FLORACIONES DE *HETEROSIGMA AKASHIWO* EN LA PATAGONIA: UN PROBLEMA CADA VEZ MÁS RECURRENTE PARA LA SALMONICULTURA

Patricio A. Díaz [1,2]*, Iván Pérez-Santos [1,3], Daniel Varela [1], Bárbara Cantarero [1], Humberto Godoy [4], David Cassis [5], Álvaro Aravena [1], Robinson Altamirano [1], Rebeca Rantul [1], Pamela Urrutia [6], Ricardo Díaz [7], Pedro Cabrera [4], Héctor Plaza [4], Jorge Osses [4], Rosa I. Figueroa [8]

[1] Centro i~mar, Universidad de Los Lagos, Puerto Montt, Chile
[2] CeBiB, Universidad de Los Lagos, Puerto Montt, Chile
[3] Centro de investigación oceanográfica COPAS COASTAL, Universidad de Concepción, Chile
[4] Fishing Partners, Puerto Montt, Chile
[5] AquaBC Chile Spa, Puerto Varas, Chile
[6] MOWI Chile, Puerto Montt, Chile
[7] Agua Alta Ingeniería y Construcción SPA, Valdivia, Chile
[8] Centro Oceanográfico de Vigo, Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC), Vigo, España
* Autor de correspondencia: patricio.diaz@ulagos.cl

Las Floraciones Algales Nocivas (FAN), o más popularmente conocidas como mareas rojas, son eventos extremos de proliferaciones de microalgas que generan repercusiones negativas sobre la salud pública y las economías locales costeras (Díaz et al., 2019; Hallegraeff et al., 2021). Es la dimensión negativa o del daño causado lo que determina cuando una proliferación es considerada extrema o masiva (Berdalet et al., 2015). El perjuicio puede tener su origen tanto por una alta densidad microalgal, que ocasione mortandades importantes de peces u otros organismos debido a la anoxia generada, o por daño a la estructura o la fisiología de órganos, como las branquias de los peces, ya sea por efecto mecánico o por estrés oxidativo producido por especies reactivas del oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés) (Mardones et al., 2015). Además, las intoxicaciones a otros organismos o a seres humanos derivadas de ciertos metabolitos presentes en, o excretadas por, algunas de estas microalgas, y que son acumulados en la cadena trófica (principalmente por moluscos bivalvos o peces), ocasionan problemas de salud importantes, e incluso letales, a los humanos u organismos que los consumen (Díaz et al., 2022; Guzmán et al., 2002).

Esta problemática ha sido prioridad en diferentes programas de investigación a nivel global, debido a su tendencia creciente en intensidad, cobertura y recursos afectados (Berdalet et al., 2017; Kudela et al., 2017). Tal ha sido el impacto de este tipo de eventos que uno de los objetivos de desarrollo sostenible (objetivo 14, vida submarina), destinado a prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de cualquier origen, que puedan afectar negativamente a la salud del ecosistema marino y a la provisión sostenible de recursos y servicios, incluye a las FAN como un indicador (UN DESA, 2023).

Desafortunadamente para las actividades costeras, entre ellas la pesca artesanal y la acuicultura, el sistema de fiordos y canales de la Patagonia Chilena se ha convertido en una de las zonas de mayor recurrencia e intensidad de eventos FAN a nivel global (Díaz and Figueroa, 2023). En esta zona, se han registrado los eventos más intensos asociados a microalgas productoras de biotoxinas marinas, como *Alexandrium catenella* (Guzmán et al., 2002; Molinet et al., 2003) y *Dinophysis acuta* (Díaz et al., 2021), principales productores de toxinas paralizantes y diarreicas, respectivamente. Más aún, esta zona ha sido impactada por floraciones muy intensas de microalgas causantes de mortalidades masivas de salmones, como son *Pseudochattonella verruculosa* y *Heterosigma akashiwo*. La primera de ellas fue la responsable de uno de los eventos de mortalidad masiva de peces de cultivo más intensas a nivel mundial, en el verano de 2016, causando pérdidas cercanas a los 800 millones de dólares (León-Muñoz et al., 2018; Mardones et al., 2021). Mientras la segunda, produjo la mortalidad del 50% de la producción anual de salmones en 1988 (10,000 toneladas), de la incipiente industria salmonicultora de ese entonces, en el mar interior de Chiloé (Avaria et al., 1999; Díaz et al., 2019). Durante 1988 (floración de invierno tardío, en septiembre) se registraron densidades celulares de *Heterosigma akashiwo* cercanas a las 100,000 cel. mL^{-1}. La presencia de esta especie ha sido intermitente en el tiempo, pero en los últimos años ha mostrado una tendencia creciente y preocupante, generando dos importantes eventos en el sistema del fiordo Comau y en los canales adyacentes a Hornopirén, conocido como el barrio ACS 17B. El primero de estos eventos ocurrió en la cabecera del fiordo Comau, en abril de 2021, y generó mortalidades cercanas a 3,000 toneladas y pérdidas superiores a 4 millones de dólares (Díaz et al., 2023; Mardones et al., 2023). En este evento las densidades celulares superaron las 200,000 cel. mL^{-1}. El segundo, y más reciente evento, ocurrió nuevamente en abril de 2024 en Hornopirén, generó la mortalidad de 294 toneladas.



Figura 1: Fotografías aéreas que muestran las intensas manchas cafés generadas por las floraciones de *Heterosigma akashiwo* durante abril de 2021 (A) y 2024 (B-C) en el sistema fiordo Comau – Hornopirén.

Durante este evento se alcanzaron densidades celulares cercanas de 20,000 cel. mL^{-1} y al igual que en 2021, intensas manchas superficiales de color café en forma de filamentos fueron claramente apreciables (Figura 1).

Las floraciones de *Heterosigma akashiwo* no son exclusivas de Chile, ya que han sido detectadas en ambientes estuarinos en todo el mundo, incluyendo a Canadá, USA, Japón, Europa y Sudáfrica, donde han producido cuantiosas pérdidas a cultivos de peces marinos. Algunas de las floraciones mejor estudiadas ocurren casi todos los años a gran escala en el Estrecho de Georgia en la costa oeste de Canadá, forzando a la industria salmonera local a moverse cada vez más al norte, en un esfuerzo por evitarlas (Esenkulova et al., 2021). Estas floraciones también impulsaron a especialistas canadienses y de Estados Unidos de América a buscar soluciones prácticas para evitar mortalidades en los centros de cultivo, siendo esta la cuna de los sistemas que utilizan inyección de aire para reducir los efectos nocivos, aunque siempre se los aplicó con lonas que impidieran la entrada de las microalgas al centro de cultivo. Estos esfuerzos continúan en forma de consultores que trabajan junto a la industria, investigaciones en universidades locales y como parte de un programa de ciencia ciudadana que recopila información sobre el Estrecho de Georgia (comm. Pers. Jay Pudota).

Heterosigma akashiwo prolifera en estos ambientes en aguas de salinidad media (15-25 PSU), normalmente luego de ser reducida por la influencia de un río, como en el caso del Estrecho de Georgia, donde las floraciones dependen de la descarga del río Fraser. Dado esto, la mayor densidad celular en las floraciones se encuentra siempre en la superficie y en los primeros 5 a 10 metros, ya que a mayores profundidades la salinidad aumenta en sistemas estuarinos de los fiordos. Este comportamiento muestra su dependencia por la reducción en la salinidad debido al aumento de la descarga primaveral en ríos de deshielo u otros eventos que introduzcan grandes cantidades de agua dulce en sistemas estuarinos de mares fríos. Por lo mismo, esta dependencia hace que sus floraciones causen sorpresa y alarma en sistemas que no registran bajas de salinidad regulares.

La reciente floración de *H. akashiwo* ocurrida en los canales adyacentes a Hornopirén, coincide con la ocurrida en la misma zona y por la misma especie durante abril de 2021 (Figura 2). Aunque las ubicaciones no fueron idénticas, ambos eventos se originaron en el mismo sistema fiordo Comau – Hornopirén debido principalmente al aumento de la estratificación termo-halina de la columna de agua. Algunos perfiles verticales de CTD, realizados durante el evento de 2024 que se extendió por 3 semanas aproximadamente (2-24 abril), muestran claramente este proceso y la acumulación de células en la capa superficial, alcanzando valores cercanos a 20,000 cel. mL^{-1}, el 22 de abril, en canal Hornopirén (Figura 3). Estos perfiles muestran además que la concentración de clorofila *a* (medida a través del fluorometro del CTD) no siempre es un indicador directo de la densidad celular de la especie objetivo, debido a la composición de pigmentos que esta pueda tener y la presencia de otras especies fitoplanctónicas. En cualquier caso, las concentraciones de clorofila superficial fueron muy altos alcanzando valores cercanos a 100 µg L^{-1} en la estación 3 (Figura 3). Los máximos celulares de *H. akashiwo* registrados en superficie responden a la hora de muestreo (14:00 – 16:00h), debido a que esta especie tiene la capacidad de migrar verticalmente (Wada et al., 1985) y se agrupa en las capas superficiales durante las horas de mayor radiación donde es posible visualizar las manchas cafés superficiales (Figura 1). Este

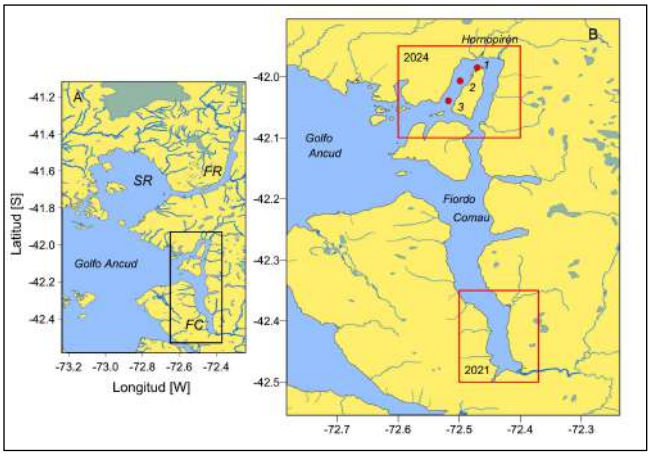


Figura 2: Área de estudio lo localizada en el mar interior de Chiloé (A) y sistema fiordo Comau – Hornopirén mostrando las zonas afectadas (rectángulos) por las floraciones de *Heterosigma akashiwo* en 2021 y 2024. Los círculos rojos indican la localización de tres estaciones monitoreadas en 2024.

comportamiento debe ser considerado cuando se diseñan estrategias de muestreo para estudiar esta especie.

La estratificación de la columna de agua ocurre cuando la densidad de la superficie del mar disminuye debido a cambios en la temperatura y salinidad del agua. En los fiordos y canales de la Patagonia la estratificación más intensa ocurre a finales del invierno e inicios de la primavera cuando la salinidad del agua disminuye debido al aporte de las aguas dulces derivadas del derretimiento glaciar. En ese momento se generan dos capas de agua de diferentes densidades favoreciendo el uso de los nutrientes acumulados en la superficie durante el invierno (Pérez-Santos et al., 2021). Así es como comienza la época productiva biológica dominada mayormente por el florecimiento de microalgas del grupo de las diatomeas, que en algunas ocasiones pueden generar mortalidades de peces debido a daños mecánicos en sus branquias. Por otro lado, cuando el aporte de agua dulce disminuye y avanzamos hacia el verano, la temperatura del agua se incrementa debido al aumento de la radiación solar, contribuyendo nuevamente con la intensificación de la estratificación de la columna de agua debido a la disminución de la densidad del agua por el incremento de la temperatura superficial. Todo esto modulado por la clara tendencia climática observada en las últimas décadas en la Patagonia Chilena, caracterizada por veranos más cálidos y secos, los cuales generan variaciones locales en la fenología de algunos procesos físico-químicos y, en conjunto, crean el caldo de cultivo óptimo para la proliferación de este tipo de microalgas tóxicas (Cassis et al., 2002).

Si bien se ha avanzado bastante en la identificación y parametrización de los factores ambientales, tanto a escala global como local, que modulan los eventos de FAN, aún estamos lejos de poder predecir cuándo (en escala de días), donde (a escala de fiordos o bahías) y que especie proliferará. Se espera que, en los próximos años, estos eventos continúen aumentando debido a las condiciones de emergencia climática actuales, donde la temperatura global ha ascendido por sobre los 1.5° C respecto a las condiciones del periodo pre-industrial (Díaz and Figueroa, 2023). 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". Aunque todavía es temprano afirmarlo, el caso de *H. akashiwo* parece ser claramente una de las especies ganadoras, tal como lo sugirió Wells et al. (2015).

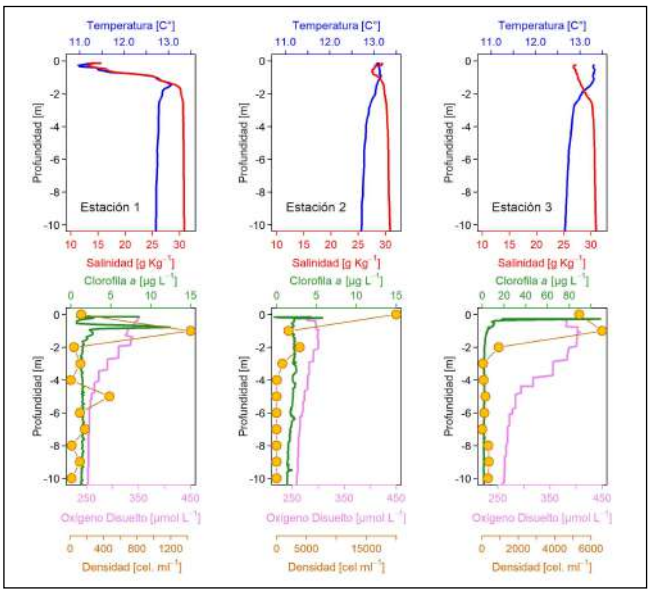


Figura 3: Perfiles verticales de condiciones hidrográficas entre superficie y 10 m de profundidad en las tres estaciones monitoreadas. Paneles superiores: Temperatura (°C) y salinidad (g kg-1). Paneles inferiores: Oxígeno disuelto (µmol L-1), clorofila a (µg L-1) y densidad celular de *Heterosigma* akashiwo (cel. mL-1).

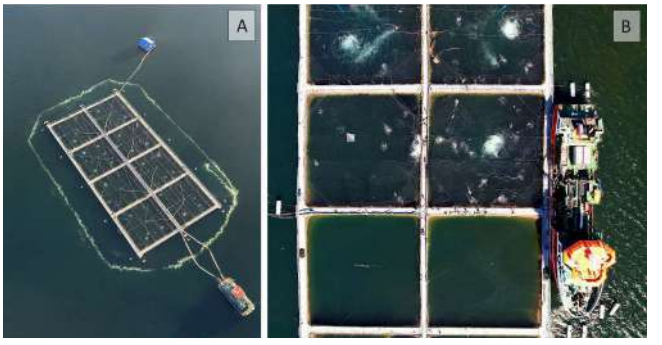


Figura 4: Mecanismos de mitigación utilizados durante la floración de *Heterosigma akashiwo* de 2024. A) Cortina de burbujas; B) Aireación por surgencia.

Considerando el escenario actual y futuro, es clave mantener y mejorar las acciones para enfrentar este tipo de episodios: i) mantener los programas de monitoreo ambiental activos todo el año; ii) fortalecer la colaboración público-privada para enfrentar los eventos FAN; iii) profundizar en la investigación básica realizando experimentos en terreno y laboratorios con especies de microalgas emergentes cuantificando sus potenciales impactos; iv) mejorar y diseñar nuevas medidas de manejo y mitigación (Figura 4); v) avanzar en modelos predictivos confiables y disponibles para todos los usuarios, considerando el nivel de las emergencias sanitarias registradas en la última década. Avanzar en cada una de estas acciones permitirá estar mejor preparados para afrontar los eventos futuros de FAN, que de acuerdo a la proyección climática seguirán en aumento en la Patagonia Noroccidental.

FINANCIAMIENTO

Este trabajo fue financiado por el proyecto RTI10-22 "Floraciones Algales Nocivas de Alta Biomasa en Seno Reloncaví: Explorando las causas y potenciales impactos" del Concurso Interno de "Redes

Territoriales de Investigación 2022" (Programa RTI) y el Observatorio Marino Reloncaví (OMARE), ambos de la Dirección de Investigación de la Universidad de Los Lagos.

REFERENCIAS

Avaria, S., Cáceres, M., Muñoz, P., Palma, S., Vera, P., 1999. Plan nacional sobre floraciones de algas nocivas en Chile, Valparaiso, Chile, p. 31 p.

Berdalet, E., Fleming, L.E., Gowen, R., Davidson, K., Hess, P., Backer, L.C., Moore, S.K., Hoagland, P., Enevoldsen, H., 2015. Marine harmful algal blooms, human health and wellbeing: challenges and opportunities in the 21st century. J. Mar. Biol. Ass. U.K. 96, 61-91.

Berdalet, E., Kudela, R., Urban, E., Enevoldsen, H., Banas, N.S., Bresnan, E., Burford, M., Davidson, K., Gobler, C.J., Karlson, B., Lim, P.T., Mackenzie, L., Montresor, M., Trainer, V.L., Usup, G., Yin, K., 2017. GlobalHAB: A new program to promote international research, observations, and modeling of harmful algal blooms in aquatic systems. Oceanography 30, 70-81.

Cassis, D., Muñoz, P., Avaria, S., 2002. Variación temporal del fitoplancton entre 1993 y 1998 en una estación fija del seno Aysén, Chile (45°26'S 73°00'W). Rev. Biol. Mar. Ocenog. 37, 43-65.

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., Álvarez, G., Pizarro, G., Blanco, J., Reguera, B., 2022. Lipophilic toxins in Chile: History, producers and impacts. Mar. Drugs 20, 122.

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-Uribe, 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.

Esenkulova, S., Suchy, K.D., Pawlowicz, R., Costa, M., Pearsall, I.A., 2021. Harmful algae and oceanographic conditions in the Strait of Georgia, Canada based on citizen science monitoring. Front. Mar. Sci. 8, 725092.

Guzmán, L., Pacheco, H., Pizarro, G., Alárcon, C., 2002. *Alexandrium catenella* y veneno paralizante de los mariscos en Chile, in: Sar, E.A., Ferrario, M.E., Reguera, B. (Eds.), Floraciones Algales Nocivas en el Cono Sur Americano. Instituto Español de Oceanografía, Madrid, pp. 235-255.

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.

Kudela, R.M., Berdalet, E., Enevoldsen, H., Pitcher, G., Raine, R., Urban, E., 2017. GEOHAB–The Global Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms Program: Motivation, goals, and legacy. Oceanography 30, 12-21.

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.

Mardones, J.I., Dorantes-Aranda, J.J., Nichols, P.D., Hallegraeff, G.M., 2015. Fish gill damage by the dinoflagellate *Alexandrium catenella* from Chilean fjords: Synergistic action of ROS and PUFA. Harmful Algae 49, 40-49.

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.

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

Pérez-Santos, I., Díaz, P.A., Silva, N., Garreaud, R., Montero, P., Henríquez-Castillo, C., Barrera, F., Linford, P., Amaya, C., Contreras, S., Aracena, C., Pinilla, E., Altamirano, R., Vallejos, L., Pavez, J., Maulen, J., 2021. Oceanography time series reveals annual asynchrony input between oceanic and estuarine waters in Patagonian fjords. Sci. Total Environ. 798, 149241.

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/.

Wada, M., Miyazaki, A., Fujii, T., 1985. On the mechanisms of diurnal vertical migration behavior of *Heterosigma akashiwo* (Raphidophyceae). Plant and Cell Physiology 26, 431-436.

Wells, M.L., Trainer, V.L., Smayda, T.J., Karlson, B.S., Trick, C.G., Kudela, R.M., Ishikawa, A., Bernard, S., Wulff, A., Anderson, D.M., Cochlan, W.P., 2015. Harmful algal blooms and climate change: Learning from the past and present to forecast the future. Harmful Algae 49, 68–93.