- Mardones, J.I., Paredes, J., Godoy, M., Suarez, R., Norambuena, L., Vargas, V., Fuenzalida, G., Pinilla, E., Artal, O., Rojas, X., Dorantes-Aranda, J.J., Lee Chang, K.L., Anderson, D.M., Hallegraeff, G., 2021. Disentangling the environmental processes responsible for the world's largest farmed fish-killing harmful algal bloom: Chile, 2016. *Sci. Total Environ.* 766, 144383.
- Mardones, J.I., Paredes-Mella, J., Flores-Leñero, A., Yarimuzu, K., Godoy, M., Cascales, E., Espinoza, J.P., Norambuena, L., Garreaud, R., Gonzáles, H.E., Iriarte, J.L., 2023. Extreme harmful algal blooms, climate change, and potential risk of eutrophication in Patagonian fjords: Insights from an exceptional *Heterosigma akashiwo* fish-killing event. *Prog. Oceanogr.* 210, 102921.
- McCabe, R.M., Hickey, B.M., Kudela, R.M., Lefebvre, K.A., Adams, N.G., Bill, B.D., Gulland, F.M.D., Thomson, R.E., Cochlan, W.P., Trainer, V.L., 2016. An unprecedented coastwide toxic algal bloom linked to anomalous ocean conditions. *Geophys. Res. Lett.* 43, 10.366-310.376.
- Oliver, E.C.J., Donat, M.G., Burrows, M.T., Moore, P.J., Smale, D.A., Alexander, L.V., Benthuyzen, J.A., Feng, M., Sen Gupta, A.S., Hobday, A.J., Holbrook, N.J., Perkins-Kirkpatrick, S.E., Scannell, H.A., Straub, S.C., Wernberg, T., 2018. Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nature Communications* 9, 1324.
- Pujol, C., Díaz, P.A., Mancilla-Gutiérrez, G., Tucca, F., Barth, A., Azcarate, A.A., 2026. *Alexandrium catenella* blooms driven by extreme thermal anomalies in a fjord system. *Water Biology and Security*.
- Pujol, C., Pérez-Santos, I., Barth, A., Alvera-Azcárate, A., 2022. Marine heatwaves offshore central and south Chile: Understanding forcing mechanisms during the years 2016-2017. *Front. Mar. Sci.* 9, 800325.
- Pujol, C., Pérez-Santos, I., Barth, A., Díaz, P., Mancilla-Gutiérrez, G., Linford, P., Alvera-Azcárate, A., 2025. Extreme temperature events in the semi-enclosed inner sea of Northern Chilean Patagonia, in: Pérez-Santos, I., de Barros, D., Rojas, X., Tucca, F., Saldías, G., Sobarzo, M., Valle-Levinson, A., Franca, C.A. (Eds.), *Latin American Physics of Estuaries and Coastal Oceans - LAPECO 2025*, Puerto Varas, Chile.
- Smith, K.E., Burrows, M.T., Hobday, A.J., King, N.G., Moore, P.J., Gupta, A.S., Thomsen, M.S., Wernberg, T., Smale, D.A., 2023. Biological impacts of marine heatwaves. *Ann. Rev. Mar. Sci.* 15, 119-145.
- Stommel, H., 1963. Varieties of Oceanographic Experience: The ocean can be investigated as a hydrodynamical phenomenon as well as explored geographically. *Science* 139, 572-576.
- Trainer, V.L., Moore, S.K., Hallegraeff, G., Kudela, R.M., Clement, A., Mardones, J.I., Cochlan, W.P., 2020. Pelagic harmful algal blooms and climate change: Lessons from nature's experiments with extremes. *Harmful Algae* 91, 101591.
- UN DESA, 2023. The Sustainable Development Goals Report 2023: Special Edition - July 2023. New York, USA: UN DESA. © UN DESA. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/>.