

Figura 2 Luego de la Revolución Industrial, el exceso en la producción de gases de efecto invernadero, como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>), ha incrementado de manera exponencial en la atmósfera, proceso en gran parte responsable del fenómeno denominado cambio climático. Entre las consecuencias del cambio climático, una de las más importantes es el progresivo aumento en las temperaturas medias del mar. El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, en sus siglas en inglés) ha predicho que las temperaturas del mar podrían subir entre 2 y 6 °C para fines del siglo XXI.

En este contexto, se ha determinado que la península Antártica será uno de los lugares del planeta más afectados por los aumentos de temperaturas derivados del cambio climático, poniendo en riesgo un porcentaje importante de organismos con alto valor ecológico.

Es importante considerar que las macroalgas son base de las cadenas tróficas en ecosistemas templados y polares, por lo que su presencia y prevalencia es determinante para el equilibrio de ecosistemas con gran diversidad ecológica y relevancia económica.

Dirigidos por los doctores Claudio Sáez Avaria y Paula Celis Plá, respectivamente, ambos de la Universidad de Playa Ancha (UPLA) y, en un esfuerzo internacional que incluyó a los doctores Fernanda Rodríguez y Céline Lavergne (UPLA), Nelso Navarro (Universidad de Magallanes), Pirjo Huovinen e Iván Gómez (Universidad Austral de Chile), Alejandra Moenne (Universidad de Santiago de Chile) y Murray T. Brown (University of Plymouth; Reino Unido), realizaron una ambiciosa investigación conducente a entender las respuestas y el potencial de sobrevivencia de las macroalgas del intermareal costero de la península Antártica ante futuros incrementos de temperatura asociados al cambio climático.

Estas investigaciones "Respuestas bioquímicas y moleculares revelan mecanismos de tolerancia en macroalgas de la Antártica para prosperar bajo cambio climático" y RG\_10\_18 ("Respuestas fotoprotectoras en macroalgas marinas antárticas, debido a condiciones de estrés por cambio climático"), contaron con el financiamiento INACH rt\_09\_16.

Macroalgas marinas antárticas En este contexto, la información recopilada permitiría concluir que, por lo menos en términos de incrementos de temperatura, las especies estudiadas de macroalgas intermareales verdes, rojas y pardas podrían desplegar mecanismos de tolerancia suficientes para contrarrestar y sobrevivir ante escenarios pesimistas de cambio climático para fines del siglo XXI. No obstante, existe la posibilidad que algunas especies puedan modificar su cobertura latitudinal y, eventualmente, su distribución hacia el sur dentro de la península Antártica.

Las especies de macroalgas verdes, rojas y pardas *Monostroma harti*, *Pyropia endiviifolia* y *Adenocystis utricularis*, respectivamente, utilizadas como modelos de estudio para esta investigación, fueron colectadas en punta Artigas (62° 02' 00" S; 58° 21' 00" O; fig. 1). Luego, en el laboratorio, se sometieron a 2 °C (temperatura promedio en verano austral actual) y 8 °C (según predicciones negativas para fines del siglo XXI por IPCC) por hasta cinco días; lo anterior, en la base "Profesor Julio Escudero", del INACH, en la isla Rey Jorge, península Antártica. Se determinaron una serie de parámetros a distintos niveles de organización biológica. En términos ecofisiológicos, se midieron indicadores asociados a la fluorescencia in vivo de la clorofila a del fotosistema II de los cloroplastos de las macroalgas. Por otra parte, a nivel bioquímico, se estudiaron respuestas antioxidantes y síntesis de compuestos antioxidantes asociados al ciclo de la glutatión - ascorbato, conocido como el sistema de control redox más importante en organismos fotosintéticos.

Finalmente, en términos moleculares, se determinaron los niveles de expresión de genes que codifican por enzimas antioxidantes y proteínas de shock térmico (hsp como son conocidas por sus siglas en inglés) para la especie de macroalga *P. endiviifolia*, estas últimas conocidas por tener un rol sustancial en la reparación de proteínas desnaturalizadas por incrementos de temperatura. Los resultados proporcionaron interesantes nociones de cómo responderían estas macroalgas en los próximos años. Por unaparte, los datos fotosintéticos no evidenciaron patrones que indicaran que los incrementos de temperatura indujeran una afectación a nivel ecofisiológico en *M. harti*, *P. endiviifolia* y *A. utricularis*. Por otra parte, a nivel bioquímico, no se evidenciaron incrementos en las concentraciones de especies reactivas de oxígeno que pudieran asociarse a altas temperaturas, por lo que la información indicaría un buen control y prevención de estrés oxidativo. Esto fue confirmado por los niveles de peroxidación de lípidos, indicador de daño oxidativo, sin cambios aparentes inducidos por los incrementos a 8 °C.



Los doctores Paula Celis Plá y Carlos Sáez Avaria, UPLAAsí también, los niveles de glutatión y ascorbato, importantes compuestos antioxidantes celulares, se mantuvieron principalmente en sus formas reducidas en todas las especies estudiadas, evidenciando buen reciclaje y síntesis para mantenerlos controlados y evitar el daño oxidativo, como fue confirmado anteriormente. En el caso de *P. endiviifolia*, se observó un aumento en la expresión de las enzimas antioxidantes testeadas (superóxido dismutasa, ascorbato peroxidasa y glutatión reductasa), principalmente a los tres días de exposición a incrementos de temperatura.

Asimismo, se estudió la expresión de 5 hsp de distinta masa molecular; la mayoría de estas hsp mostraron mayores niveles de expresión a los tres y cinco días de exposición a 8°C en comparación a temperatura control de 2 °C. Un resumen infográfico de los principales hallazgos puede verse en la figura 2. Los resultados de la presente investigación demostraron que en términos ecofisiológicos y de metabolismo antioxidante, las macroalgas de la península Antártica pudieron sobrellevar de buena manera los incrementos de temperatura a las que fueron expuestas. A nivel transcriptómico, el estudio sugiere que las macroalgas inducen mayores niveles de expresión de proteínas asociadas a mecanismos de tolerancia al potencial estrés que puedan provocar los aumentos de temperatura. Lo anterior, indicaría que este proceso sería una estrategia celular para mantener proteínas con rol en la tolerancia a ciertos niveles, suficientes para evitar estrés y daño celular que pueden causar aumentos de temperatura ambiental. Esta investigación proporciona uno de los primeros antecedentes holísticos a distintos niveles de organización biológica acerca de las potenciales respuestas de macroalgas polares antes futuras condiciones de cambio climático.

Estos hallazgos han sido publicados recientemente en la prestigiosa revista internacional *Science of the Total Environment* (volumen 740, artículo 140379 del 2020). Algunos nuevos avances pendientes dentro de estos proyectos de investigación, serán entregados por los primeros transcriptomas completos de macroalgas del intermareal antártico, información que permitirá profundizar aún más en respuestas y potenciales mecanismos de adaptación a próximos escenarios de cambio climático en zonas polares del planeta.