

Estructura y dinámica de los sistemas marinos de altas latitudes: Amenazas y desafíos derivados del cambio climático

La zona costera de la península Antártica es considerada un área de gran riqueza biológica, albergando abundantes poblaciones de aves y mamíferos marinos. Además, presenta una alta producción primaria, proceso clave en el flujo de carbono para mantener grandes poblaciones de kril, un componente importante del zooplancton antártico y eslabón fundamental en la trama trófica.

Características oceanográficas

Desde el comienzo de la revolución industrial, un sostenido y sin precedentes incremento de emisiones de gases invernadero ha conducido a un aumento en la temperatura global (calentamiento global) y los efectos se han registrado rápidamente en los distintos océanos, tales como el incremento de la temperatura superficial del mar, la desoxigenación, los procesos de acidificación del océano y desalinización (*freshening*) de la superficie del mar.

Estos impactos son más evidentes y críticos en los sistemas marinos polares y subpolares de aguas frías (por ejemplo, el Ártico y la Antártica). El océano Austral (OA), que rodea la Antártica, comprende alrededor de un 20 % del área cubierta por los océanos en el mundo, extendiéndose desde el continente antártico hasta la convergencia subtropical (30-50° S), correspondiendo a un sistema oceanográfico de gran escala dominado por la Corriente Circumpolar Antártica y la Corriente Costera Antártica.

El OA es una de las principales cuencas con mayor volumen de agua de mar que transporta y distribuye elementos importantes, tales como oxígeno disuelto y nutrientes a los otros océanos.

Además, alrededor de la Antártica hay una serie de frentes oceanográficos (por ejemplo, el Frente Polar), entre los que se distinguen distintas masas de agua con características físicas y químicas propias que dan como resultado la definición de diferentes provincias oceanográficas.

Por un lado, la zona costera de la península Antártica es considerada un área de gran riqueza biológica, albergando abundantes poblaciones de aves y mamíferos marinos. Además, presenta una alta producción primaria, proceso clave en el flujo de carbono para mantener grandes poblaciones de kril, un componente importante del zooplancton antártico y eslabón fundamental en la trama trófica. Las aguas de la zona costera de la península Antártica e islas Shetland del Sur, incluyendo el estrecho de Bransfield, presentan altas concentraciones de biomasa de plancton, con una gran variabilidad estacional concentrada entre finales de primavera e inicio de verano.

Por otro lado, en zonas oceánicas como el paso Drake, el mar de Weddell y mar de Escocia, la producción primaria tiende a ser baja y forma parte de los ecosistemas globales de altos nutrientes y bajas concentraciones de biomasa fitoplanctónica.

Diversas hipótesis se han postulado para resolver este tópico y donde destaca la carencia de hierro (Fe) como recurso limitante (Martin *et al.*, 1990). En fiordos de altas latitudes, resalta la gran

variabilidad estacional, donde en invierno una limitación por luz y nutrientes condiciona un estado trófico de heterotrofia, con altos procesos de remineralización de materia orgánica y liberación de CO₂, lo que agudiza los procesos de acidificación del océano y dominancia de la trama trófica microbiana (figura 1, panel izquierdo). Contrariamente, durante la época productiva (primavera-verano), la gran influencia del agua dulce aumenta la estabilización de la columna de agua (Höfer *et al.*, 2019), introduce nuevos nutrientes y genera eventos de alta producción primaria y secundaria (figura 1, panel derecho).

Entrada de agua dulce al océano desde sistemas de glaciares

Desde 1960, los sistemas de glaciares han perdido globalmente 9.000 Gt (1 GT=10¹² kg), lo que sería equivalente a un gran cubo de hielo de 12 m de altura que cubre toda la superficie de Chile (Zemp *et al.*, 2019).

En la región antártica, la mayor pérdida de masa de hielo se ha registrado en el oeste de la península Antártica (PA). La evidencia científica sobre el efecto de la reducción de salinidad en

organismos pelágicos y bentónicos a lo largo del tiempo aún es escasa, al igual que la potencial introducción de nuevos microorganismos latentes en las masas de hielo milenarias (por ejemplo, Larsen C) que derivan en el sistema marino.

En la Antártica, los "icebergs" que se desprenden de la plataforma de hielo son probablemente la mayor fuente de hierro a los sistemas acuáticos costeros, con valores promedio entre 100 y 1.000 nmol TdFe L⁻¹ en las bahías Sur y Fildes (Hopwood M., datos no publicados). Sin embargo, el hierro se encuentra distribuido en forma muy irregular al interior del hielo, afectando la tasa a la cual este hierro se libera durante el derretimiento del hielo y la subsecuente productividad local.

Acidificación del océano Austral: un riesgo potencial

En la actualidad se ha observado un gran cambio en la química del agua del océano global en relación con el aumento rápido de emisión antropogénica de dióxido de carbono (CO₂), que ha elevado su concentración en la atmósfera, desde un nivel preindustrial de 280 ppm hasta un nivel actual de 410 ppm,



Humberto E. González

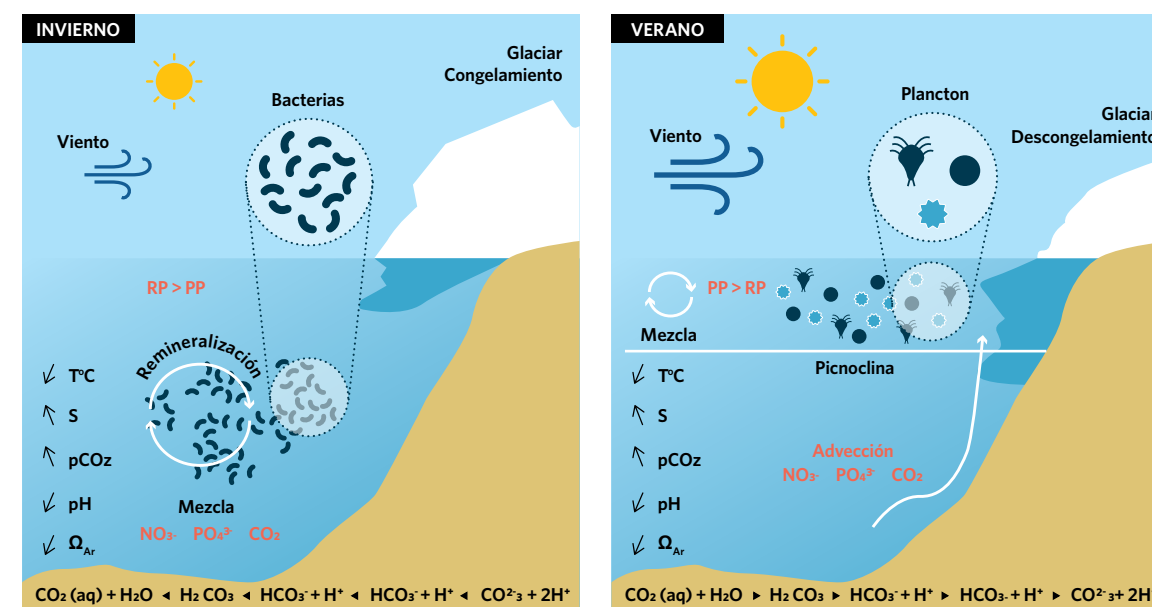
Universidad Austral de Chile y Centro de Investigaciones sobre Dinámica de Ecosistemas Marinos de Altas Latitudes (FONDAP-IDEAL)



José Luis Iriarte

Universidad Austral de Chile y Centro de Investigaciones sobre Dinámica de Ecosistemas Marinos de Altas Latitudes (FONDAP-IDEAL)

1 Esquema conceptual de la dinámica estacional durante invierno (panel izquierdo) y verano (panel derecho), de factores/procesos químicos-físicos y biológicos en fiordos de altas latitudes (subantárticos y antárticos) con influencia de glaciar.



principalmente derivado de la quema de combustibles fósiles.

Como una consecuencia, ha aumentado un tercio de CO₂ antropogénico absorbido por los océanos, causando una modificación en la química de los carbonatos y una disminución del valor de pH. A esta perturbación ambiental se le denomina "acidificación de los océanos" (AO) y describe los cambios de concentración de protones (H⁺), CO₂, bicarbonato y carbonatos en los océanos.

Las escasas series de tiempo han permitido modelar escenarios pasados y futuros del estado de saturación del carbonato de calcio en los océanos de aguas frías superficiales, como las regiones polares del océano Austral. Los resultados obtenidos en masas de agua frías sugieren que la subsaturación de aragonita y calcita se presentarán cuando la pCO₂ alcance 600 y 900 \times atm, respectivamente, sugiriendo lo variable y vulnerable que puede llegar a ser el océano Austral respecto de los cambios de la química de sus aguas (Bates *et al.*, 2014).

Frente a estas tendencias, se recomienda realizar estudios para determinar los principales factores que están relacionados con los cambios en la química del agua (por ejemplo, calentamiento superficial del océano, mayor magnitud de vientos) en zonas con alta vulnerabilidad a la acidificación en zonas de altas latitudes.



Cambio en las tramas tróficas y flujos de carbono

El cambio climático puede inducir cambios importantes en la estructura de las tramas tróficas antárticas. Durante la LIII Expedición Científica Antártica (ECA 53, 2017), las temperaturas superficiales de hasta 2 °C en las bahías Fildes y Sur, resultaron en una gran abundancia de salpas que fueron reemplazadas por kril durante las ECA 54 (2018) y 55 (2019) cuando la superficie del océano alcanzó solamente 0,5 °C y el flujo de material particulado estuvo dominado por fecas de kril (figura 2).

Los eufáusidos son más dependientes de los crecimientos masivos de fitoplancton y de la extensión de hielo que las salpas, donde el cambio climático ha sido reportado como un componente importante de la disminución de la biomasa de kril, concomitante con un incremento de salpas (Atkinson *et al.*, 2004). Un posible cambio de organismos quitinosos (kril, copépodos) a gelatinosos (salpas, sifonóforos), tendrá efectos negativos profundos en la estructura de las tramas tróficas y flujos de carbono del océano Austral.

Conclusiones y recomendaciones

Los sistemas marinos de aguas frías son muy vulnerables a los efectos del aumento de la temperatura, principal-

mente por el efecto directo de una significativa transferencia de calor a la capa superficial. Los cambios en los patrones de vientos y de circulación inciden en el transporte de calor desde masas profundas a las grandes plataformas de hielo continental y flotantes. Se proyecta que la pérdida de masa de hielo en la Antártica podría causar hasta un metro de incremento del nivel del mar a fines de siglo, usando un modelo CRP8,5 (Bronseleer *et al.*, 2018), además de incidir en una menor capacidad de solubilidad de gases claves para la vida (oxígeno) y de mitigación climática (CO₂).

La entrada de agua dulce de origen glaciar disminuye la salinidad y estratifica la columna de agua, aportando materia orgánica disuelta (carbono orgánico) y particulada, además de material inorgánico disuelto (hierro, macronutrientes). Estos componentes juegan un papel importante en la productividad y los ciclos biogeoquímicos de estos ecosistemas.

Se requiere un mayor esfuerzo de muestreo de largo plazo (décadas) con sistemas automáticos/autónomos, que permitan coleccionar información oceanográfica durante todo el año, incluyendo los meses de invierno de condiciones extremas (figura 3). Esto para poder estudiar la variabilidad estacional e interanual, lo que mejoraría substan-



3 Primer anclaje oceanográfico del proyecto FONDAP-IDEAL en bahía Sur, Isla Doumer (lugar donde se ubica la base científica "Yelcho", del INACH). Izquierda: instalación de la línea con sensores de temperatura, salinidad y presión parcial de CO₂. Derecha: instalación de la trampa de sedimento automática.

cialmente nuestros modelos climáticos predictivos y estimaciones de escenarios de cambio climático futuros.

Las observaciones sostenidas en el tiempo de estos parámetros brindan datos importantes para comprender el fenómeno de acidificación de los océanos, mediante series de tiempo en distintas regiones oceánicas de períodos que van más allá de los 15 años. Estas series de tiempo deben generar una gran cantidad de datos físicos y biogeoquímicos que serán utilizados para describir tendencias de largo plazo, probar hipótesis y predicciones sobre la respuesta y funcionamiento del océano Austral.

El desafío de mitigar el cambio climático en sistemas antárticos debería considerar los flujos naturales de exportación de carbono orgánico e inorgánico, como la bomba de solubilidad (o física) y la bomba biológica carbono (tanto gravitacional como la activa).

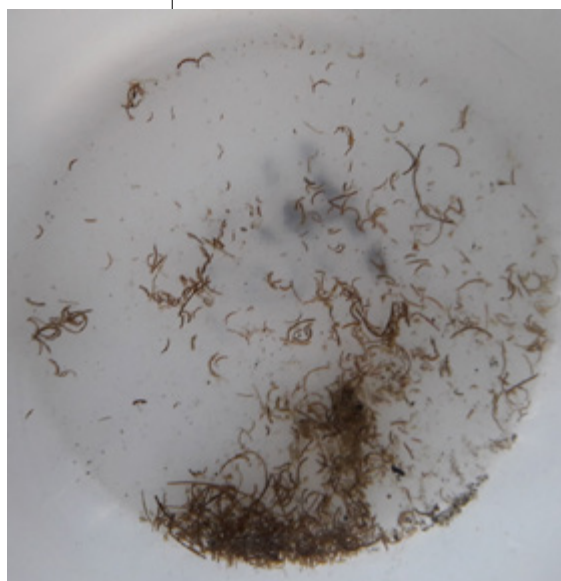
Contrariamente, parece haber un consenso en la comunidad científica respecto de no usar la metodología de reducción de carbono atmosférico a través de la "geoingeniería del océano", principalmente por no haber certeza de las posibles alteraciones y cambios que estas metodologías pudiesen causar al medioambiente (ver Boyd & Vivian 2019).

Otra alternativa es proteger (por ejemplo, con la disminución de pes-

querías) a los grupos funcionales que exportan carbono orgánico a través de la bomba biológica de carbono, como el kril, apendicularias y otros que producen grandes fecas (figura 2), que tienen una gran tasa de hundimiento y que pueden ser exportadas a grandes profundidades antes de ser recicladas.

Conocer en mayor detalle la conexión entre forzamiento físico y la respuesta biológica en ecosistemas costeros de la zona de la península Antártica es relevante, dado el actual escenario de cambio climático y el efecto esperado de estos cambios en el forzamiento físico sobre la composición y productividad de la comunidad fitoplanctónica (Deppeler & Davidson 2017).

Estos cambios pueden afectar la cantidad y calidad de alimento disponible (como producción de carbono) para niveles tróficos superiores, alterando la productividad secundaria y la estructura de la trama trófica al norte de la península Antártica (Moline *et al.*, 2001, 2004). •



2 Material colectado en trampas de sedimento instaladas por períodos de dos días a 50 m de profundidad en la bahía Sur durante 2018. El material colectado corresponde a pellet fecales de kril.

Referencias

Atkinson A., S. Pakhomov & P. Rothery (2004) Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature* 432: 100-103. doi:10.1038/nature02996

Bates, N., Astor, Y., Church, M., Currie, K., Dore, J., González-Dávila, M., Lorenzoni, L., Muller-Karger, F., Olafsson, J., & Santa-Casiano, M. (2014). A Time-Series View of Changing Ocean Chemistry Due to Ocean Uptake of Anthropogenic CO₂ and Ocean Acidification. *Oceanography* 27, 126-141. doi.org/10.5670/oceanog.2014.16

Boyd P.W., H. Claustre, M. Levy, D.A. Siegel & T. Weber (2019). Multi-faceted particles pumps driven carbon sequestration in the ocean. *Nature* doi.org/10.1038/s41586-019-1098-2

Boyd P.W. & C. Vivian (2019). Should we fertilize oceans or seed clouds? No one knows. *Nature* 570: 155-157.

Bronseleer B., M. Winton, S. M. Griffies, W. J. Hurlin, K. B. Rodgers, O. V. Sergienko, R. J. Stouffer & J. L. Russell (2018) Change in future climate due to Antarctic meltwater. *Nature* 564: 53-58.

Deppeler S.L. & A.T. Davidson. (2017). Southern Ocean Phytoplankton in a Changing Climate. *Frontiers in Marine Science*, doi: 10.3389/fmars.2017.00040.

Höfer J., R. Giesecke, M. J. Hopwood, V. Carrera, E. Alarcón & H. E. González (2019) The role of water column stability and wind mixing in the production/export dynamics of two bays in the Western Antarctic Peninsula. *Progress in Oceanography* 174: 105-116.

Martin J. H., R. M. Gordon & S. E. Fitzwater (1990) Iron in Antarctic waters. *Nature* 345: 156-158.

Moline M.A., H. Claustre, T.K. Frazer, O. Schofield & M. Vernet. (2004). Alteration of the food web along the Antarctic Peninsula in response to a regional warming trend. *Global Change biology* 10(12): 1973-1980.

Moline M.A., H. Claustre, T.K. Frazer, J.O.E. Grzymiskj, O. Schofield & M. Vernet. (2001). Changes in phytoplankton assemblages along the Antarctic Peninsula and potential implication for the Antarctic food web. *Antarctic Ecosystems: Models for Wider Ecological Understanding*, 263-271.

Zemp, M. Huss, E. Thibert, N. Eckert, R. McNabb, J. Huber, M. Barandun, H. Machguth, S. U. Nussbaumer, I. Gärtner-Roer, L. Thomson, F. Paul, F. Maussion, S. Kutuzov & J. G. Cogley (2019). Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature* 568, doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0