



MESA CRIÓSFERA
Y ANTÁRTICA

Criósfera y Cambio Climático

50 preguntas y respuestas



COP25
CHILE
2019

COMITÉ
CIENTÍFICO

COP25CHILE

Colaboradores

Coordinador mesa Criósfera: Humberto E. González

Revisión científica: Francisco Cereceda-Balic, Raúl Cordero, José Luis Iriarte, Marius Schaefer

Autores: Paulina Aldunce, Claudia Andrade, Jahir Anicama, Patricio Arana Espina, Guillermo Azócar Sandoval, Léa Cabrol, Jorge Carrasco, Angélica Casanova-Katny, Lohengrin Cavieres, Francisco Cereceda-Balic, Duncan Christie, Pedro Cid-Agüero, Raúl R. Cordero, Sebastián Andrés Crespo, Alessandro Damiani, Alejandro Dussailant-Jones, Alfonso Fernández, Camila Fernández, Francisco Fernandoy, Máximo Frangopulos, Felipe Fuentes, José Garcés-Vargas, Ayôn García, Ricardo Giesecke, María Angélica Godoi Millán, Iván Gómez Ocampo, Inti González, Humberto E. González, Juan Höfer, José Luis Iriarte, Pablo Iribarren Anacona, Fabrice Lambert, Marcelo Leppe, Shelley MacDonell, Francisco Matus, James McPhee, Mireia Mestre Martín, Jorge Navarro Azócar, Nelso Navarro, Luis Miguel Pardo, Gemita Pizarro, Elie Poulin, Marius Shaefer, Marcelo Somos, Felipe Ugalde y Pablo Wainstein

Coordinación ejecutiva: Daniela Benavente

Edición: María Inés Pérez A.

Diagramación: Gerardo López Rübke



Citación sugerida: Comité Científico COP25 (2019). *Criósfera y cambio climático: 50 preguntas y respuestas*, Santiago, Chile.

© Comité Científico COP25

Libro sujeto a indexación formal y trámites de número de identificación



Agradecimientos

El Comité Científico COP25 y su equipo de gestión agradecen la participación y motivación a los integrantes de la mesa Criósfera y Antártica y especialmente a los colegas que colaboraron con esta publicación, ya sea como autores o con textos, fotos, datos e infografías.

Especial agradecimiento al Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación, a la Unión Europea, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe de Naciones Unidas (CEPAL) y a las instituciones de afiliación de los autores por sus aportes financieros y las facilidades dadas a sus investigadores.

Los contenidos de esta publicación son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no reflejan necesariamente las posiciones de estas instituciones.

Créditos fotográficos

Andrea Navarro: pp. 11-12-13-16-23-28-36--42-50-56-66-71-76-86-93-95-100-110
Paulina Möller p. 80 / Humberto E. González pp. 8-30-38 / Ricardo Giesecke pp. 21- 46.



Índice

Prólogo, 8

Causas y bases de entendimiento, 13

1. ¿Qué es la criósfera?, 14
2. ¿Por qué es importante la criósfera?, 15
3. ¿Cuándo y cómo se formó la Antártica?, 17
4. ¿Por qué la cobertura de hielo marino sobre el océano Austral (Antártica) se forma y derrite cada año?, 18
5. ¿Existen diferencias entre los glaciares de la Antártica y de montaña?, 20
6. ¿Cómo es el clima en la Antártica?, 22
7. ¿Es importante la Antártica en el clima del planeta?, 24
8. ¿Cómo sabemos que la Antártica se está calentando?, 25
9. ¿Cuáles son los principales riesgos del cambio climático en la criósfera?, 27
10. ¿Qué es el albedo de la nieve y cómo afecta a la criósfera y al cambio climático?, 29
11. ¿Qué es el bioalbedo y cómo afecta a la criósfera?, 31
12. ¿Por qué el cambio climático afecta más al Ártico que a la Antártica?, 33
13. ¿Qué es la oscilación antártica?, 35
14. ¿Qué es el agotamiento de ozono?, 37

- 
15. ¿Qué relación tiene el cambio climático con los niveles de ozono sobre la Antártica?, 39
 16. ¿Influye la concentración de CO₂ en la atmósfera, sobre la extensión del hielo en la Antártica?, 41
 17. ¿Qué es el carbono negro (*black carbon*) y el carbono café (*brown carbon*)?, 43
 18. ¿Cómo el aumento de gases de efecto invernadero en el hemisferio norte puede afectar a la Antártica?, 45
 19. ¿Cómo afecta la contaminación atmosférica a la criósfera?, 47
 20. ¿Cuál es la principal corriente del océano austral?, 51
 21. ¿Cómo se originan las corrientes y la masa de agua más fría en la Antártica?, 53
 22. ¿Los eventos El Niño se pueden percibir en la Antártica?, 54
 23. ¿Los fiordos con glaciares que terminan en el mar, se convertirán en fiordos con glaciares terrestres debido al cambio climático?, 55
 24. ¿Contribuye el derretimiento de la Antártica al alza del nivel del mar?, 57
 25. ¿Será afectada la fauna marina antártica?, 59
 26. ¿Cómo puede ocurrir un lago represado por glaciar, y por qué puede vaciarse repentinamente?, 61
 27. ¿Qué son los glaciares, los rocosos o de rocas?, 63
 28. ¿Estuvo la Antártica alguna vez poblada por bosques y grandes reptiles?, 65
 29. ¿Qué son las algas de nieve?, 67
 30. ¿Qué tipo de vegetación existe en la Antártica?, 69
 31. ¿Qué cambios están ocurriendo en la tundra polar antártica como consecuencia del calentamiento?, 70
 32. ¿Qué cambios podrían ocurrir en la vegetación altoandina como consecuencia del calentamiento?, 72



Consecuencias globales, 76

- 33. ¿Cómo afecta al cambio climático lo que le ocurrirá al permafrost?, 77
- 34. ¿Cuáles son las consecuencias del cambio climático en las áreas de alta montaña?, 79
- 35. ¿La Antártica se puede acidificar y cuáles organismos son más afectados por este proceso?, 81
- 36. ¿Cómo afecta el derretimiento de la criósfera a los organismos marinos?, 83
- 37. ¿Cómo el cambio climático podría afectar a los organismos que viven en el fondo marino en la Antártica?, 85
- 38. ¿Cómo afecta el cambio global a los microorganismos de sistemas polares?, 87
- 39. ¿Cómo afecta el derretimiento de los glaciares a los organismos marinos de altas latitudes?, 88
- 40. ¿Cómo cambian las poblaciones de pingüinos con el cambio climático en la Antártica?, 90

Consecuencias para Chile, 93

- 41. ¿Cómo ha influido la Antártica en los cambios recientes en el clima de Chile?, 94
- 42. ¿Cómo afecta al balance hídrico el retroceso de los glaciares en Chile?, 96
- 43. ¿A qué tasa se están derritiendo los glaciares de montaña en Chile?, 97
- 44. ¿En qué forma la contaminación antropogénica (actividades mineras, extractivas) está afectando a los glaciares de los Andes?, 98
- 45. ¿Qué es el ambiente periglacial y cuál es el impacto del cambio climático sobre él?, 99
- 46. ¿Existe evidencia del proceso de acidificación en los mares interiores de la Patagonia norte?, 101



Mitigación, adaptación, soluciones basadas en la naturaleza, 104

- 47. ¿Cómo se puede mitigar el calentamiento global desde los sistemas de suelos de altas latitudes?, 105
- 48. ¿Qué es la vulnerabilidad al cambio climático en sistemas de altas latitudes?, 107
- 49. ¿Son los glaciares los "ahorros del futuro" para los sistemas de gestión del agua en Chile?, 109
- 50. ¿Qué acciones y soluciones tecnológicas se deben aplicar para mitigar el impacto de la actividad humana sobre la criósfera?, 111

Referencias, 113

Glosario, 115

Autores, 120

Enlaces, 124

Prólogo





Prólogo

La criósfera comprende las partes de la Tierra donde encontramos agua en estado sólido: nieve, glaciares, hielo marino, mantos de hielo y suelos congelados (permafrost). El territorio chileno posee todos estos componentes, pero de ellos, los más relevantes son los glaciares, con alrededor de 24 000 km² (3 % del área mundial).

Sin embargo, los glaciares están en franco retroceso debido al cambio climático. Su distribución varía con la altitud y latitud, con un gradiente desde los Andes Norte y Centro (4.4 %), a la región centro-sur (6.2 %) hasta alcanzar su mayor extensión en la zona de la Patagonia y Tierra del Fuego (89.3 %). La pérdida de masa de hielo en la cordillera de los Andes ha sido de 23 gigatoneladas en los últimos veinte años. Preocupante aspecto, por ser el recurso agua uno de los que está más amenazado actualmente en la zona centro-norte del país.

En el marco del cambio climático, la Antártica presenta procesos antagónicos y sinérgicos. Las aguas muy frías del océano tienen una gran capacidad para exportar carbono desde la atmósfera y ejercer un importante control sobre el clima regional y global. No obstante, el calentamiento global está derritiendo una parte de la cobertura de hielo, lo cual libera el hierro atrapado en su interior y potencia la productividad y exportación de carbono al fondo del océano (que estaba originalmente como CO₂ en la atmósfera). Sin embargo, esta capacidad del océano de capturar CO₂ se contrapone con el riesgo de incrementar su acidificación.



El planeta está frente a una emergencia climática. En general, los seres humanos tienden a reaccionar con parsimonia frente a cambios y perturbaciones de largo período (ej., sequía, contaminación), y con rapidez en caso de fenómenos de corto período (ej. terremotos, tsunamis, incendios). Chile ha dado pruebas de ello ante desastres naturales, exacerbados ahora por los eventos climáticos extremos derivados del cambio climático. El cual, hoy en día, exige actuar con urgencia y de manera comprometida y proactiva con el medioambiente y sus habitantes.

La comunidad científica tiene la responsabilidad de conectar estos temas con la sociedad entera; en este escenario, este libro de preguntas y respuestas sobre la criósfera tiene la finalidad de afianzar estos puentes de comunicación entre la academia y la sociedad.

Dr. Humberto E. González, Coordinador Mesa Criósfera-Antártica
Dra. Maisa Rojas, Coordinadora Científica
Comité Científico COP25

HIELOS ANTÁRTICOS

99.68%

de la superficie de la Antártica
está cubierta de hielo.

Esto corresponde a

26 920 000 km³
de hielo

HIELOS ANTÁRTICOS

¿SABÍAS QUÉ?

La Antártica ha
perdido

125

GIGATONELADAS^(*)
de hielo cada año, entre
2002 y 2016

**ESPESOR DE
LA CAPA DE HIELO
ANTÁRTICO**

El máximo conocido
es de **4.8 km** (en Tierra
Adelia)

El medio es de
2.16 km



LOS ICEBERGS O TÉMPANOS

Solo muestran sobre el agua, la octava parte de su volumen total, lo que hace que su parte sumergida puede alcanzar dimensiones enormes

**SI TODO EL HIELO
ANTÁRTICO
SE DERRITIERA**

El nivel del océano se
incrementaría en

58m



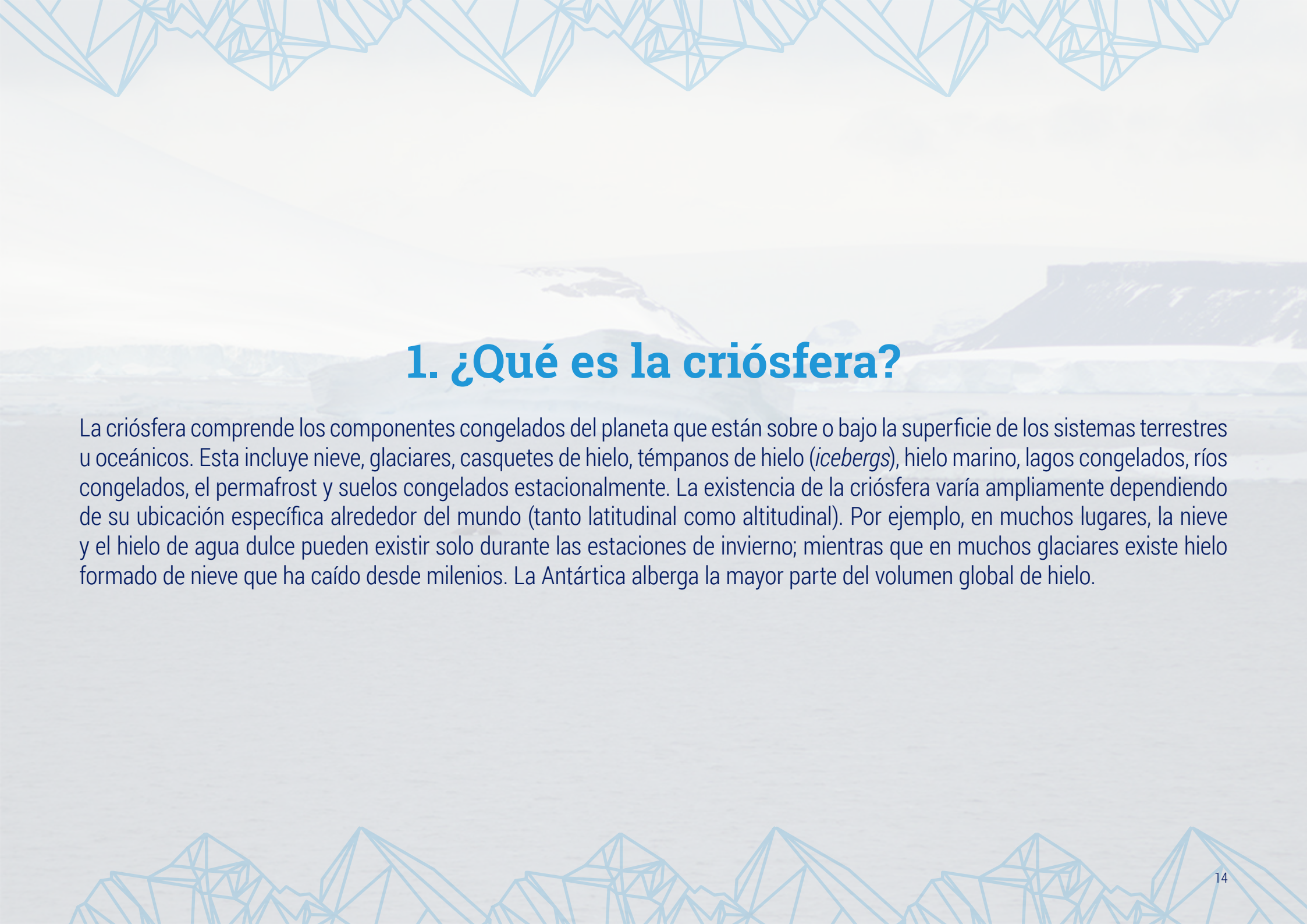
**VOLUMEN DEL
HIELO ANTÁRTICO**

Alcanza los
**26.9 millones
de km³**

(*) Mil millones de toneladas equivalen a una gigatonelada.

A photograph of an Arctic landscape featuring large icebergs floating in dark water. In the background, there are snow-covered mountains under a cloudy sky. Two whales are visible in the water in the foreground. A decorative graphic on the left side consists of white geometric lines forming a series of triangles, with one triangle filled with a solid teal color.

Causas y bases de entendimiento



1. ¿Qué es la criósfera?

La criósfera comprende los componentes congelados del planeta que están sobre o bajo la superficie de los sistemas terrestres u oceánicos. Esta incluye nieve, glaciares, casquetes de hielo, témpanos de hielo (*icebergs*), hielo marino, lagos congelados, ríos congelados, el permafrost y suelos congelados estacionalmente. La existencia de la criósfera varía ampliamente dependiendo de su ubicación específica alrededor del mundo (tanto latitudinal como altitudinal). Por ejemplo, en muchos lugares, la nieve y el hielo de agua dulce pueden existir solo durante las estaciones de invierno; mientras que en muchos glaciares existe hielo formado de nieve que ha caído desde milenios. La Antártica alberga la mayor parte del volumen global de hielo.

2. ¿Por qué es importante la criósfera?

La criósfera desempeña un papel importante en el clima global al influir en la hidrología, las nubes, la precipitación y la circulación de la atmósfera y los océanos. De ahí, su superposición con la hidrósfera. Los investigadores del clima confían en las mediciones de la criósfera para obtener información sobre el cambio climático global, basados en tres de sus propiedades: (a) *Reflectancia* de la superficie, que le permite reflejar la radiación solar de mejor manera que otras partes de la superficie terrestre (como por ejemplo océanos, tierra, vegetación y desiertos). (b) *Difusividad* térmica que se refiere a la velocidad a la que el calor puede transferirse a través de un objeto particular. El calor viaja significativamente más lento a través del hielo y la nieve que a través del aire. Lo cual significa que la nieve y el hielo ayudan a aislar el suelo y el agua (bajo el hielo), de la transferencia de calor. (c) *Calor* latente que se refiere a la energía liberada o almacenada en transiciones de fase a temperatura constante. En palabras simples, en la criósfera, el calor latente es la energía requerida para cambiar los estados del agua: gas - líquido - sólido.



3. ¿Cuándo y cómo se formó la Antártica?

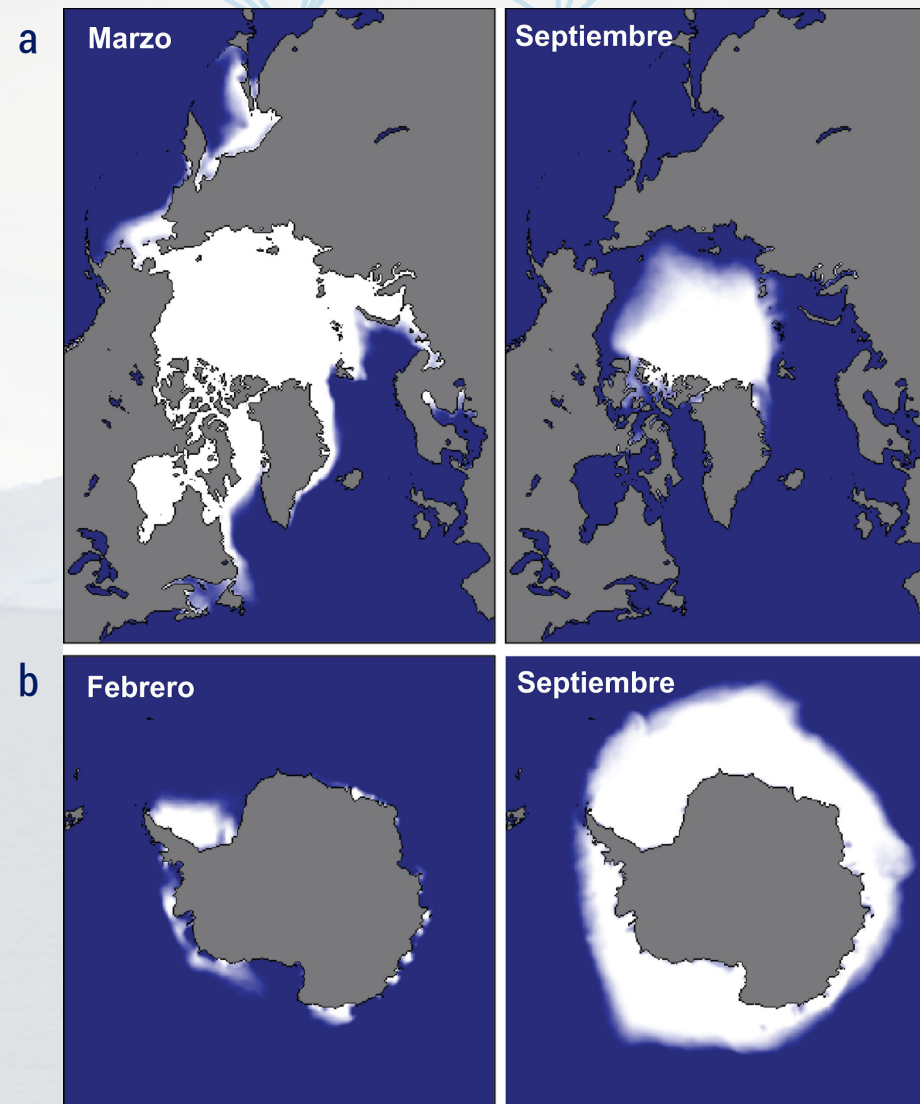
Hace 150 millones de años, el supercontinente Gondwana inició un proceso de fragmentación que llevó a la formación de los continentes africano, australiano, sudamericano y antártico. La última etapa de este proceso correspondió a la apertura del paso Drake, hace unos 30 a 35 millones de años, separando a Sudamérica de la Antártica. Es entonces que se forma una de las corrientes marinas más potentes que rodea la Antártica, la corriente circumpolar antártica (CCA). A partir de aquel momento, el continente antártico quedó aislado de los otros continentes por barreras geográficas (distancia), batimétricas (grandes profundidades) y oceanográficas (la CCA).

Este proceso de aislamiento fue acompañado por un enfriamiento progresivo del clima antártico y del océano Austral, iniciado hace 50 millones de años. Este enfriamiento llevó al congelamiento del continente, cubierto entonces por campos de hielos y glaciares que llevaron a la extinción casi completa de toda la fauna y flora terrestre del continente antártico. En el mar, donde temperaturas bajo cero se instalan de manera permanente, los ecosistemas sufrieron profundas transformaciones, aunque sin experimentar el trágico destino de la biota terrestre (organismos vivos).

4. ¿Por qué la cobertura de hielo marino sobre el océano Austral (Antártica) se forma y derrite cada año?

La capa de hielo marino que descansa sobre el océano Austral y rodea la Antártica aumenta y disminuye su tamaño todos los años. Entre noviembre y febrero, el hielo marino se derrite muy rápidamente; mientras que se forma de nuevo con lentitud entre marzo y septiembre. Este ciclo está controlado principalmente por las condiciones atmosféricas como los vientos y la temperatura del aire, y en menor medida por la temperatura del océano. El frente polar representa el límite que puede alcanzar el hielo marino, pues al norte de él, las aguas del océano son demasiado cálidas como para congelarse y formar el hielo marino.

Entre 1979 y 2014, la extensión del hielo marino creció alrededor de la Antártica, pero en los últimos años se ha invertido la tendencia registrándose mínimos históricos durante 2016 a 2018. Las causas para estos cambios en el tamaño del hielo marino no están claras, pues los modelos construidos aún no consiguen predecir fidedignamente su extensión. Valores aproximados de la extensión del hielo en verano e invierno lo sitúan entre 2 a 4 y 17 a 20 millones de kilómetros cuadrados (https://nsidc.org/cryosphere/sotc/sea_ice.html). Para el continente antártico, el espesor medio de la capa de hielo antártica es de 2160 m; el espesor máximo conocido de la capa de hielo es de 4776 m (en Tierra Adelia), mientras que su volumen alcanza los 26.9 millones de kilómetros cúbicos, lo que equivaldría a incrementar en 58 m el nivel del mar, si todo este hielo se derritiera.



Climatología de la concentración de hielo del Ártico (a) y de la Antártica (b) desde 1981 a 2010. Las imágenes muestran las máximas y mínimas extensiones de hielo estacional basadas en datos satelitales.

(Fuente: National Snow and Ice Data Center", University of Colorado, Boulder)

5. ¿Existen diferencias entre los glaciares de la Antártica y de montaña?

A diferencia de los glaciares ubicados en todas las montañas del planeta, donde la mayor pérdida de masa de glaciar es por derretimiento superficial, en la Antártica las mayores pérdidas de masa se deben al derretimiento subacuático de sus plataformas de hielo flotante. Este derretimiento adelgaza las plataformas y acelera el flujo de hielo proveniente del interior del continente, lo que aumenta la contribución de la Antártica al aumento del nivel del mar. Además, la cobertura de hielo cubre todo un continente, por lo que, a diferencia de los glaciares de montaña, sus márgenes no están encerrados por montañas y su flujo no está totalmente controlado por la topografía subglacial.

Otra diferencia es el rol ecosistémico de las aguas de deshielo que generan los glaciares, mientras en la Antártica gran parte de los glaciares desembocan en el mar o sistemas subglaciales, los glaciares de montaña, ubicados a lo largo de la cordillera de los Andes, aportan agua dulce directamente a los ríos en la temporada estival, llegando a representar el 67 % del agua disponible en años con escasa precipitación nival.



6. ¿Cómo es el clima en la Antártica?

La Antártica es el continente más alto, frío y seco del planeta. El clima de la Antártica está condicionado por su geografía y su posición geográfica, es un continente rodeado por un vasto océano ubicado en el extremo sur del planeta. Con más de 14 millones de kilómetros cuadrados, la Antártica se extiende desde la latitud 62° S hasta el polo sur, y se puede considerar dividida en tres regiones: la península Antártica, la Antártica occidental y la Antártica oriental. Estas dos últimas están separadas por las montañas transantárticas con cumbres de más de 4800 m. La mayor parte de su territorio está cubierto por un casquete de hielo que se ha ido acumulando a lo largo de millones de años. El espesor medio de la capa de hielo que cubre el continente es de más de 2 km, lo que convierte a la Antártica en el continente de mayor altitud del planeta. Las partes más altas de la capa de hielo, en la Antártica oriental, tienen más de 4 km de espesor.

En el polo sur, la temperatura media en verano e invierno es de -30 °C y -60 °C. Estas temperaturas son al menos 20 °C más bajas que las del polo norte. Las temperaturas suben hacia las costas y en verano en el extremo norte de la península Antártica son frecuentes los días con temperaturas cercanas a cero. Las precipitaciones promedio en la Antártica no llegan a los 50 mm anuales por lo que se la considera uno de los desiertos más secos del mundo. Sin embargo, a miles de kilómetros del polo, en las costas del continente, las tormentas intensas con vientos huracanados son frecuentes. Las partes con precipitaciones (nevadas) más intensas del continente son la península Antártica y la costa norte de la Antártica occidental.



7. ¿Es importante la Antártica en el clima del planeta?

La Antártica y el océano Austral son partes clave del sistema climático del planeta. La Antártica almacena la mayor parte del agua dulce del mundo, genera grandes cantidades de hielo marino y está rodeada por corrientes circumpolares de aire y agua. El clima y las propiedades físicas y biológicas del continente y su océano circundante están estrechamente unidos a otras partes del medio ambiente global por patrones de circulación oceánica y atmosférica.

Por ejemplo, la diferencia de temperatura entre los trópicos y la Antártica determina el patrón de circulación oceánica que transporta calor desde los trópicos hacia el polo y aumenta la capacidad de los océanos para absorber dióxido de carbono de la atmósfera. Además, el océano austral incluye amplias zonas de subducción de agua fría y salina entre los 60° S y 75° S, donde se forman masas de agua muy importantes ricas en oxígeno como el agua intermedia antártica y el agua profunda del Pacífico.

Una característica única de la Antártica es su casquete polar, que actúa como un gigantesco espejo que refleja de vuelta hacia el espacio gran parte de la radiación solar de onda corta incidente. Si esa radiación no fuese devuelta hacia el espacio, sería absorbida por la tierra o el océano, lo que aceleraría significativamente el calentamiento global. Como resultado del cambio climático, la Antártica está perdiendo importantes cantidades de hielo, especialmente en las plataformas de hielo flotantes en sus costas. Sin embargo, su casquete polar aún conserva su capacidad de reflejar la radiación solar incidente contribuyendo de esa manera a no aumentar el desbalance radiativo global que causa el calentamiento global.

8. ¿Cómo sabemos que la Antártica se está calentando?

Mediciones en la superficie evidencian que la Antártica se está calentando, pero el ritmo de calentamiento exhibe importantes diferencias regionales. La Antártica oriental, por ejemplo, ha mostrado un calentamiento poco significativo. Sin embargo, la temperatura en la Antártica occidental, incluida la península Antártica, aumentó alrededor de 2 °C desde 1958.

La península Antártica, donde se encuentra la mayoría de las bases chilenas, experimentó rápidos aumentos de temperatura durante varias décadas del siglo XX, pero a fines de los noventa, estos disminuyeron y, desde el 2000, la península ha experimentado bajas en su temperatura relacionadas con la variabilidad natural y las tendencias en las temperaturas del océano Pacífico. A pesar de este enfriamiento reciente, el norte de la península Antártica sigue siendo hoy mucho más cálido de lo que era a mediados del siglo pasado. Algunas de las diferencias regionales en el ritmo de calentamiento de la Antártica se explican por los importantes cambios en su circulación atmosférica que la Antártica ha experimentado en décadas recientes. Por ejemplo, los vientos del oeste en torno a la Antártica se han fortalecido y desplazado hacia el polo.

Para determinar a qué velocidad y desde cuándo se está calentando la Antártica, existen estaciones de observación meteorológica que llevan un registro continuo (para los últimos 60 años) y los satélites que pueden cubrir una extensión mayor (para los últimos 80 años). Para poder extender las observaciones climáticas al pasado donde no hay observaciones directas, estas se obtienen a partir de los testigos de hielo y de sedimentos del fondo marino. Entendiendo la composición química y biológica, es posible reconstituir el clima del pasado en escalas que van desde la anual hasta los millones de años. Es decir, que podemos saber cómo han ocurrido y desaparecidos numerosos ciclos de glaciación y desglaciación.

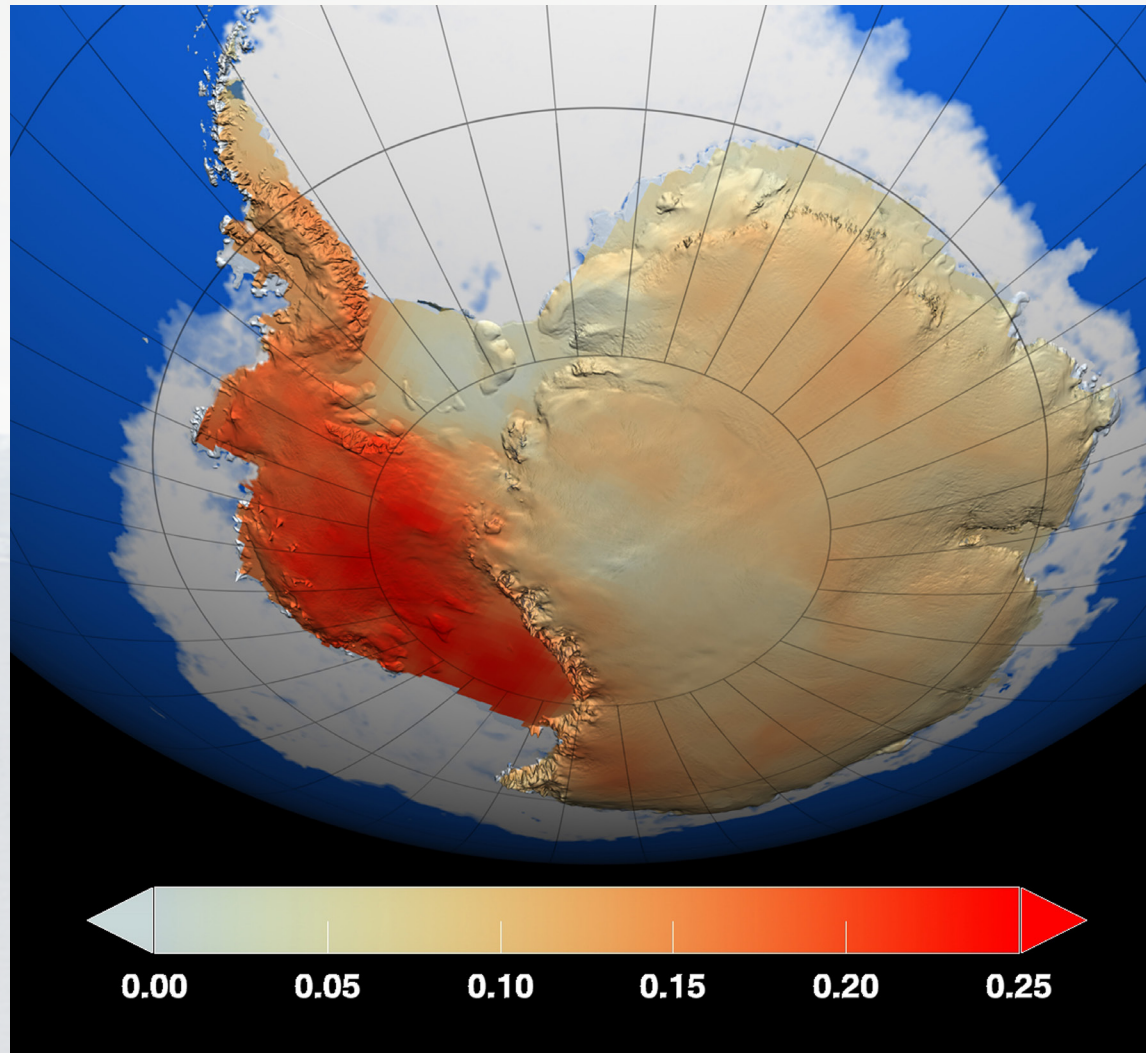


Figura que muestra los cambios en las temperaturas de la Antártica. La barra de colores indica el incremento por década, en el período entre 1957 y 2006. (Fuente: https://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/36000/36736/AntarcticaTemps_1957-2006_lrg.jpg).

9. ¿Cuáles son los principales riesgos del cambio climático en la criósfera?

El cambio climático ocasionará una pérdida sustancial de la masa de hielo en los polos y la desaparición de los principales glaciares de montaña en las zonas tropicales. En las regiones tropicales y subtropicales, se producirá un desbalance entre la masa de agua que es almacenada en los glaciares de montaña (acumulación) y la cantidad de masa que se pierde por la fusión de la nieve y hielo acumulado (ablación). Se espera que este balance entre lo que entra y sale, se vuelva cada vez más negativo (pérdida de masa), debido a la disminución de las precipitaciones y aumento de temperaturas. Si bien los glaciares tropicales o subtropicales no representan un porcentaje mayor en el aumento del nivel del mar, sí cobran una importancia mayor, pues gran parte de la población mundial depende de la esorrentía de ríos que nacen en estos glaciares, particularmente en Asia. Mientras que, en los polos, la temperatura del hielo se elevará produciendo mayores tasas de derretimiento de hielo, que a su vez contribuirá directamente al aumento del nivel del mar y el control de la evaporación de agua e intercambio gaseoso entre el océano y la atmósfera.

Otros componentes de la criósfera como el permafrost (suelo congelado) y la nieve, se verán también afectados al incrementarse la altura de la isoterma cero (línea donde la temperatura se encuentra bajo el punto de congelamiento) en las regiones montañosas. En el océano, se espera que las plataformas de hielo flotante en los polos se vuelvan inestable y se destruyan debido al incremento de la temperatura del agua oceánica y del aire.



10. ¿Qué es el albedo de la nieve y cómo afecta a la criósfera y al cambio climático?

Los glaciares son fundamentales para el mantenimiento del clima global debido a que reflejan entre el 45 % y 85 % de la luz del sol que llega del espacio, enfriando el planeta. Esta reflexión de las diferentes superficies del planeta se denomina albedo y en la criósfera su porcentaje varía en una escala de 0 a 1, donde el océano es casi un cuerpo negro, cuyo albedo está entre 0.07 a 0.1 y el máximo de reflexión sería la nieve fresca, entre 0.8 a 0.9, cuanto más fresca sea la nieve, más reflejará. Por ello es tan importante la deposición de impurezas sobre la criósfera, puesto que “ensucian” la nieve y el hielo de los glaciares y otras superficies nevadas de las montañas.

La radiación incidente que no es reflejada es absorbida por la superficie. La nieve como superficie casi blanca refleja mucho de los rayos del sol en el rango visible y tiene un albedo cercano a 1, mientras que superficies sombras (océano, asfalto), tienen albedo cercano a 0, es decir, casi toda la energía solar se absorbe. La reflexión de la energía solar por la superficie blanca de la criósfera le da estabilidad y permite que no se derrita fácilmente. A su vez, la criósfera mantiene una parte de la superficie blanca y sube el albedo del planeta. Con el calentamiento global, esta cobertura blanca se reduce y es reemplazada con superficie sombra (vegetación, arena, etc.). Esto produce una retroalimentación positiva que hace que aún más energía solar sea absorbida por el planeta y se acelere el calentamiento global.



11. ¿Qué es el bioalbedo y cómo afecta a la criósfera?

El bioalbedo es la modificación del albedo de la superficie de la criósfera que ha sido alterado por la acción de la actividad biológica. Tal como ocurre con la modificación del albedo por la deposición de contaminantes atmosféricos e impurezas en la nieve y/o el hielo, el albedo de la criósfera se puede alterar negativamente por la presencia de microorganismos y microalgas de distinto tipo, que poseen color y cambian las propiedades de reflexión de estas superficies blancas. En particular, en la capa de hielo de Groenlandia, el hielo se vuelve muy oscuro en verano, con grandes áreas que reflejan solo el 20 % a 30 % de la luz solar incidente. La superficie del hielo puede transformarse por los microorganismos y microalgas en un mosaico de grises, rojos y púrpuras coloreados por el efecto colectivo de innumerables organismos microscópicos. En la Antártica, se observan estos afloramientos de color sobre la nieve y el hielo, donde principalmente cianobacterias y microalgas de varios colores cambian el albedo y derriten más rápidamente la criósfera antártica.

La temperatura de congelación y la presencia de nieve líquida es aparentemente el ambiente ideal para el crecimiento de microalgas, y convierte la nieve en planicies verdosas o rosadas (por la naturaleza de sus pigmentos) y que se calientan rápidamente acelerando el proceso de fusión.



Campo de nieve en la base Escudero del Instituto Antártico Chileno, donde se aprecian floraciones de microalgas de nieve (*Chlamydomonas*), en fase verde (Foto: P. Cid-Agüero).

12. ¿Por qué el cambio climático afecta más al Ártico que a la Antártica?

Las diferencias geográficas entre la Antártica y el Ártico hacen a este último más vulnerable a las alzas de temperatura. El Ártico es un océano cubierto por una capa de hielo marino perenne (de varios metros de espesor) y rodeado de varios continentes. La Antártica es un continente cubierto por un casquete polar (de 2 km de espesor promedio) y rodeado por el océano Austral.

Con excepción de las plataformas de hielo flotantes en sus costas, el casquete polar que cubre la Antártica no está directamente conectado con el océano. Por el contrario, el hielo marino ártico está en contacto directo con el océano lo que lo expone directamente al alza de temperatura del mar. El alza de temperatura que ha experimentado el océano en el último siglo ha afectado gravemente al hielo marino perenne del Ártico, el que ha perdido más de 50 % de su volumen típico en verano desde 1980. Este retroceso se ha visto empeorado por el llamado mecanismo de retroalimentación ártica: cuando el hielo marino retrocede, expone al océano a la radiación solar que al calentar el mar contribuye a derretir aún más hielo. Debido a este mecanismo de retroalimentación, el Ártico es la zona del mundo de más rápido calentamiento en el planeta.

Aunque la Antártica también está perdiendo importantes cantidades de hielo, especialmente en las plataformas de hielo flotantes en sus costas, el hecho de que la mayoría del hielo antártico no esté en directo contacto con el océano hace que la Antártica sea mucho más resiliente al cambio climático que el Ártico.



13. ¿Qué es la oscilación antártica?

La oscilación antártica o modo anular del sur (AAO y SAM por sus siglas en inglés, respectivamente), es el principal modo de variabilidad intra e interanual en la circulación atmosférica del hemisferio sur, es esencialmente una medida del gradiente de presiones entre latitudes medias y altas (40° S y 65° S), lo cual tienen una incidencia directa sobre la posición latitudinal del cinturón de vientos del oeste que circulan alrededor de la Antártica. Para el caso de nuestro país, el comportamiento de la AAO incide en la intensidad y desplazamiento de los frentes fríos y otras perturbaciones ciclónicas que se desarrollan en el hemisferio sur, y es responsable en parte de la variabilidad de las precipitaciones y las temperaturas de Chile centro-sur, en especial de la Patagonia. El índice de la AAO se caracteriza por fases positivas y negativas. Una fase positiva de la AAO favorecería el desplazamiento de los sistemas frontales y la ocurrencia de precipitaciones en la península Antártica, lo cual estaría asociado a menores precipitaciones y mayores temperaturas sobre las regiones del sur y austral de Chile (el patrón inverso ocurriría en una fase negativa). Durante las últimas décadas y como resultado de la disminución de los niveles del ozono estratosférico y el incremento del dióxido de carbono atmosférico, el comportamiento de la AAO se ha caracterizado por presentar una tendencia hacia su fase positiva, lo cual ha tenido una incidencia directa sobre la disminución de precipitaciones y aumento de temperaturas en la Patagonia.

Reconstrucciones de la oscilación antártica basado en anillos de árboles y testigos de hielo demuestran que el actual comportamiento de este forzante climático es totalmente anómalo y no tiene precedentes dentro del contexto de los últimos 1000 años, lo cual lo convierte en un ejemplo patente de cambio climático de origen antropogénico.



14. ¿Qué es el agotamiento de ozono?

Es una disminución no natural en la abundancia de ozono en la estratósfera (la parte alta de la atmósfera). El ozono es un gas que está presente de manera natural en la atmósfera y que protege la biósfera al absorber la parte de la radiación solar ultravioleta (UV) más dañina para la vida. El ozono es además un gas de efecto invernadero por lo que sus variaciones tienen importantes consecuencias en el clima antártico.

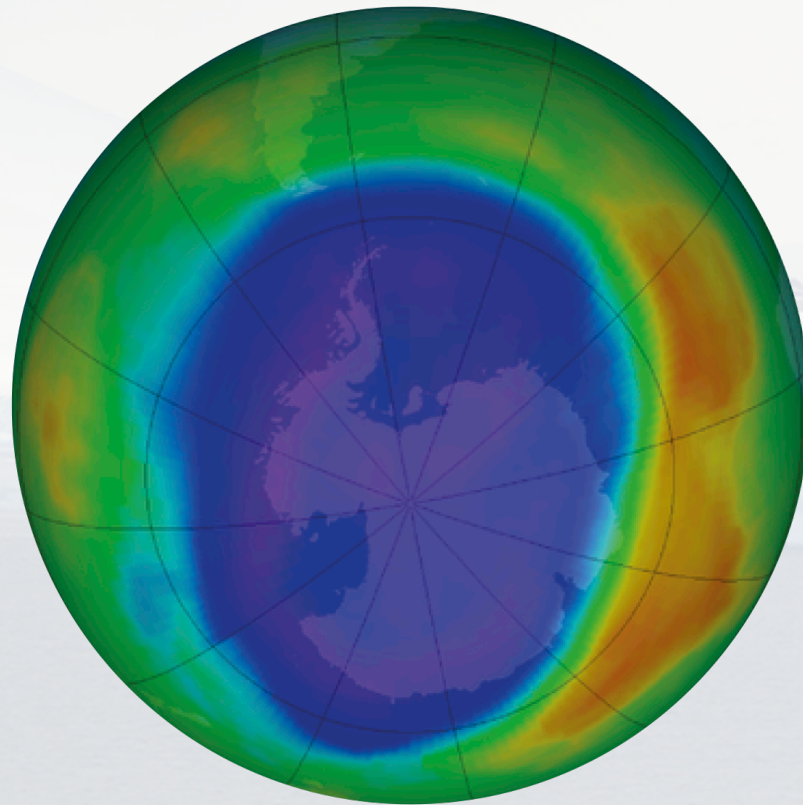
El agotamiento de ozono es primariamente provocado por la presencia en la estratósfera de “sustancias destructoras de ozono” que fueron reguladas a partir de 1987 a través del Protocolo de Montreal. Aunque generadas por actividades industriales en latitudes medias, estas sustancias son muy estables por lo que después de generadas, son arrastradas por las corrientes de aire hacia la estratósfera alcanzando con el tiempo también a los polos. Aunque las “sustancias destructoras de ozono” están presentes en toda la estratósfera, el agotamiento o destrucción de la capa de ozono se manifiesta más claramente en latitudes altas (particularmente en la Antártica). De hecho, el “agujero de ozono” se forma debido a la destrucción masiva de ozono estratosférico que anualmente ocurre entre agosto y diciembre sobre una zona que prácticamente cubre todo el continente antártico.



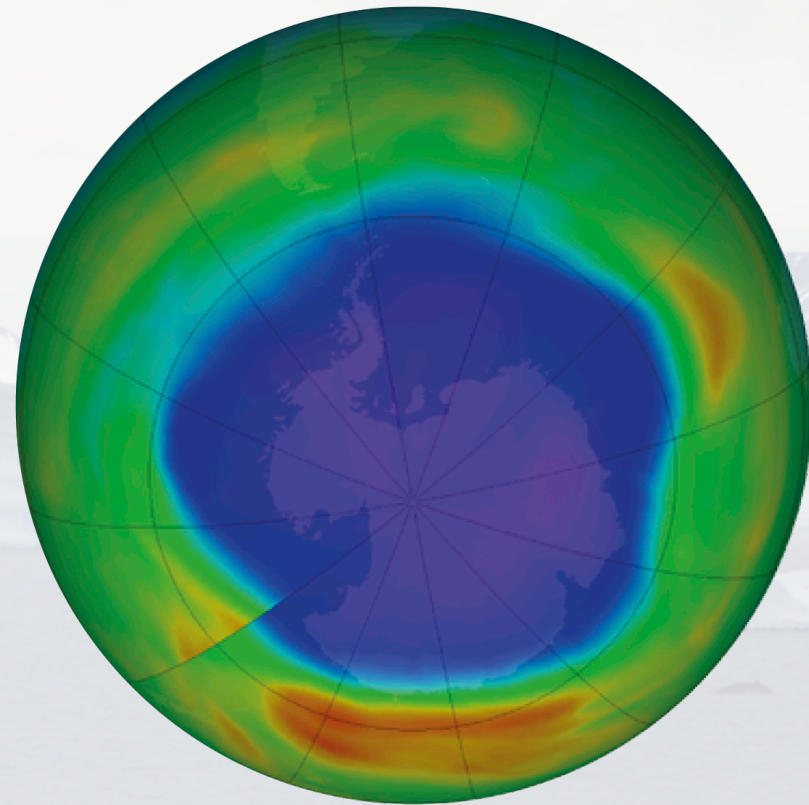
15. ¿Qué relación tiene el cambio climático con los niveles de ozono sobre la Antártica?

El agujero de ozono es consecuencia de condiciones meteorológicas particulares que en general solo se dan en la Antártica. Hasta 1987, la producción de compuestos halogenados (principalmente clorofluorocarbonos) llevó los niveles de ozono atmosférico en el polo sur a niveles peligrosamente bajos. Las estimaciones de modelos matemáticos prevén una recuperación de la capa de ozono total hacia el año 2054. Sin embargo, la aparición de gases de efecto invernadero de origen antropogénico, tal como el trifluoro de nitrógeno (NF₃; utilizado en la fabricación de pantallas planas y celulares), ha puesto en peligro los pronósticos de recuperación de la capa de ozono.

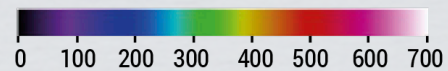
Como consecuencia de los bajos niveles de ozono, la penetración de la radiación UVA y UVB en el hemisferio sur se ha incrementado, ocasionando daños en la estructura molecular de organismos marinos, la fotodestrucción de la materia orgánica en el océano y un incremento de la incidencia de cáncer a la piel en la población humana. Además, el agotamiento del ozono estratosférico ha causado cambios importantes en el clima del hemisferio sur, afectando la circulación atmosférica y oceánica con los consiguientes efectos en los ecosistemas acuáticos. Específicamente, cambios en el clima son capturados por el modo anular del sur (SAM). El aumento de los gases de efecto invernadero y el agotamiento del ozono sobre la Antártica han empujado el SAM hacia una fase más positiva (mayor diferencia latitudinal en la presión), y el índice SAM ahora está en su nivel más alto en al menos 1000 años. La tendencia a una fase más positiva de los cambios en SAM tendrá efectos específicos de la latitud sobre la exposición a la radiación UV.



09.09.2000



20.09.2018



Total Ozone (Dobson units)

Máxima área del agujero de ozono registrada el 9 de septiembre de 2000 y la más reciente, registrada el 20 de septiembre de 2018. (Fuente: European Environment Agency. Disponible en <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/maximum-ozone-hole-area-in-6>)

16. ¿Influye la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, sobre la extensión del hielo en la Antártica?

Evidencias provenientes de estudios paleoclimáticos y de modelamiento indican que hace aproximadamente 34 millones de años (transición Eoceno-Oligoceno), cambios tectónicos permitieron la apertura del paso Drake, la formación de la corriente circumpolar antártica y la aislación térmica del continente antártico. Este cambio en la circulación marina produjo mayor surgencia (ascenso de agua con nutrientes), y un aumento en la productividad en el océano Austral, lo que derivó en una mayor reserva de carbono orgánico en el océano. De esta manera, la concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera cayó bajo el umbral de las 600 ppm (partes por millón), lo que se cree permitió la formación de un casquete de hielo permanente sobre el continente antártico.

Testigos de hielo polares han demostrado que, durante los últimos 800 000 años, la concentración de CO_2 y de metano (CH_4) en la atmósfera (gases invernadero), ha variado en sincronía con la temperatura superficial, siguiendo los ciclos glaciales-interglaciales. El origen de las glaciaciones se relaciona con cambios en la geometría de la órbita terrestre (excentricidad), lo que controla la radiación solar entrante, pero también con la concentración de CO_2 en la atmósfera. Modelamiento y análisis de sensibilidad han permitido entender que solo considerando ambos factores es posible reproducir el comienzo de un período glacial.

En las últimas décadas, la concentración de CO_2 en la atmósfera ha alcanzado niveles sin precedente en cientos de miles de años (en el polo sur se sobrepasaron las 400 ppm en el 2016), y la temperatura superficial en distintas regiones del planeta ha llegado a valores récord en los últimos veranos. La Antártica está sufriendo el desmembramiento de sus plataformas flotantes, y el aceleramiento de glaciares periféricos ha llevado a los científicos a concluir que la Antártica occidental ha comenzado un irreversible proceso de desglaciación.



17. ¿Qué es el carbono negro (*black carbon*) y el carbono café (*brown carbon*)?

El *black carbon* (BC), o “carbono negro”, consiste en partículas finas ($\leq 2.5 \mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico) de carbono puro en variadas formas, principalmente en el aire como aerosol, producto de la combustión de materia orgánica. Los aerosoles que contienen BC, comúnmente conocidos como hollín, se emiten a la atmósfera de la Tierra a partir de fuentes naturales y antropogénicas, que incluyen la quema de biomasa, incendios naturales y la combustión de carbón, diésel y combustibles para aviones, entre otros combustibles fósiles. El efecto directo consiste en la dispersión y absorción de la radiación solar por partículas de los aerosoles. El BC también se puede depositar sobre la criósfera, afectando la capa de nieve o el hielo de los glaciares, modificando el albedo (reflexión sobre la superficie del planeta), acelerando la ablación, aumentando así la pérdida de masa glaciar, afectando el efecto invernadero e impactando finalmente en el cambio climático, a escala local, regional y global.

El *brown carbon* (BrC) es un aerosol en el aire producto de la combustión de materia orgánica. En comparación al BC, producido por combustión a altas temperaturas (p. ej., diésel), el BrC es el resultado de una combustión menos completa; por ejemplo, en la quema de leña e incendios forestales, quemadas agrícolas, entre otras. Ambos, BrC y BC, son parte de los aerosoles atmosféricos, corresponden a material particulado denominado fino, es decir, partículas cuyo diámetro aerodinámico es menor a los $0.45 \mu\text{m}$.



18. ¿Cómo el aumento de gases de efecto invernadero en el hemisferio norte puede afectar a la Antártica?

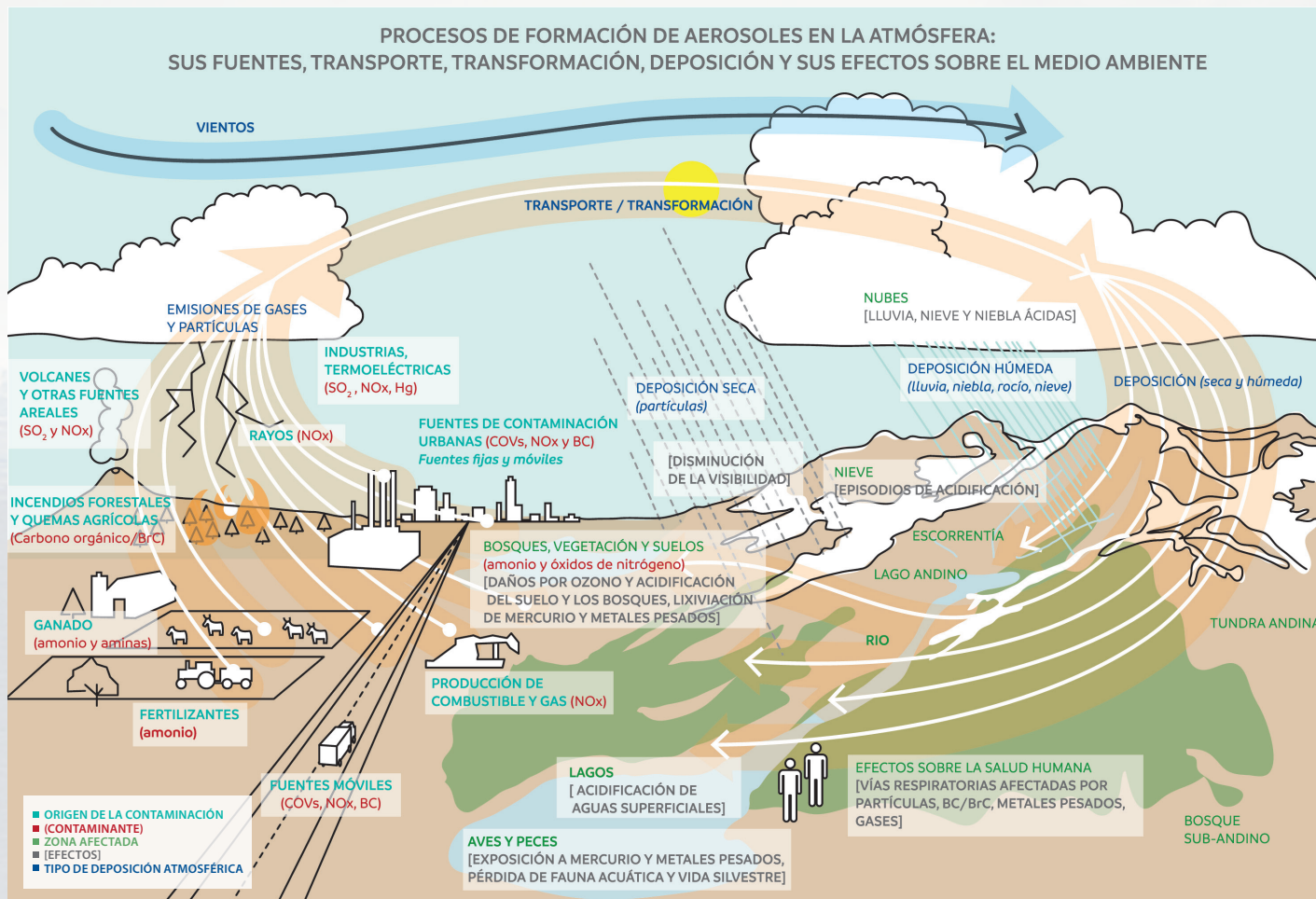
Los gases de efecto invernadero emitidos en el hemisferio norte se distribuyen rápidamente en toda la atmósfera. Altas concentraciones de gases de efecto invernadero capturan más energía solar en el sistema terrestre. La mayoría de esta energía excedente, debido al efecto antropogénico, está absorbida por el océano; el resto, aumentando la temperatura del aire. En los bordes de la Antártica, las capas y plataformas de hielo flotan sobre el océano. La subida de la temperatura del agua en el océano Austral produce un derretimiento del hielo del borde de la Antártica. Desde la base, este efecto es principalmente por el ascenso de agua circumpolar antártica, lo que produce la desintegración de plataformas de hielo y el derretimiento rápido de glaciares que terminan en el mar. Esto produce un flujo más rápido de hielo desde el interior hacia el mar, lo que resulta en una pérdida de masa de la capa de hielo de Antártica (especialmente de Antártica del oeste) y en el aumento del nivel del mar.



19. ¿Cómo afecta la contaminación atmosférica a la criósfera?

La contaminación atmosférica impacta a la criósfera de varias formas. Por un lado, mediante la deposición de contaminantes, como carbono negro y café, de material particulado antropogénico proveniente de distintas fuentes, tal como polvo resuspendido por tronaduras en minas, movimiento de áridos, o desde sitios de acopio de minerales, estériles, o escoriales instalados en cordillera, hollín emitido por fuentes móviles, impurezas naturales desde el suelo o de la morrena de los glaciares, ceniza volcánica, etc.; todos estos se depositan sobre la superficie blanca de la nieve y el hielo, disminuyen el albedo de la superficie y aumentan la tasa de derretimiento de la nieve superficial, acelerando con ello el retroceso de los glaciares.

Por otro lado, existen contaminantes atmosféricos que dispersan los rayos solares y otros que los absorben, lo que cambia la temperatura del aire. Los contaminantes como iones, metales y compuestos orgánicos presentes en los aerosoles atmosféricos que se depositan sobre la criósfera, pueden alterar el punto de congelamiento del agua, de 0 °C a un valor inferior. En consecuencia, se modifica la altitud de la “cota cero”, es decir, la altura a la cual el agua se acumula en la cordillera como agua sólida, en la forma de nieve y/o hielo. Esto produce que la cota cero comience a elevarse cada vez más y con ello disminuye la cantidad de nieve que se acumula en los glaciares de montaña. Finalmente, también se modifica la calidad química del agua de deshielo, es decir, el agua que se acumula en los embalses y que se destina a potabilización para consumo humano o para riego.



Contaminación atmosférica y sus impactos sobre la criósfera: aerosoles atmosféricos (emisiones secundarias), Black Carbon y especies co-emitidas.

(Figura elaborada, traducida y adaptada del original por Francisco Cereceda Balic.

Fuente original: © National Wildlife Refuge System, USA Government.

<https://www.fws.gov/refuges/AirQuality/sources.html>)



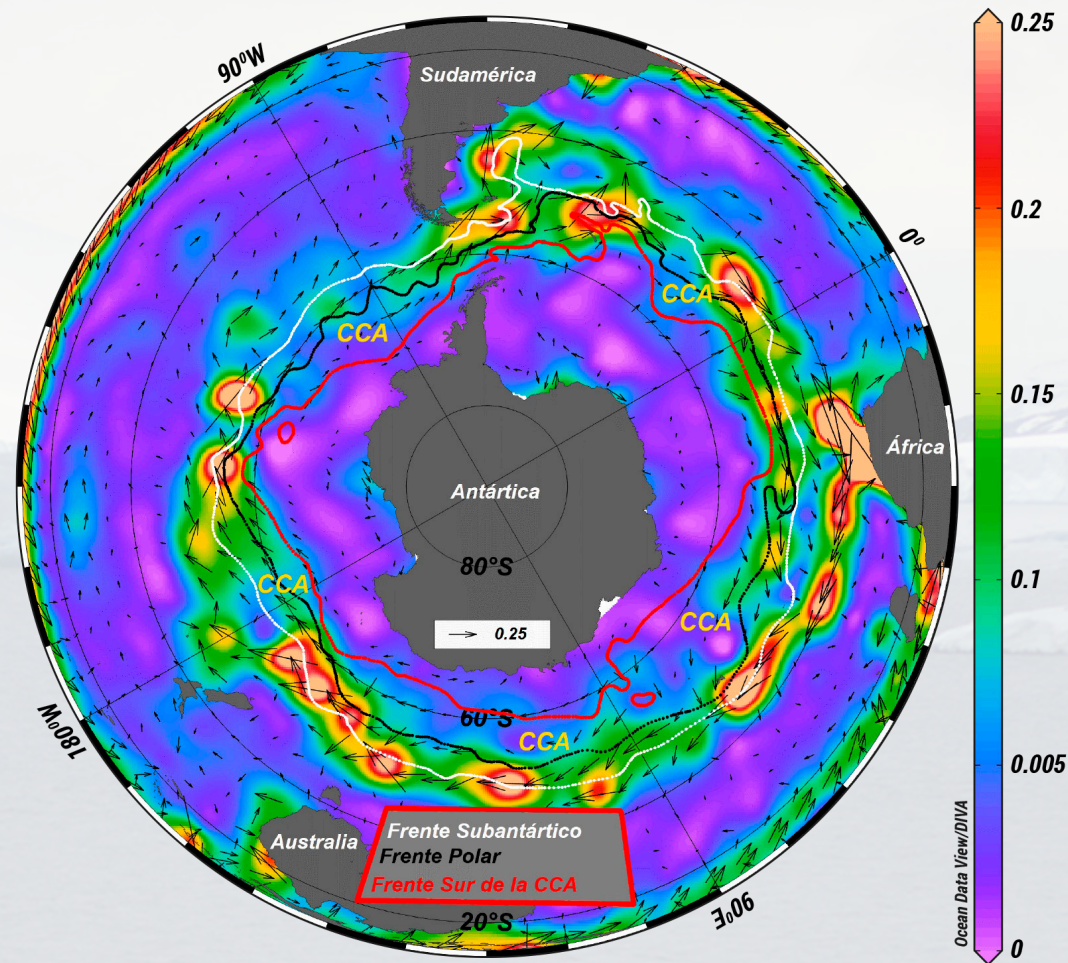
Cordillera de los Andes desde el Sector de El Colorado en la Región Metropolitana; se observa la nube de smog de la ciudad de Santiago (Foto F. Cereceda).



20. ¿Cuál es la principal corriente del océano Austral?

La principal corriente del océano austral es la corriente circumpolar antártica (CCA), la cual capta aproximadamente el 40 % del dióxido de carbono atmosférico. Esta corriente se formó cuando se separó Sudamérica del continente antártico hace aproximadamente 30 millones de años, formando el paso Drake (localizado en el extremo sur de Sudamérica y de 700 km de longitud) y en donde la CCA es más angosta. La CCA fluye continuamente desde el oeste hacia el este alrededor del continente antártico conectando las tres mayores cuencas oceánicas, Atlántico, Pacífico e Índico. La CCA es principalmente forzada por los vientos del oeste. Presenta tres frentes de norte a sur, el frente subantártico, el frente polar y el frente sur, donde el primero y el último marcan aproximadamente los límites de la CCA. La velocidad promedio de esta corriente es alrededor de 20 cm s^{-1} ; sin embargo, en algunas zonas puede alcanzar velocidades promedio entre 30 a 70 cm s^{-1} .

Esta corriente tiene el mayor transporte de masa de todas las corrientes oceánicas, moviendo una capa de agua de más de 2000 m de espesor con velocidades comparables a otras corrientes superficiales. El transporte de agua de la CCA es de alrededor de $100 \text{ a } 150 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y es mucho mayor que otras corrientes intensas. La CCA es considerada una barrera natural que aísla biológicamente a la Antártica de los otros continentes permitiéndole evolucionar hacia un ecosistema único en el mundo.



Mapa de las velocidades de corrientes promedio superficiales (ms-1), donde se muestra la corriente circumpolar antártica (CCA). Corrientes derivadas de Ocean Surface Current Analysis Project durante el período 2000-2018 (Disponible en https://podaac.jpl.nasa.gov/dataset/OSCAR_L4_OC_third-deg). Líneas blancas, negras y azules grafican los frentes subantártico, polar y sur de la CCA, respectivamente. Los frentes asociados con la CCA se obtuvieron de acuerdo con la descripción de Orsi *et al.* (1995).

21. ¿Cómo se originan las corrientes y la masa de agua más fría en la Antártica?

Se forman por incremento en su densidad al ser aguas muy frías y salinas. La masa de agua más fría y densa del planeta es el agua de fondo antártica (AFA), la que se origina en unos pocos sitios a lo largo del margen continental de la Antártica. Esta agua es producto de la mezcla de agua casi congelada (menor o igual que 0 °C) y del agua de plataforma continental que se forma en polinias y debajo de las plataformas de hielo, principalmente durante los meses de invierno, cuando adquiere una mayor densidad debido a un mayor enfriamiento causado por vientos más fuertes. Los sitios de formación son los mares de Weddell y Ross, además de las costas de Adelia (sur de Australia). El mayor volumen del agua de fondo antártica se origina en el mar de Weddell (66 %) en donde es más fría y menos salina, le siguen las costas de Adelia (25 %) con propiedades intermedias y, finalmente, el mar de Ross (7 %) con características más cálidas y saladas.

El AFA es parte de la circulación de retorno meridional también conocida como circulación termohalina. Observaciones y simulaciones a futuro indican que habría una desaceleración en su formación debido al incremento de las temperaturas globales, las cuales ocasionarían el derretimiento de la capa de hielo antártica con la consecuente disminución de la salinidad lo que la haría menos densa y, por lo tanto, disminuyendo su posibilidad de hundirse. Estos cambios afectarían la circulación termohalina con repercusiones potencialmente significativas para el océano y el clima.

22. ¿Los eventos El Niño se pueden percibir en la Antártica?

El fenómeno de El Niño Oscilación del Sur (ENOS) no está ajeno a tener efectos en la Antártica, debido a las teleconexiones del hemisferio sur. Las señales en la Antártica pueden ser encontradas en el comportamiento de variables meteorológicas, extensión del hielo marino, plataformas de hielo, testigos de hielo y registros biológicos. Las investigaciones han encontrado cambios en el ciclo anual de presión al nivel del mar en las latitudes polares y eventos El Niño con desfase de un año. Como también temperaturas más bajas de lo normal en el polo sur e incremento de los vientos superficiales descendentes los cuales ocurren con un año de desfase durante eventos El Niño. Además, se ha observado una menor y mayor extensión del hielo marino alrededor de la Antártica durante El Niño y La Niña, respectivamente, lo cual afecta considerablemente al ecosistema marino pelágico de la península Antártica; por ejemplo, con cambios en las tramas tróficas o en la variabilidad de la CCA que rodea la Antártica.

ENOS, por ejemplo, influye en el comportamiento del centro de baja presión del mar de Amundsen, en el océano Austral, el cual controla los vientos regionales y la circulación oceánica. Durante eventos El Niño, pueden ocurrir mayores nevadas en las plataformas de hielo, aumentando su espesor, pero también trae más agua cálida desde las profundidades, la cual puede llegar debajo de las plataformas y ocasionar su derretimiento. El resultado final puede ser una pérdida de masa de la plataforma. En los eventos La Niña ocurre lo contrario, es decir, menos nevadas, pero también menos derretimiento en la parte inferior de las plataformas.

23. ¿Los fiordos con glaciares que terminan en el mar, se convertirán en fiordos con glaciares terrestres debido al cambio climático?

En el actual escenario de cambio climático, y debido al retroceso de las masas de hielo, se prevé probable que disminuya el número de fiordos que en su cabecera tengan un glaciar de marea (*tidewater glacier*), es decir, un glaciar que tenga contacto directo con el agua oceánica de un fiordo. En el caso de Chile, los fiordos se distribuyen desde los 42° S (Puerto Montt) hasta los 55° S (cabo de Hornos), zona que fue cubierta por grandes campos de hielo en el último máximo glaciar (máxima extensión del hielo de la última glaciación), hace aproximadamente 20 000 años.

Actualmente, el retiro del hielo ha causado que los fiordos situados entre Puerto Montt y el golfo de Penas ya no cuentan con un glaciar en su cabecera, por lo tanto, el aporte de agua dulce es principalmente dado por la precipitación. Similar tendencia ha sido registrada en Noruega y Nueva Zelanda, donde el retiro del hielo ha provocado que la gran parte de sus fiordos ya no cuenten con glaciares en sus cabeceras e inclusive algunos fiordos ya han sido completamente llenados por sedimentos formando un plano costero que oculta la forma de valle en "U", tan característica de los valles de origen glacial como son los fiordos. Es clave entender que los glaciares que están en contacto directo con agua oceánica de un fiordo alcanzan tasas de retroceso mayores que un glaciar cuyo frente se encuentre en tierra. Cuando el glaciar tiene su frente en contacto directo con el agua del fiordo, procesos termodinámicos del agua y mecánicos (ejemplo mareas) van a influir en sus procesos de ablación (procesos por el cual los glaciares pierden masa). Probablemente, de continuar el cambio climático tan agresivo como muestran los modelos climáticos, muchos fiordos con glaciares de marea, se transformarán en glaciares de tierra que se comunican con el fiordo a través de un río.

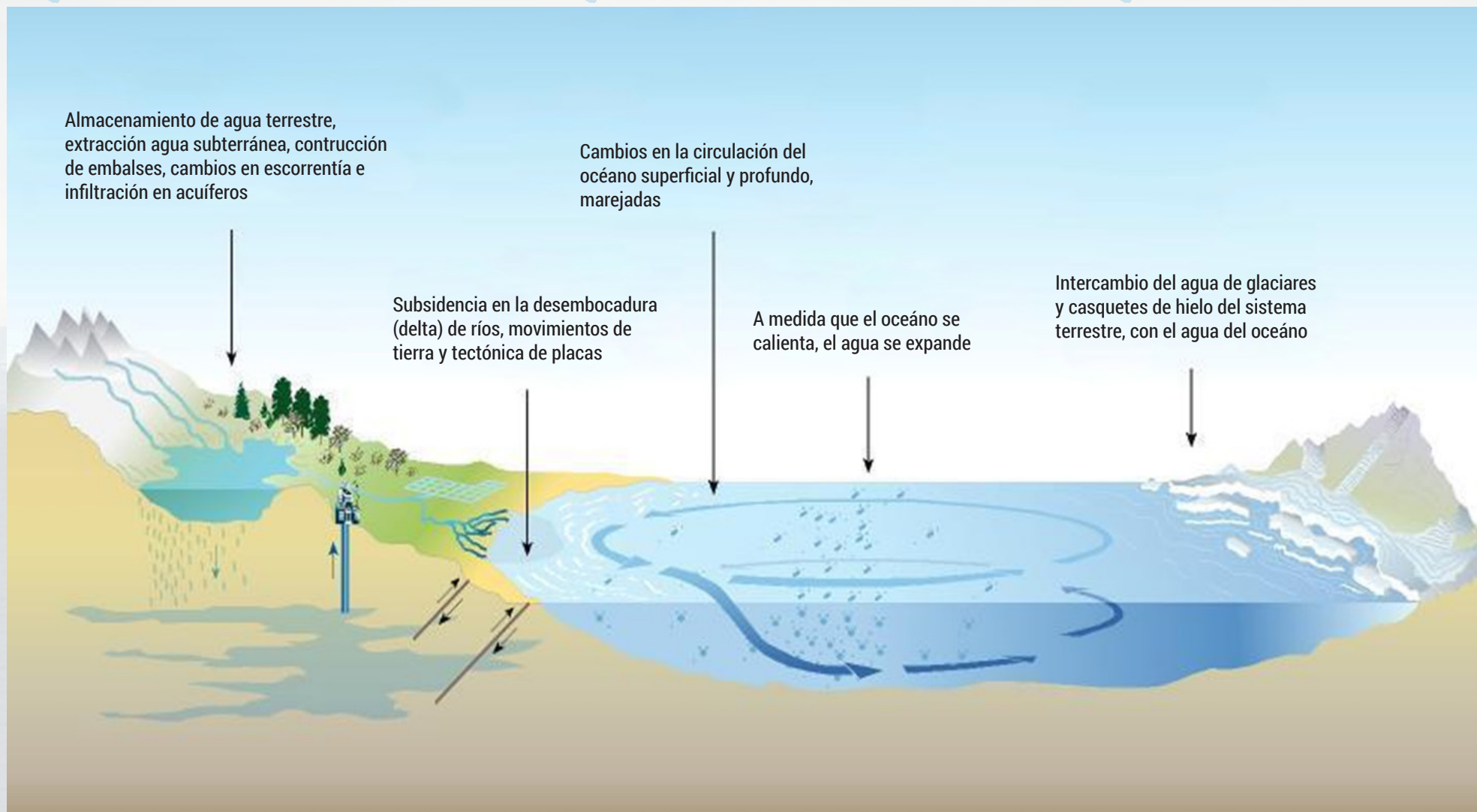


24. ¿Contribuye el derretimiento de la Antártica al alza del nivel del mar?

Estimaciones satelitales indican que la Antártica está perdiendo unos 125 000 millones de toneladas de hielo por año (125 gigatoneladas), contribuyendo con alrededor del 10 % del alza observada en el nivel del mar. Una parte significativa de la masa perdida por la Antártica es el resultado del aceleramiento en el flujo de sus glaciares. El adelgazamiento de las plataformas de hielo flotantes está acelerando el flujo de los glaciares que drenan las plataformas de hielo antárticas. Los glaciares que más han aumentado su flujo en décadas recientes están en la Antártica occidental.

Si toda la capa de hielo sobre la Antártida se derritiera, elevaría el nivel del mar casi 60 metros; sin embargo, la contribución de la Antártica al alza del nivel del mar se puede medir aún en milímetros. Aunque se espera que esta condición aumente significativamente durante este siglo, existe gran incertidumbre respecto a su magnitud (pudiendo llegar a ser de varios metros en los peores escenarios climáticos).

Un proceso que podría acelerar la pérdida de hielo es el derretimiento basal en que agua cálida, después de derretir por la base las plataformas de hielo flotantes, podría penetrar hacia la base de las plataformas de hielo continentales (las que están sobre la base rocosa del continente). La Antártica occidental es particularmente vulnerable a este proceso pues su base rocosa está bajo el nivel del mar. Por otro lado, el derretimiento del hielo marino (el que está flotando sobre el océano), no conduce directamente al aumento del nivel del mar, aunque podría contribuir a otros procesos que sí lo hacen. Cuando una plataforma de hielo se desintegra, el glaciar que lo alimenta a menudo se acelera y puede elevar el nivel global del mar.



Causas y consecuencias del aumento del nivel del mar.

(Fuente: "Outreach event on IPCC role, activities and findings", ·SR15 ·SROCC, ·SRCCL, Kuala Lumpur, Malasia, 2019. Figura original del Dr. Amjad Abdulla).

25. ¿Será afectada la fauna marina antártica?

La zona costera, los hielos y témpanos, como así también las aguas que rodean el continente antártico constituyen un ecosistema único, con la presencia de una gran diversidad de especies, la mayoría endémicas para esta macrorregión y otras visitantes temporales como ciertas aves y grandes cetáceos.

Sus habitantes emblemáticos son los pingüinos, las focas y ballenas, pero también hay numerosas especies de alto interés científico como peces y calamares, así como también una fauna y flora bentónica de relevancia, aún poco conocida científicamente. Así también, destaca el pequeño crustáceo pelágico denominado como *krill* antártico, que pese a su reducido tamaño (usualmente con menos de 3 cm de longitud), constituye el principal alimento de las principales especies que habitan esta región helada. La Convención para la Conservación de los Recursos Vivos Marinos Antárticos (CCRVMA), como parte del Tratado Antártico, tiene como principio fundamental la conservación de la fauna marina y la utilización racional de los mismos, bajo un enfoque ecosistémico. Esta organización internacional está prestando en los últimos años especial importancia al efecto que el cambio climático puede estar teniendo en la distribución y abundancia de las especies que habitan al sur de la convergencia antártica. En especial, está incentivando estudios que se centren en reunir información sobre las comunidades de pingüinos (distribución y cambios en la abundancia) y en el *krill*, dado que esta última especie representa la base de la cadena alimentaria antártica.

ALBATROS DE CABEZA GRIS
Diomedea chrysostoma



ALBATROS DE CEJA NEGRA
Thalassarche melanophrys



ALBATROS ERRANTE
Diomedea exulans



PINGÜINO EMPERADOR
Aptenodytes forsteri



LOBO FINO ANTÁRTICO
Arctocephalus gazella



ELEFANTE MARINO DEL SUR
Mirounga leonina



BALLENA AZUL
Balaenoptera musculus



DRACO RAYADO
Champsoccephalus gunnari



KRIL ANTÁRTICO
Euphausia superba



CENTOLLA ESPINOSA
Paralomis spinosissima

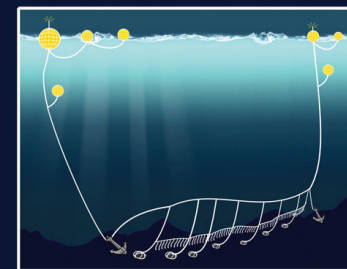


GRANADERO OJISAPO
Macrourus carinatus

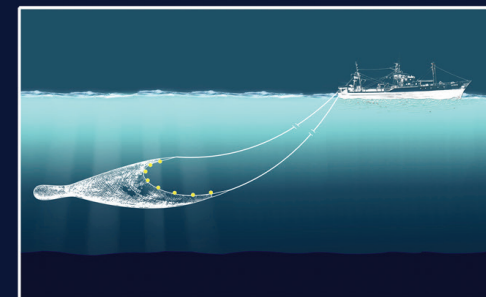


BACALAO DE PROFUNDIDAD
Dissostichus eleginoides

ARTES DE PESCA
Espinel de fondo tipo español



Red de arrastre de mediagua



Masa de
Agua
Superficial
Antártica
0 - 250 m

Masa de
Agua
Profunda
Circumpolar
Antártica
> 250 m

Afiche de la colección Mar de Chile (P. Arana, Editor).

26. ¿Cómo puede ocurrir un lago represado por glaciar, y por qué puede vaciarse repentinamente?

Un glaciar que por deshielo retrocede y se adelgaza puede generar un lago lateral por acumulación de agua, represado por el mismo glaciar (GLOF o *Glacial-Lake Outburst Flood* por su nombre genérico en inglés). O bien un glaciar que avanza puede represar un valle, generando un lago también por embalsar agua superficial de ese valle. Un lago represado por glaciar puede vaciarse repentinamente por tres mecanismos, de los cuales los dos primeros son los más comunes: (i) la presión hidrostática del agua del lago puede «levantar» el glaciar y conectar el agua del lago con la red de drenaje que existe bajo todo glaciar; (ii) la presión y la temperatura del agua del lago pueden generar un túnel en el hielo que a su vez se conecta con la red de drenaje subglacial; (iii) o puede ocurrir un rebalse o rotura de la presa de hielo. Es conveniente agregar que además de lagos glaciales represados por presas de hielo (glaciares), también existen lagos glaciales represados por morrenas y que, frecuentemente, los vaciamientos repentinos de estos lagos morrénicos, pueden generar impactos aún mayores, pues el agua se vacía más rápido por un cauce abierto a la atmósfera, que por un orificio en el hielo (mecanismos i y ii) que es flujo a presión.



27. ¿Qué son los glaciares, los rocosos o de rocas?

Un glaciar es un cuerpo permanente de hielo que fluye pendiente abajo por acción de la gravedad y se clasifican de acuerdo con su morfología (morfológica), su temperatura (térmica) y el lugar donde están (climática). En el caso de los glaciares rocosos, se los describe como formas de acumulación de rocas con contenido de hielo variable (o nulo), que han sido producidos, depositado y deformado principalmente durante el período Holoceno y en tiempos históricos recientes. Según su morfología superficial sería una lengua o cuerpo lobular, normalmente, de rocas angulares que se asemeja a un pequeño glaciar. Generalmente, están en terrenos de alta montaña (o polar seco) y zonas polares, y usualmente tienen cordones, surcos y lóbulos en su superficie, así como un frente empinado en su frente. Su longitud va desde unos pocos metros a varios hectómetros. Típicamente varían entre 200 m y 800 m, aunque la definición morfológica se ha mantenido como una de las más válidas, aún existe controversia acerca si es más apropiado una definición que enfatiza procesos y génesis, en contra, de una definición basada en atributos morfológicos.

Los glaciares rocosos pueden ser clasificados como formas activas (en movimiento y con hielo en su interior), inactivas (sin movimiento, pero aún con hielo en su interior) y fósiles o relictos (sin movimiento y donde se ha descongelado completamente su contenido de hielo. La estructura interna de los glaciares rocosos activos está constituida por una mezcla de hielo (entre 40 % y 60 %) y material detrítico. Las tasas de desplazamiento horizontal generalmente varían entre los 10 y 100 cm por año.



a



b

- (a) Glaciar Juncal Norte, en la cuenca del río Aconcagua, región de Valparaíso. Es un glaciar mayormente descubierto cuya lengua, en su parte terminal, se ha ido cubriendo de detritos (Foto: S. Crespo, 2019).
- (b) Glaciar rocoso del Cerro Chimbote, región Metropolitana (Foto: M. Castro, 2019).

28. ¿Estuvo la Antártica alguna vez poblada por bosques y grandes reptiles?

En sentido estricto, la Antártica ha sido más tiempo un continente verde que uno blanco. El registro fósil atestigua la existencia de bosques y otros ensambles vegetacionales desde el Pérmico (hace 299 - 251 millones de años, Ma), hasta el Neógeno tardío (17 - 2.5 Ma), cuando los últimos bosques dominados por *Nothofagus* abandonaron definitivamente la Antártica. Prácticamente, se conocen restos de anfibios gigantes y reptiles mamíferoides en la Antártica de hace 250 Ma, pero también albergó una rica fauna de dinosaurios, reptiles marinos, tiburones y aves, que dominaron hasta la extinción masiva del Cretácico/Paleógeno (hace 66 Ma), dejando su lugar a mamíferos, aves y pingüinos gigantes. Las cálidas temperaturas del máximo térmico del Paleoceno/Eoceno (55.8 Ma) marcan un intervalo de gran productividad primaria en tierra y el mar. Extensos y diversos bosques devinieron en los modernos ambientes de Sudamérica, Australia y Nueva Zelanda, con marsupiales, cocodrilos y aves, mientras en los océanos comenzaban a evolucionar, desde ancestros terrestres, los cetáceos. Desde ese momento, la constante caída de las temperaturas globales, acentuada por la separación final de Sudamérica y la Antártica, marcada por la aparición del paso Drake, hace unos 30 Ma, y la subsecuente formación de la corriente circumpolar antártica, configuran el escenario para su congelamiento que, tras la desaparición de los últimos remanentes boscosos, adopta la fisionomía polar actual.



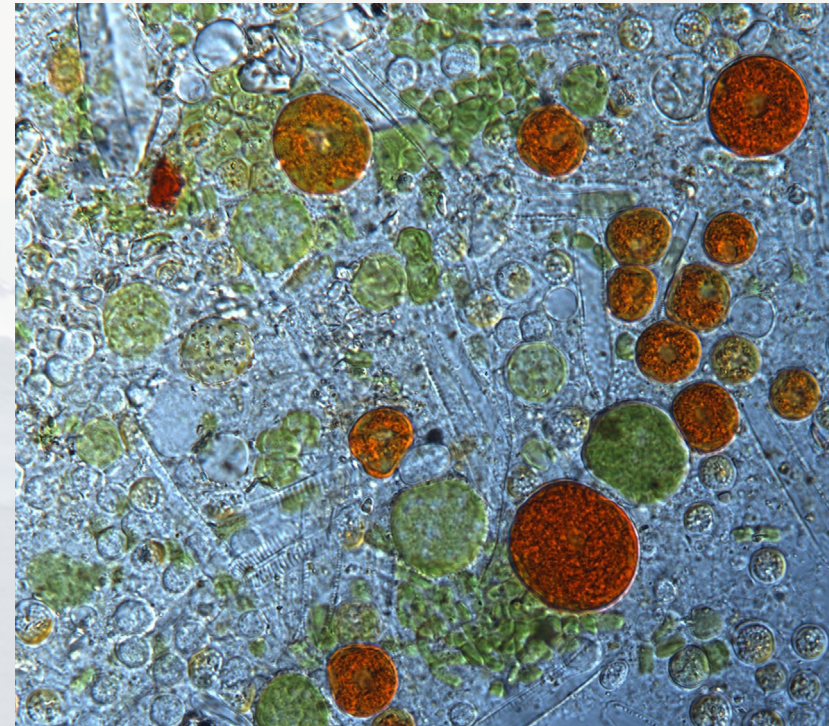
29. ¿Qué son las algas de nieve?

Las algas de nieve son un grupo de organismos extremófilos (amantes de ambientes extremos) de agua dulce, que incluye diversas comunidades de microorganismos, especialmente microalgas y cianobacterias psicrófilas (o amantes del frío) que crecen en la nieve y el hielo durante los veranos alpinos y polares. La temperatura óptima de crecimiento de estos organismos generalmente es alrededor de 0 °C, aunque muchas especies pueden tolerar temperaturas más altas. Para adaptarse a las duras condiciones, las algas de nieve han desarrollado una serie de adaptación que les permite mantener el crecimiento, la reproducción y la actividad metabólica, incluyendo la formación de quistes de resistencia, biosíntesis de pigmentos fotoprotectores, sustancias anticongelación, como azúcares y lípidos.

Desde el punto de vista ambiental, estas algas generan una superficie del hielo más oscura, reduciendo el “albedo”, la capacidad de reflejar la luz solar hacia el espacio, lo que hace que absorba más luz y se derrita. A medida que las algas se extiendan sobre áreas considerables del casquete glacial, el efecto se multiplicará, causando más deshielo. Un estudio reciente determinó que las proliferaciones de algas pueden provocar hasta un 13 % más de deshielo en una sola estación.



a



b

(a) Campo de nieve en la isla Doumer, cercana a la base Yelcho, que muestra las floraciones de microalgas de nieve en fase verde (*Chlamydomonas*) (Foto: I. Gómez).

(b) Microalgas de nieve en diferentes estados de ciclo de vida. Los grupos dominantes son clorófitos del grupo de las *Chlamydomonas*. Las células verdes representan la fase vegetativa flagelada (móvil), mientras que las células rojas corresponden a fases enquistadas con paredes gruesas y presencia de altas concentraciones de astaxantina, un pigmento carotenoide que le da el tono rojo (Foto I. Gómez).

30. ¿Qué tipo de vegetación existe en la Antártica?

La tundra polar antártica corresponde al ecosistema terrestre que se forma en las áreas libres de hielo permanente. Estas son pequeñas, no sobrepasan el 0.34 % de todo el continente antártico y corresponden principalmente a superficies definidas en islas y en las cimas de algunas montañas. En particular, la mayor diversidad se encuentra en el área de la península Antártica, donde ha ocurrido también un mayor retroceso de glaciares. En estas áreas, las formaciones vegetales que predominan son las herbáceas con solo dos plantas con flores; un pasto y una plantita en cojín. Sin embargo, la mayor parte de la vegetación está formada por plantas no vasculares, como los musgos (más de 100 especies) y por hongos liquenizados o líquenes (unas 350 especies). La biota antártica también está formada por microorganismos (bacterias y microhongos del suelo) y unos pocos hongos con sombrero o macromicetes. Sin embargo, hacia la Antártica continental la diversidad es muy acotada a los lugares con condiciones óptimas, creciendo prácticamente solo bacterias, líquenes y unos pocos musgos. En la Antártica continental no hay plantas con flores.

31. ¿Qué cambios están ocurriendo en la tundra polar antártica como consecuencia del calentamiento?

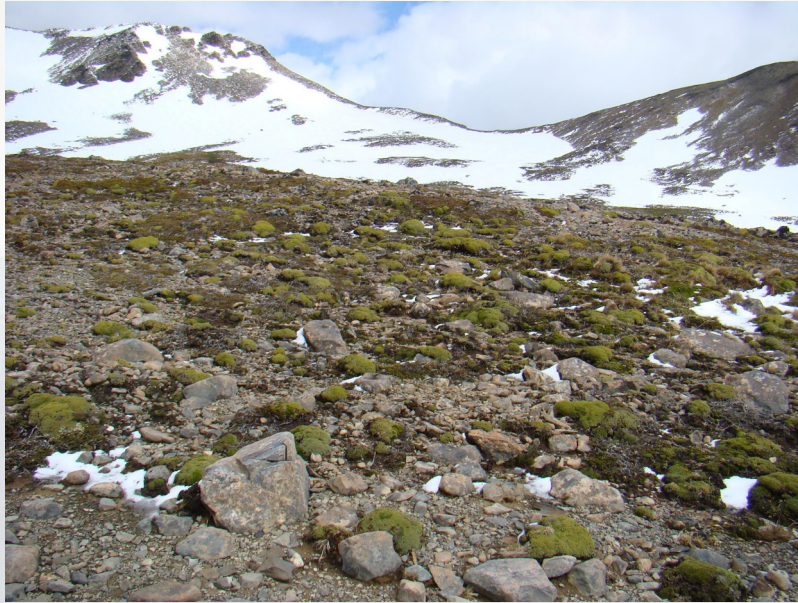
Tanto la Antártica como el Ártico están experimentando el efecto del calentamiento global, donde los mejores indicadores han sido los organismos vivos terrestres, debido a su rápida respuesta al aumento de las temperaturas. Se ha registrado un incremento de las plantas herbáceas en la antártica marítima y del tamaño de sus poblaciones. Además, se han encontrado en algunas zonas, líquenes de mayor tamaño y cambios en la diversidad de los musgos.

Los musgos cosmopolitas, o sea aquellos que crecen en otras zonas frías, también están desplazando a aquellos endémicos, o sea a los musgos que solo crecen en Antártica. Es decir, estos organismos son sensibles al cambio climático y nos presentan las primeras evidencias del cambio registrado a través de las últimas décadas. Un problema mayor lo representa la llegada de plantas introducidas accidentalmente al territorio antártico, las que pueden invadir los sitios donde crece la vegetación nativa alterando los frágiles equilibrios en que viven estas especies bajo condiciones extremas.

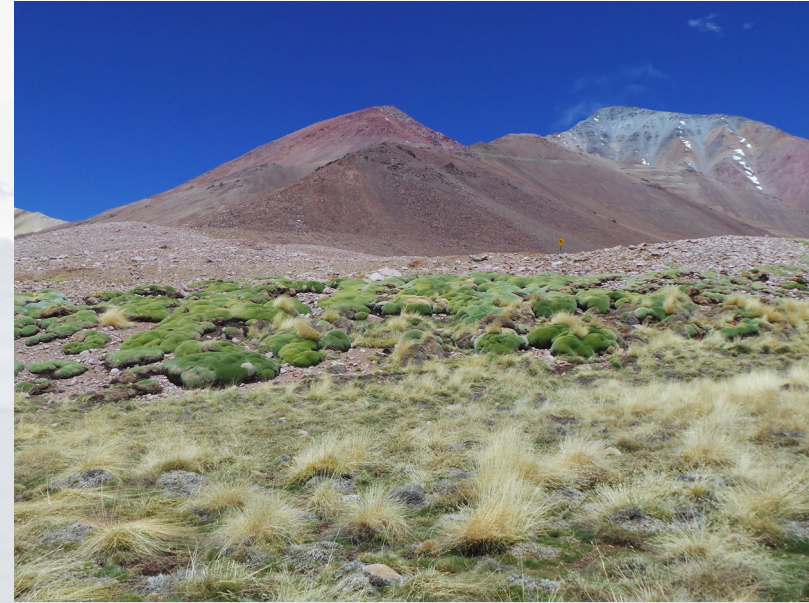


32. ¿Qué cambios podrían ocurrir en la vegetación altoandina como consecuencia del calentamiento?

La vegetación altoandina, aunque similar, es mucho más diversa que la tundra antártica. En general, las plantas son de pequeño tamaño y dependen fundamentalmente del período libre de nieve para su crecimiento y reproducción. No obstante, durante ese período dependen de la nieve acumulada en invierno o de aquella que proviene de los glaciares cercanos. El aumento de las temperaturas provoca que haya menos nieve disponible y que las estaciones de verano sean más largas y cálidas, condiciones que muchas plantas podrían ser incapaces de tolerar. Por lo tanto, muchas especies podrían extinguirse y con ello la desaparición de importantes servicios ecosistémicos. Entre dichos servicios y bienes a la humanidad están los sumideros de carbono, la estabilización de laderas, acumulación de nieve, regulación de flujos hídricos, mantención de ganadería, recreación, etc. Hasta ahora las especies parecen mostrar un gran grado de resiliencia, pero desconocemos sus umbrales y capacidad de adaptación.



a



b

(a) Vegetación altoandina (tundra) de la Patagonia, Andes subantárticos de isla Navarino y (b) altiplano chileno de la región de Atacama (fotos: L. Cavieres).



FAUNA Y FLORA
ANTÁRTICAS

LAS BALLENAS

Los animales **más grandes**
y voluminosos del planeta surcan las
aguas antárticas

FAUNA Y FLORA ANTÁRTICAS

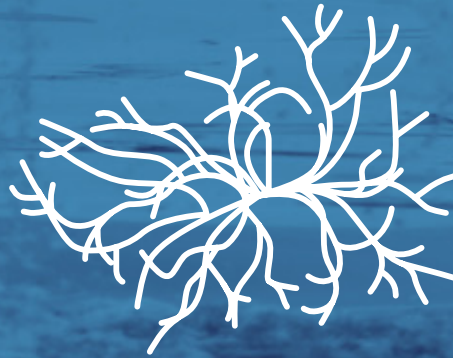
¿SABÍAS QUÉ?

Las ballenas, en verano, se alimentan de animales tan pequeños como el **KRILL ANTÁRTICO**, un crustáceo de no más de **5 cm de longitud**



LA ANTÁRTICA NO TIENE MAMÍFEROS TERRESTRES

El oso polar solo habita el polo norte



LOS LÍQUENES, PERTENECIENTES AL REINO FUNGI, son los organismos eucariotas que más cerca del polo sur crecen en el planeta



EN LAS AGUAS ANTÁRTICAS VIVEN PECES A -1.9°C

SOLO DOS PLANTAS CON FLORES han logrado crecer en la Antártica

Consecuencias globales



33. ¿Cómo afecta al cambio climático lo que le ocurrirá al permafrost?

El permafrost es tierra (suelo o roca que contiene grava, sedimento y material orgánico que es mantenido compacto en una matriz de hielo) que permanece a 0 °C o menos durante dos años consecutivos como mínimo. El grosor del permafrost puede variar desde <1 m hasta >1 km. El permafrost está principalmente en tierra (en zonas polares y de alta montaña), pero también en el mar (submarino, en zonas poco profundas del Ártico y del océano Austral). Además, la mayor parte del permafrost se sitúa en el hemisferio norte, con un área de tres órdenes de magnitud mayor que el permafrost de la Antártica.

El permafrost es un enorme reservorio de carbono, contiene más del doble de carbono del que hay actualmente en la atmósfera. Conforme el permafrost se degrada, el carbono es rápidamente transferido a la atmósfera como dióxido de carbono (CO₂) o como metano (CH₄). Por tanto, la descongelación del permafrost acelera muchísimo el ritmo del cambio climático. En la última década, el permafrost ha subido la temperatura promedio global en 0.29 °C. Perturbaciones abruptas, como los incendios, están degradando el permafrost más rápidamente que las perturbaciones continuas (aumentos de temperatura o lluvias), liberando gran cantidad de CO₂ y, potencialmente, pudiendo liberar virus y bacterias ocultos hasta ahora.

Comúnmente, el permafrost de montaña y su variabilidad espacial extrema es dominado por tres factores ambientales a diferentes escalas espaciales que influyen sobre las temperaturas superficiales: clima, topografía y propiedades del suelo. El impacto del calentamiento global y el aumento de las temperaturas atmosféricas producirá el desplazamiento del permafrost hacia sectores de mayor altura.



Permafrost: capa de hielo bajo la cobertura de suelo y vegetales (Foto: V. Ruiz. Disponible en <https://www.forumlibertas.com/hemeroteca/una-amenaza-concreta-trasfondo-del-cambio-climatico-deshielo-del-permafrost/>).

34. ¿Cuáles son las consecuencias del cambio climático en las áreas de alta montaña?

Para fin de siglo, los glaciares perderán un 18 % de su masa en escenarios de bajas emisiones. Esta merma se duplicaría en escenarios de altas emisiones. Además, en regiones no-polares, como Europa Central y Norte de Asia, las pérdidas son mucho mayores, más del 80 % de su masa para el 2100, y donde algunos glaciares desaparecerán completamente.

Los problemas derivados del derretimiento de glaciares de alta montaña son: (i) Desestabilización del caudal de los ríos y las montañas: el caudal de los ríos aumenta mucho durante un breve período, y a la larga el caudal será muy bajo, con tendencia a desaparecer. Además, hay un aumento de avalanchas “wet snow” (avalanchas causadas por nieve saturada de agua). La desestabilización de ríos y montañas produce un aumento de desprendimientos e inundaciones en zonas más bajas. En este escenario se ponen en riesgo servicios como: el suministro de agua potable, donde disminuye la cantidad y calidad del agua para consumo humano; el suministro de agua para riego; el suministro de energía hidráulica; el servicio cultural y lúdico. (ii) Pérdida de hábitat para aquellas especies adaptadas a climas de alta montaña (pérdida de biodiversidad, extinción de especies).

Al retroceder los glaciares en su valle, dejan en general laderas con pendientes fuertes y material no consolidado (morrenas) que son inestables y, por lo tanto, propensas a rodados, avalanchas de roca y aluviones. Además, pueden generarse lagos represados por hielo o morrenas que pueden vaciarse total o parcialmente de forma repentina, ya sea por drenaje superficial (usualmente muy rápido) o subglacial (rápido, pero no tanto), o por rebalse.



35. ¿La Antártica se puede acidificar y cuáles organismos son más afectados por este proceso?

La Antártica es muy vulnerable a procesos de acidificación. Los motivos son variados, pero principalmente el océano alrededor de la Antártica tiene fuertes fluctuaciones de salinidad y al ser muy frías, permiten a sus aguas aceptar más gases en disolución (como el dióxido de carbono, CO_2). La química de los carbonatos en el océano puede ser modificada cuando ingresa mucho CO_2 al océano, resultando en la liberación de iones protón (H^+) que producen una disminución del pH hacia valores menores (más ácidos). La dinámica de flujo de carbono aire-atmósfera en la Antártica señala un fuerte secuestro de carbono atmosférico hacia el océano durante los meses de verano, cuando hay una mayor tasa de fotosíntesis; en contraste a los meses de invierno con un flujo de carbono hacia la atmósfera debido, entre otras causas, a la desalinización, producto de la formación de la capa de hielo marino en el océano. Una menor extensión de hielo marino en invierno y un calentamiento de la superficie del mar podrían provocar un desbalance en el flujo anual de carbono neto y disminuir el rol del océano Austral como mitigador del exceso de CO_2 antropogénico.

Los organismos calcificadores (que tienen esqueletos de carbonato de calcio) serán los más afectados, como por ejemplo aquellos que poseen conchas calcáreas (p. ej., moluscos, corales), y también algunas microalgas (p. ej., cocolitóforos) son afectadas directamente.

La conexión con la criósfera se realiza debido a la presencia de deshielos masivos, donde la desalinización exagera la acidificación. Por otro lado, procesos de acidificación a bajas temperaturas también afectarán las respuestas fisiológicas de los organismos. Finalmente, las investigaciones recientes señalan que la acidificación de los océanos será uno de los principales impactos que favorecerán la proliferación de microalgas nocivas (mareas rojas tóxicas), especialmente en zonas consideradas vulnerables a cambios globales como en el sistema subantártico de canales y fiordos de la Patagonia.



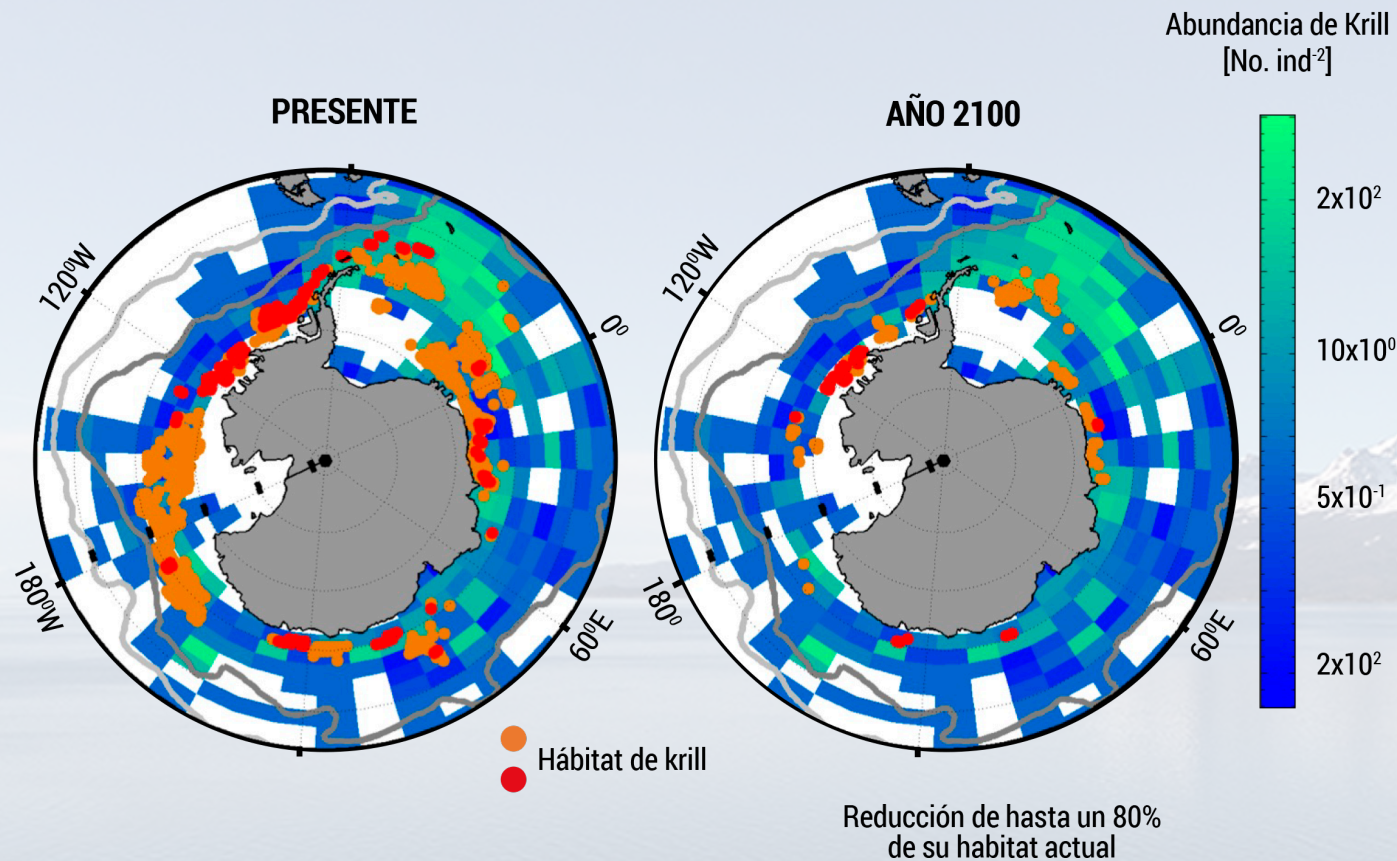
Investigadores del Centro FONDAP-Dinámica de Ecosistemas Marinos de Altas Latitudes (IDEAL), quienes estudian la acidificación de aguas en seno Ballena, región de Magallanes (foto D. Bravo).

36. ¿Cómo afecta el derretimiento de la criósfera a los organismos marinos?

Una de las principales manifestaciones negativas de la pérdida de masa de glaciares será el incremento de la turbidez local debido al derretimiento de glaciares costeros. El mayor arrastre de sedimentos disminuirá la penetración de luz, que afectará negativamente la fotosíntesis de las macro y microalgas. Esto tendrá consecuencias directas sobre las tramas tróficas costeras.

El aumento de temperatura también ha cambiado el tiempo de formación de hielo marino. De continuar una tendencia a incrementar la temperatura, se esperan cambios negativos en la distribución y abundancia de organismos clave para el ecosistema marino como el *krill* y un incremento de organismos gelatinosos. Esto debido a que los organismos gelatinosos (como las salpas, medusas, etc.), están mejor adaptados a las condiciones impuestas por el cambio climático y el deterioro de los ecosistemas (mayor temperatura, menor oxígeno disuelto, menor disponibilidad de alimento, etc.). Estudios han demostrado que años cálidos (p. ej., 2 °C de temperatura superficial del mar), y poco alimento (baja biomasa de microalgas), han resultado en dominancia de organismos gelatinosos y disminución del *krill*.

Otros organismos de la trama trófica antártica, como algunas especies de pingüinos y focas, dependen directamente del hielo marino para completar exitosamente parte de su ciclo de vida. Observaciones realizadas en los últimos 40 años muestran tendencias negativas en la abundancia de pingüinos, cetáceos y focas, que están relacionados con una disminución de su principal fuente de alimento, el *krill*. Cambios en las condiciones ambientales y principalmente el tiempo de formación de hielo marino no solo influirá negativamente en el ciclo de vida del *krill*, sino que también repercutirá en toda la trama trófica que de estos dependen. Otra consecuencia indirecta del cambio climático es el potencial aumento de bacterias patógenas y microalgas tóxicas, debido a que son más resistentes al incremento de factores negativos para la “salud” de los ecosistemas marinos antárticos (como acidificación, radiación ultravioleta, temperatura).



Proyección circumpolar del hábitat adecuado para el crecimiento y reproducción de *krill* tanto actual (proyección izquierda) y para fines de siglo (2100), ante emisiones actuales de CO₂. Estas proyecciones incorporan los efectos de incremento de temperatura, el retroceso de la cobertura de hielo y una disminución de la concentración de alimento para *krill* (clorofila). El hábitat favorable (con hielo y alimento) para el *krill* (rojo y naranja), es proyectado para el presente y para fines de siglo, donde ocurrirá (de acuerdo con los modelos) una pérdida del 80 % de los hábitats adecuados (Fuente: Piñones & Federov, 2016).

37. ¿Cómo el cambio climático podría afectar a los organismos que viven en el fondo marino en la Antártica?

La fauna que vive sobre el fondo marino (organismos bentónicos) es susceptible a los factores ambientales y a las perturbaciones del sustrato en que viven. Esto quiere decir que cualquier variación, ya sea un incremento y/o disminución de temperatura, salinidad, cobertura de hielo, aumento de sedimentos por deshielos, etc., podrían hacer vulnerable la existencia de las comunidades de los organismos del fondo marino. Un efecto directo reportado sobre estos organismos ha sido el estrés fisiológico, medido como el aumento de la tasa metabólica (al aumentar la temperatura), en especies ectotérmicas (no regulan su temperatura corporal, la que cambia con la temperatura del medio ambiente como peces, moluscos, crustáceos, etc.).

Los organismos bentónicos pueden ser afectados por un incremento en la temperatura y la disminución de la salinidad. Los organismos están adaptados fisiológica y conductualmente, lo cual les permite sobrevivir y prosperar en su ambiente de temperatura que oscila entre los -2°C a 2°C . Al aumentar la temperatura del agua de mar, por sobre estos niveles, como ya se ha registrado en zonas someras en la península Antártica (3°C), las especies adaptadas a vivir en un estrecho rango de temperatura (denominadas estenotermas) podrían extinguirse localmente o disminuir sus rangos geográficos. Esto se debería principalmente porque estas especies serían poco eficientes fisiológicamente a temperaturas más elevadas, lo cual puede verse exacerbado con una disminución de la salinidad, producto del deshielo en la Antártica.

Considerando solo los invertebrados marinos, se ha estimado que un 79 % de las especies endémicas de la Antártica disminuirán significativamente su distribución a causa del aumento de la temperatura de aquí a finales del siglo.



38. ¿Cómo afecta el cambio global a los microorganismos de sistemas polares?

El principal impacto del cambio global sobre los microorganismos de la criósfera tiene que ver con el aumento de la temperatura y el derretimiento de los cascos polares y masas de hielo. El aporte de agua glacial al océano modifica la estructura comunitaria de los microorganismos marinos a la vez que afecta los niveles de diversidad y potencialmente los ciclos biogeoquímicos de nutrientes que están asociados a estas poblaciones microbianas. Se esperan, asimismo, variaciones en la capacidad del océano para absorber dióxido de carbono desde la atmósfera, la cual está mediada por microorganismos fotosintéticos.

En respuesta al cambio climático, los suelos congelados de altas latitudes (conocidos como permafrost) se derriten, haciendo disponible las grandes cantidades de carbono orgánico que almacenaban (el permafrost contiene el 50 % de las reservas de carbono orgánico mundial). Las nuevas condiciones creadas por el derretimiento del permafrost conducen en particular a la aparición de zonas húmedas, turberas y lagos. Bajo el escenario de un aumento de temperatura de 2 °C, se estima que el permafrost verá su superficie reducida en 40 %. Las tasas de crecimiento y de actividad metabólica microbiana aumentan de manera exponencial con la temperatura. Una vez activos, estos microorganismos usan como sustrato (fuente de energía y carbono), la materia orgánica que volvió a estar disponible en los suelos descongelados. Las condiciones particulares que prevalecen en esos nuevos humedales (esencialmente la falta de oxígeno), favorecen procesos y microorganismos anaeróbicos. La descomposición anaeróbica se lleva a cabo por comunidades microbianas complejas, hasta la etapa final de conversión en dióxido de carbono y metano.

39. ¿Cómo afecta el derretimiento de los glaciares a los organismos marinos de altas latitudes?

Aparte del incremento de la turbidez del agua de mar, producto del derretimiento de los glaciares costeros, también se espera una reducción de los niveles de salinidad en las aguas superficiales de muchas áreas geográficas. Un cambio repentino en la salinidad puede producir una interrupción en el equilibrio del flujo de entrada y salida de agua y sales en un organismo (osmorregulación). Tales cambios en la salinidad deberían influir sobre la fisiología energética, afectando procesos vitales como la alimentación, respiración, crecimiento y reproducción de especies marinas de características estenohalinas (baja tolerancia a cambios de salinidad). En términos de la relación entre salinidad y temperatura, una reducción en la salinidad puede aumentar la sensibilidad de un organismo reduciendo su rango de tolerancia térmica, así como su capacidad para responder a ciertos niveles de cambio ambiental. Los organismos que habitan los mares del sur se caracterizan por su condición estenoica (toleran rangos ambientales estrechos), por lo que se espera que ambientes afectados por el derretimiento de glaciares u otras formas de dilución del agua de mar, representen otro factor de estrés producto del cambio climático, pudiendo impactar negativamente la fisiología de los organismos marinos, con efectos letales y subletales sobre los recursos pesqueros y ecosistemas marinos de la región de Magallanes y de la Antártica.



40. ¿Cómo cambian las poblaciones de pingüinos con el cambio climático en la Antártica?

En la Antártica, los pingüinos forman grandes colonias que se distribuyen a lo largo de las costas descubiertas de hielo permanente, en particular, en las zonas climáticamente más favorables para la vida. Aunque los pingüinos están muy bien adaptados a la vida extrema que impera en el continente antártico, pueden ser afectados por un rápido e intenso cambio climático, como el que experimenta nuestro planeta en la actualidad.

El cambio climático en la Antártica genera variaciones en las condiciones físicas del ambiente que repercuten en los seres vivos. Se pueden interrumpir los ciclos reproductivos, debido al incremento en la temperatura, que acelera el derretimiento de los hielos marinos en el verano o también porque durante inviernos muy fríos, el hielo perdura más tiempo, lo que acorta la estación de crecimiento de los polluelos, además de la carencia de alimento. En el caso del pingüino emperador, se ha visto que, por falta de hielo, ha movido sus colonias hacia el sur. Similar patrón de disminución de colonias o movimiento de colonias ha sido observado tanto en el pingüino barbijo, así como en el pingüino de Adelia. El pingüino papúa es uno de los pocos que no ha visto afectadas sus poblaciones por la falta de hielo, es decir, los cambios en las poblaciones de pingüinos antárticos son indicadores de las variabilidades climáticas observadas durante las últimas décadas.

TEMPERATURAS
ANTÁRTICAS

**La temperatura más
baja registrada fue de
-93°C**

(agosto 2010, en el domo Argus, en la parte más elevada de la meseta antártica.)

TEMPERATURAS ANTÁRTICAS

¿SABÍAS QUÉ?



LA TEMPERATURA
MEDIA EN
VERANO ES DE

-30°C



LA TEMPERATURA
MEDIA EN
INVIERNO ES DE

-60°C

LAS TEMPERATURAS
DEL POLO SUR
SON AL MENOS

20°C

MÁS BAJAS QUE LAS
DEL POLO NORTE



Desde 1880, la
temperatura promedio
del planeta ha

AUMENTADO

1°C

A photograph of an Antarctic landscape featuring snow-covered mountains, a dark body of water, and a small red-roofed building on a snowy shore. A white geometric line pattern is overlaid on the top right, with one triangle filled with a light blue color.

Consecuencias para Chile

41. ¿Cómo ha influido la Antártica en los cambios recientes en el clima de Chile?

La Antártica afecta los regímenes de precipitación en Chile centro-sur. Observaciones y simulaciones muestran que el enfriamiento estratosférico, resultante del agujero de ozono sobre la Antártica, favorece la fase positiva del modo anular del sur (SAM) en el verano austral. Esta se asocia con una disminución de la presión atmosférica en latitudes altas y un aumento en latitudes medias, lo que genera cambios de alcance hemisférico en la circulación atmosférica.

Las precipitaciones en la costa del Pacífico sur de Sudamérica (zona centro-sur de Chile) provienen en parte de tormentas originadas en latitudes medias dentro del cinturón de vientos del oeste y en parte de la condensación de estos vientos húmedos al ascender por la barrera orográfica de los Andes. La intensidad de estas precipitaciones está modulada también por la variabilidad natural debida a distintos modos de circulación atmosférica de gran escala como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO) y SAM.

En la zona centro-sur de Chile se ha observado una reducción en la cobertura de nubes y en las precipitaciones durante las últimas décadas. La tendencia negativa en las precipitaciones en esta región comenzó alrededor de 1980 (más o menos simultáneamente con la detección del agujero de ozono) y se ha observado que es más significativa durante el verano austral. Varios trabajos han relacionado la disminución en las precipitaciones en la zona centro-sur de Chile (30° - 45° S) con la tendencia hacia valores positivos del SAM durante el verano austral, resultante de anomalías en la circulación atmosférica originadas en la Antártica.



42. ¿Cómo afecta al balance hídrico el retroceso de los glaciares en Chile?

Los glaciares se encuentran presentes en todo los Andes chilenos y concentran alrededor del 75 % del área cubierta por glaciares en Sudamérica. Ellos se encuentran desde las altas cumbres de los volcanes del norte grande, hasta las montañas que coronan los fiordos en Magallanes. La Unidad de Glaciología y Nieves de la Dirección General de Aguas ha definido cuatro zonas glaciológicas que cubren todo el país: Norte, Centro, Sur y Austral.

Los glaciares retroceden porque están en desequilibrio con el clima actual. Estos se formaron en un pasado más frío y/o más lluvioso que lo que observamos hoy en día. El retroceso de glaciares implica un aporte de agua neto a las cuencas hidrográficas de Chile. Es decir, en cuencas que contienen glaciares que están en retroceso, el caudal total disponible es mayor que el que existiría en un escenario en que no existiesen esos glaciares. Este efecto se manifiesta en el caudal total anual, pero con más importancia en el caudal durante los meses de verano. En las cuencas de montaña de Chile central, los glaciares contribuyen al caudal de los ríos fundamentalmente entre los meses de enero y marzo. El caudal adicional aportado por un glaciar en retroceso es proporcional a la tasa de derretimiento superficial (mm de agua por unidad de área) y al tamaño de su superficie. Cuando un glaciar está en su fase inicial de retroceso, se produce una tendencia creciente de caudal aportado. A medida que el glaciar se acerca a un nuevo equilibrio con el clima, su superficie y la tasa de derretimiento tienden a disminuir, debido al retroceso hacia zonas de mayor elevación (más frías); esto resulta en que la contribución al balance hídrico se estabilice en valores que pueden ser 0 (el glaciar desaparece), o positivos, pero menores que la contribución inicial.

43. ¿A qué tasa se están derritiendo los glaciares de montaña en Chile?

Chile alberga la mayor parte de la superficie con glaciares de Sudamérica (~80 %) con una superficie cercana a 23 000 km². La mayor parte se encuentra en la Patagonia y Tierra del Fuego (~90 %). Actualmente, los registros de las variaciones frontales históricas de casi 100 glaciares indican que 87 % de ellos ha sufrido un retroceso desde pocos metros hasta un kilómetro por año (Glaciar Jorge Montt). En los últimos 50 años, los glaciares de los Andes del Sur han perdido masa en una de las tasas más altas del mundo (adelgazan a aproximadamente 1 metro equivalente de agua por año). Diferentes estudios han estimado que el derretimiento anual del Campo de Hielo Sur y Campo de Hielo norte suman entre 15 y 24 gigatoneladas (1Gt = 10¹² kg) de hielo, lo que equivale a entre el 50 % y el 80 % de la capacidad total de los embalses de Chile. Estudios que muestran la tasa de derretimiento de los glaciares de montañas en distintas regiones del país, en particular en algunos glaciares de la región metropolitana (cuenca del Manzano), han reportado un descenso de hasta 26.9 % del volumen de hielo entre 1955 a 2013 (58 años). Los glaciares de la cordillera de Darwin en la región de Magallanes han mostrado un patrón diverso, mientras los de la sección sur no presentan tendencias claras de retroceso, los del norte se han visto más afectados. Por ejemplo, el glaciar Marinelli (retrocedió 15 km entre 1913 y 2011) y el ventisquero (retrocedió 2.7 km entre 1986 y 2006) (Bown *et al.*, 2014).

44. ¿En qué forma la contaminación antropogénica (actividades mineras, extractivas) está afectando a los glaciares de los Andes?

Parte de la pérdida de masa glacial está relacionada con altos niveles de contaminación regional y local, donde se identifica la presencia de aerosoles atmosféricos. Todos estos antecedentes demuestran que al igual que en el resto del mundo, en Chile hay un número importante de centros urbanos, con parques industriales de diversos tamaños, cuyas emisiones pueden alcanzar potencialmente los glaciares de montaña.

En la cordillera de los Andes, la deposición de aerosoles se ha asociado a fuentes de quema de biomasa, de origen urbano-industrial y a sus efectos sobre el retroceso de glaciares. Esto demuestra que el transporte de partículas, desde distancias largas y cortas, es capaz de llegar hasta los glaciares de montaña de nuestra cordillera. El resultado directo de la deposición de estas partículas de diverso origen sobre la superficie de la criósfera andina tiene efectos inmediatos sobre los glaciares de la cordillera de los Andes. Sus efectos se resumen en un cambio negativo del albedo (pérdida de reflexión), aceleramiento del derretimiento de la nieve, cambio en la constante crioscópica, corrimiento de la “cota cero”, todo esto redundando en una menor capacidad de acumulación de nieve y en un deterioro paulatino de la calidad química del agua de deshielo.

45. ¿Qué es el ambiente periglacial y cuál es el impacto del cambio climático sobre él?

El concepto periglacial se refiere a una serie de fenómenos geomorfológicos relacionados a un ambiente frío, tales como el congelamiento y descongelamiento estacional o diurno que está presente en ambientes no glaciares de los polos y áreas montañosas de alrededor del mundo. Comúnmente, la geomorfología, característica de estas áreas libres de un entorno glacial, es descrita como de zonas periglaciales. En este ambiente, el permafrost constituye una de las principales componentes del paisaje. Por otra parte, en ambientes periglaciales de montaña, los glaciares rocosos constituyen las expresiones geomorfológicas más importantes de la presencia actual y pasada del permafrost. Al igual que el impacto del cambio climático antropogénico sobre el retroceso de los glaciares, si la temperatura de la tierra sigue aumentando en el siglo XXI tal como se proyecta, se espera también que las zonas periglaciales y de permafrost retrocedan a zonas de gran altitud y latitud.

Se espera que el cambio climático afecte el ambiente periglacial y produzca cambios en los regímenes hidrológicos, esto es afectar la cantidad y calidad del agua dulce (p. ej., la carga de materiales particulados y disueltos), un incremento de gases invernadero a la atmósfera y cambios en la composición de la vegetación circundante a los glaciares.



46. ¿Existe evidencia del proceso de acidificación en los mares interiores de la Patagonia norte?

En la zona norte de la Patagonia, el sistema marino es fuertemente influenciado por los caudales de grandes ríos que desembocan en la zona costera, incluyendo fiordos, bahías y canales y afectando las propiedades químicas de la superficie del mar. Los estudios indican que, en los fiordos influenciados por caudales de ríos presentan una fuerte variabilidad estacional, con valores de pH de 7.4 a 7.6 durante los meses de invierno. Por lo tanto, y por procesos biológicos (respiración) y oceanográficos (masas de agua), estos fiordos muestran en su dinámica anual valores de pH bajos. Los resultados también evidencian que para fiordos con influencia de glaciar en la Patagonia sur, este patrón sería diferente, con valores de pH más altos.

Por otro lado, y de acuerdo con estudios realizados en la Patagonia norte, se pronostica un 20 % menos de precipitación y por lo tanto un menor caudal de agua dulce en uno de los ríos más caudalosos de Chile, río Puelo. El agua dulce cumple múltiples funciones en el sistema marino, desde originar la circulación tipo estuarina, aguas ricas en oxígeno, baja concentración de partículas y baja en temperatura, entre otros. Un menor caudal de agua dulce en los meses de verano y otoño podría incidir en cambios en la concentración de oxígeno (menor), temperatura (mayor), salinidad (mayor), y junto a la sinergia de factores climáticos (mayor radiación, menor magnitud de vientos) es altamente probable el desarrollo de un mayor crecimiento de organismos nocivos y tóxicos para la fauna marina y la población humana.

IMPACTOS DEL EFECTO INVERNADERO SOBRE LA CRIÓSFERA

Durante el siglo XX, la elevación del nivel del mar a escala mundial ha sido de unos **15 cm**.

**Pero al ritmo actual el
nivel del mar aumenta
3.6 mm al año**

IMPACTOS DEL EFECTO DE INVERNADERO SOBRE LA CRIÓSFERA

SI HAY
UNA REDUCCIÓN
DE LAS EMISIONES

Se perderá el
25% del
PERMAFROST



La elevación del nivel
del mar será de
20 a 60 cm
de aquí al 2100

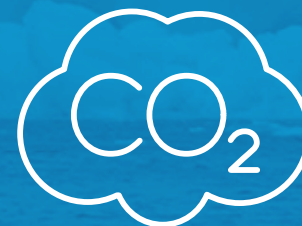
SI NO HAY
UNA REDUCCIÓN
DE LAS EMISIONES



**LA CRIÓSFERA SE
SEGUIRÁ DERRITIENDO**

Su deshielo podría **INCREMENTAR**
notablemente la
**CONCENTRACIÓN DE GASES DE
EFECTO INVERNADERO**
en la atmósfera

Se perderá el
70%
del **PERMAFROST**
de aquí al 2100



A photograph of a massive glacier flowing between dark, rocky cliffs. The foreground is filled with icebergs floating in a body of water. A white geometric line pattern, resembling a network or mesh, is overlaid on the left side of the image, with one polygon filled with a solid teal color.

Mitigación, adaptación, soluciones basadas en la naturaleza

47. ¿Cómo se puede mitigar el calentamiento global desde los sistemas de suelos de altas latitudes?

El suelo, en general, junto con los océanos constituyen los sumideros más importantes de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), el gas de efecto invernadero más relevante generado por la actividad humana.

¿Cómo se puede secuestrar el CO_2 de la atmósfera por el suelo antártico? En la fotosíntesis, las plantas fijan el CO_2 de la atmósfera el cual es transformado a través de la energía lumínica a biomasa vegetal que luego se incorpora al suelo (p. ej., los musgos y líquenes muertos). Entre 70 % y 95 % de la materia orgánica que se incorpora al suelo es respirada como CO_2 por los microorganismos del suelo, el resto es transformado a humus, es decir, un carbono más procesado por los mismos microorganismos. Este humus se une a las arcillas del suelo formando lo que se denomina complejos humus-arcilla. Estos complejos se acumulan en el suelo ya que son resistentes a la descomposición. Esto es lo que se conoce como «secuestro de carbono».

Bajo un escenario de cambio climático, es difícil estimar los efectos de un posible secuestro de carbono en las reservas orgánicas de los suelos antárticos. El aporte de materia orgánica al suelo antártico está limitado por la temporada de crecimiento (muy corta) y las bajas temperaturas. Su estudio, sin embargo, sirve como modelo de formación del suelo y cobra excepcional importancia para los científicos conocer más acerca del secuestro de carbono al inicio de la formación del suelo.



48. ¿Qué es la vulnerabilidad al cambio climático en sistemas de altas latitudes?

En la Antártica y en el océano Austral, producto del retroceso de glaciares, se prevén cambios importantes en términos del calentamiento global, la acidificación del océano y su desalinización. En general, se espera que las regiones de altas latitudes sean más vulnerables al cambio climático comparado con áreas de bajas latitudes. Esto debido a la mayor velocidad de cambio y a las mayores anomalías de temperatura en áreas de altas latitudes.

Algunos factores que explican estos cambios son el incremento de gases invernadero, la intensificación de los vientos del oeste y el corrimiento hacia el sur de frentes polares. Los organismos en estas áreas de altas latitudes son muy vulnerables a estos factores. La acidificación afectará a los organismos como crustáceos y a los organismos bentónicos (que viven sobre el fondo). En el caso de mamíferos y aves, los cambios en sus poblaciones dependerán de su flexibilidad para buscar otras áreas de alimentación y reproducción menos impactadas por el cambio climático.

Estudios a la fecha han registrado que ciertos organismos revelan una alta sensibilidad (en estudios a nivel de individuo y/o población), de acuerdo con sus respuestas fisiológicas, mientras que, en otros organismos, la respuesta puede ser menos evidente (en estudios a nivel de comunidad y/o ecosistema). Pequeños incrementos en la temperatura producen grandes cambios en las tramas tróficas, por ejemplo, un cambio de *krill* a organismos gelatinosos o pequeñas células fotosintéticas (diatomeas) a pequeños flagelados no fotosintéticos. La pérdida de masa de glaciares producirá una mayor diferencia entre una capa superior menos salada y una inferior más salada, lo que retarda la entrada de nutrientes a la zona iluminada del océano y reduce su productividad.



49. ¿Son los glaciares los «ahorros del futuro» para los sistemas de gestión del agua en Chile?

Sí, los glaciares son “ahorros para el futuro”, actúan hoy mismo como un “banco” que acumula y nos presta agua. Son embalses de agua naturales que acumulan masa en períodos de bonanza (períodos fríos y húmedos) y nos dan lo acumulado cuando se retraen en períodos cálidos y secos, entregando proporcionalmente más agua cuando más la necesitamos. Tienen de esta manera un efecto regulador de los caudales, amortiguando los efectos de las sequías y permitiendo que podamos desarrollarnos en lugares donde la oferta hídrica muchas veces no es suficiente para abastecer la demanda.

Entre el año 2000 y 2018, los glaciares descubiertos (o blancos) de los Andes centrales perdieron en promedio 0.31 m de agua equivalente por año. Esto significa que entregaron durante cada año el equivalente a 556 millones de hectómetros cúbicos (Hm^3) de agua para esta región andina. Si comparamos volúmenes, esto representa 2.2 veces el volumen del embalse El Yeso en su máxima capacidad.

La Estrategia Nacional de Glaciares menciona una primera aproximación del agua acumulada en ciertas cuencas en Chile (Copiapó, Maipo, Tinguiririca, Maule, Bueno y Baker), en donde se calculó que las cuencas analizadas acumulaban más de 200 km^3 , lo que representa más de 25 veces la capacidad total de almacenamiento de los embalses construidos en la década de los noventa en Chile.



50. ¿Qué acciones y soluciones tecnológicas se deben aplicar para mitigar el impacto de la actividad humana sobre la criósfera?

Es necesario monitorear los valles en desglaciación, sobre todo aquellos en los que este retroceso se ha acelerado últimamente. Esto debería incluir monitoreo remoto (satelital), pero también en terreno. Asimismo, se requiere educar a las poblaciones vecinas a zonas de peligros naturales sobre su entorno, que estas conozcan y comprendan los geoprocesos que le permitan enfrentar con mayor conocimiento estos cambios acelerados. Instruir a los turistas para cuidar y proteger sectores con glaciares, de gran atractivo turístico. De ser necesario, aplicando medidas de mitigación, tanto estructurales (que implican edificación de infraestructura, como diques o desagües), como no estructurales (que pueden involucrar alternativas más naturales y/o de adaptación social).

Según el tipo de actividades antropogénicas y sus impactos sobre la criósfera, se deberán seleccionar las tecnologías más apropiadas. Por ejemplo, para aumentar la acumulación de nieve en sectores de alta montaña y de glaciares, se ha desarrollado una tecnología derivada del control de avalanchas, compuesta por deflectores de viento que hacen que se acumule mayor cantidad de nieve en ciertas laderas, donde estos dispositivos aerodinámicos están instalados. Otra tecnología consiste en geotextiles o geomembranas desarrolladas para cubrir ciertas zonas de glaciares y de esta manera protegerlos de la radiación del sol y de las temperaturas elevadas. También se utiliza frecuentemente la fabricación de nieve sobre un glaciar. Existen diversas experiencias orientadas a reducir la tasa de ablación en los glaciares. En Chile, en parte del glaciar Bello (ver imagen siguiente), el empleo de una cubierta de detritos rocosos sobre hielo o nieve, redujo en 70 % la tasa de ablación. Finalmente, sin duda la mejor solución será realizar esfuerzos globales para evitar o minimizar las emisiones de gases invernadero, evitando de esta forma que aumente la temperatura del planeta.



Glaciar Bello, lugar escogido para probar el *Glacier Coolers*, mallas hechas de textiles especiales, que cubren el glaciar y permiten evitar hasta el 65 % del derretimiento de la masa de hielo.

(Fuente: Fundación Terram. Disponible en <https://www.cambioclimaticochile.cl/2018/04/crean-estructuras-para-contener-glaciares/>)

The background of the slide is a solid blue color. Overlaid on this background is a complex, abstract pattern of thin, white, irregular lines. These lines intersect to form a variety of geometric shapes, primarily triangles and polygons of different sizes. The pattern is dense and covers the entire area of the slide, creating a textured, crystalline effect.

Referencias



Bown, F., Zenteno, P., Bravo, C., & Cawkwell, F. (2014). First glacier inventory and recent glacier variations on Isla Grande de Tierra del Fuego and adjacent islands in Southern Chile. Heidelberg, pp. 661 -674,
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-79818-7>

Cereceda-Balic, F., M. R. Palomo-Marín, E. Bernalte, V. Vidal, J. Christie, X. Fadic, J. L. Guevara, C. Miro, E. Pinilla Gil (1967) Impact of Santiago de Chile urban atmospheric emissions on anthropogenic trace elements enrichment in snow precipitation at Cerro Colorado, Central Andes. *Atmospheric Environment* 01/2011; 47, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.11.045

Cereceda-Balic, F., V. Vidal, H. Moosmüller, M. Lapuerta (2018). Reduction of snow albedo from vehicle emissions at Portillo, Chile. *Cold Regions Science and Technology*, 146: 43-52, doi: org/10.1016/j.coldregions.2017.11.008

Cereceda-Balic, F., T. Gorena, C. Soto, V. Vidal, M. Lapuerta, H. Moosmüller (2019). Optical determination of black carbon mass concentrations in snow samples: A new analytical method. *Science of the Total Environment*, 697: 133934. DOI information: 10.1016/j.scitotenv.2019.133934, Agosto, 2019.

Hansen, J., M. Sato, G. Russell & P. Kharecha (2013). Climate sensitivity, sea level, and atmospheric carbon dioxide. *Phil. Trans. Roy. Soc. A*, 371, 20120294, doi:10.1098/rsta.2012.0294.

Orsi, A. H., T. Whitworth & W. D. Nowlin (1995). On the meridional extent and fronts of the Antarctic circumpolar current. *Deep-Sea Res. I*, 42: 641–673.

Piñones A. & A. V. Federov (2016). Projected changes of Antarctic *krill* hábitat by the end of the 21st century. *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL069656.

Zachos J. C., G. R. Dickens & R. E. Zeebe (2008). An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. *Nature* 451: 279-283.

The background of the entire page is a solid blue color. Overlaid on this background is a complex, abstract pattern of thin, white, straight lines. These lines intersect at various angles to form a multitude of irregular, multi-sided polygons of different sizes. The pattern is dense and covers the entire area, creating a textured, crystalline effect.

Glosario

- **Ablación de un glaciar:** Es la pérdida de masa de hielo de un glaciar debido a diferentes procesos. El proceso de ablación más importante es la fusión o el derretimiento de hielo (cambio de estado del hielo sólido a agua líquida). También existen pérdidas de masa por desprendimiento de témpanos (*calving*) o por sublimación (cambio de estado de hielo sólido a vapor de agua).
- **Balance de masa:** Cambio neto de la masa de un glaciar en un período específico. Es la resta entre la acumulación (ganancia de masa) y la ablación (pérdida de masa). El balance de masa anual es un buen indicador del estado de salud de un glaciar.
- **Biota:** Conjunto de organismos vivos que forman parte de un ecosistema. Es un término genérico que considera al componente biológico.
- **Circulación de retorno meridional:** Sistema de corrientes horizontales y verticales asociadas principalmente con la formación de agua profunda en el Atlántico Norte. Abarca todas las cuencas oceánicas y transporta grandes cantidades de agua, calor, sal, carbono, nutrientes y otras sustancias alrededor de todo el planeta. Además,

conecta la superficie del océano y la atmósfera con las grandes reservas de aguas profundas. Por lo tanto, es de vital importancia para el sistema climático mundial.

- **Criología:** Ciencia de las criósferas.
- **Criósfera:** Sistema de todos los componentes congelados del sistema Tierra que están sobre o bajo tierra y la superficie oceánica. Esto incluye nieve, glaciares, casquetes de hielo, témpanos de hielo (*icebergs*), hielo marino, lagos congelados, ríos congelados, el permafrost y suelos congelados estacionalmente.
- **Desglaciación:** Es la pérdida de la criósfera (tal como la reducción del contenido global de hielo debido al calentamiento global).
- **El Niño Oscilación del Sur (ENOS):** Oscilación interanual que varía entre 2 y 8 años, conocida por aguas superficiales más cálidas en promedio en el Pacífico tropical oriental durante El Niño, y más frías en La Niña.
- **Endémico:** Indica la distribución natural de una determinada especie en una cierta región o lugar y que no se la encuentra en otra parte del mundo.

- 
- **Fiordo:** Cuerpo de agua costero, generalmente angosto y profundo, que ocupa el espacio dejado por una lengua glacial que retrocedió después de las últimas glaciaciones.
 - **Frentes oceánicos:** Regiones en donde las propiedades del agua cambian en forma marcada, sobre una distancia relativamente corta (en el océano es de alrededor de 100 km).
 - **Glaciar cubierto:** Masa de hielo glacial que presenta cobertura detrítica en la parte superficial. Estas cubiertas pueden variar desde unos pocos centímetros a varios metros hacia zonas más bajas.
 - **Glaciar descubierto o glaciar blanco:** Glaciar que no presenta cobertura detrítica.
 - **Glaciar rocoso:** Geoforma que contiene una mezcla de material rocoso y hielo con forma de lengua o lóbulo. Se caracteriza por presentar estructuras fluidales (cordones y surcos), un escarpe frontal y lateral distintivo, como resultado del desplazamiento lento ladera o valle abajo.
 - **Glaciar:** Masa de hielo que se origina en la superficie terrestre por acumulación, compactación y recrystalización de la nieve, que muestra evidencias de flujo en el pasado o en la actualidad. Su formación es posible si existe una zona en el glaciar en la cual la precipitación anual de nieve supera a la ablación de verano (vea zona de acumulación). Esto ocurre en zonas frías de altas latitudes (p. ej., polos) o de gran altitud (p. ej., alta montaña).
 - **Hidrosfera:** Parte del planeta que es ocupada por el agua en todos sus estados. La hidrosfera contiene los océanos, mares, ríos (terrestres y subterráneos), glaciares, lagos, lagunas (terrestres y subglaciares), además del vapor de agua contenido en la atmósfera. Constituye aproximadamente el 70 % de la superficie de la Tierra.
 - **Krill antártico:** Pequeño crustáceo de forma parecida a los camarones, que se encuentra en aguas libres en torno al continente antártico, conforma densas agrupaciones que lo convierte en una de las especies con mayor



biomasa del planeta. Se alimenta de fitoplancton y, a su vez, es el principal alimento de ballenas, focas, lobos marinos, aves voladoras, pingüinos, peces y calamares.

- **Línea de equilibrio:** Zona de glaciar en la cual el balance de masa es cero. La línea de equilibrio divide el glaciar en la zona de acumulación y la zona de ablación.
- **Líquenes:** Organismos del reino Fungi (hongos), llamados “simbiontes” porque están formados por un hongo y un alga. Son los organismos dominantes de la tundra polar (ecosistema terrestre).
- **Musgos:** Organismos vegetales del reino Plantae (plantas), que son pequeñas plantitas que carecen de sistema vascular. Corresponden a las plantas más antiguas, se pueden considerar las abuelas de las plantas actuales y dominan la parte verde de la tundra antártica.
- **Organismos ectotérmicos:** Organismos que dependen principalmente de fuentes de calor externas; su temperatura corporal cambia con la temperatura del medio ambiente.

- **Permafrost:** Suelo permanentemente (*perma*) congelado (*frost*). Es la capa de suelo o de roca de profundidad variable en la que la temperatura ha estado por debajo de cero ininterrumpidamente durante miles de años. Algunos estudios indican que el permafrost contendría cerca de 1.8 billones de toneladas de dióxido de carbono y metano (el doble del carbono almacenado en la atmósfera). El cambio climático podría acelerar que este carbono almacenado sea enviado a la atmósfera debido a procesos biológicos.
- **Polinias:** Regiones grandes y persistentes de agua rodeadas de hielo marino. Cuando el hielo se derrite en áreas donde normalmente se esperaría que hubiera hielo delgado, especialmente en primavera-verano, se forman estas estructuras las que se caracterizan por mayor penetración de energía solar, presentar incrementos de productividad y alojar una alta diversidad de organismos.
- **SROCC:** Informe Especial sobre el Océano y la Criósfera en un Clima Cambiante. Los conocimientos evaluados en este informe describen los riesgos y los desafíos de índole climática actuales y futuros y proporcionan conocimientos que facilitan la adopción de medidas a los tomadores de decisiones sobre políticas públicas.

- 
- **Sumideros de carbono:** Depósitos naturales (océanos y bosques) y artificiales (ciertas tecnologías y productos químicos) que absorben y capturan el dióxido de carbono de la atmósfera reduciendo así su concentración en el aire.
 - **Tundra:** Ecosistema de zonas polares y montañas que carece de árboles y arbustos.
 - **Turbera:** Cuencas lacustres, generalmente de origen glaciar, que actualmente están repletas de material vegetal más o menos descompuesto y que conocemos como turba de agua dulce. En Chile, 3 % del territorio nacional se compone por turberas y humedales (aprox., 4.6 millones de hectáreas, según CONAF, 1999). De estos ecosistemas, cerca del 70 % están ubicados en la Patagonia Chilena, abarcando desde la región de Los Ríos hasta el cabo de Hornos en la región de Magallanes.
 - **Unidades prácticas de salinidad (UPS):** Gramos de sal por litro de solución; por ejemplo, una salinidad de 30 UPS equivale aproximadamente a 30 gramos de sal por un litro de agua.
 - **Zona de ablación:** Zona de un glaciar con balance de masa anual negativa, en la cual la ablación de verano supera la precipitación anual de nieve. Se encuentra normalmente en las partes bajas del glaciar.
 - **Zona de acumulación:** Zona de un glaciar en el cual la precipitación anual de nieve supera a la ablación de verano (balance de masa positivo). Se encuentra normalmente en las partes altas del glaciar.

Paulina Aldunce

Universidad de Chile
(CR)2

Claudia Andrade

Universidad de Magallanes
Instituto de la Patagonia

Jahir Anicama

Pontificia Universidad Católica de Chile
CARE Perú, PEGASUS project

Patricio Arana Espina

Pontificia Universidad Católica
de Valparaíso
Escuela de Ciencias del Mar

Guillermo Azócar Sandoval

Atacama Ambiente Consultores

Léa Cabrol

Universidad de Chile
Instituto de Ecología y Biodiversidad
Institut de Recherche pour le
Développement (IRD)

Jorge Carrasco

Universidad de Magallanes
Dirección Meteorológica de Chile

Angélica Casanova-Katny

Universidad Católica de Temuco
Facultad de Recursos Naturales
Laboratorio de Ecofisiología Vegetal
y Cambio Climático

Lohengrin Cavieres

Universidad de Concepción
Departamento de Botánica
Instituto de Ecología y Biodiversidad
(IEB)

Francisco Cereceda-Balic

Universidad Técnica
Federico Santa María
Departamento de Química
Centro de Tecnologías Ambientales
(CETAM)

Duncan Christie

Universidad Austral de Chile
(CR)2

Pedro Cid-Agüero

Universidad de Magallanes
Centro de Investigación Gaia Antártica
(CIGA)

Raúl R. Cordero

Universidad de Santiago
Departamento de Física
@AntarcticaCL

Sebastián Andrés Crespo

Pontificia Universidad Católica
de Valparaíso
Instituto de Geografía
(CR)2

Alessandro Damiani

Universidad de Santiago
Departamento de Física
@AntarcticaCL

Alejandro Dussailant-Jones

Universidad de Aysén
Departamento Ciencias Naturales y
Tecnología

Alfonso Fernández

Universidad de Concepción
Departamento de Geografía

Camila Fernández

Universidad de Concepción
Departamento de Oceanografía
CNRS, COPAS Sur Austral,
Centro FONDAP-IDEAL, INCAR

Francisco Fernandez

Universidad Andrés Bello
Laboratorio de Análisis Isotópico
Facultad de Ingeniería

Máximo Frangopulos

Universidad de Magallanes
Centro de Investigación Gaia Antártica
(CIGA)
Centro FONDAP-IDEAL

Felipe Fuentes

Servicio Nacional de Geología y Minería
(Sernageomin)

José Garcés-Vargas

Universidad Austral de Chile
Instituto de Ciencias Marinas y
Limnológicas
Facultad de Ciencias
Centro FONDAP-IDEAL

Ayôn García

Universidad de Atacama
Instituto de Investigaciones
Científicas y Tecnológicas (IDICTEC)
Laboratorio de la Criósfera y Aguas
(LICA)

Ricardo Giesecke

Universidad Austral de Chile
Instituto de Ciencias Marinas y
Limnológicas
Facultad de Ciencias
Centro FONDAP-IDEAL

María Angélica Godoi Millán

Universidad de Magallanes
Centro de Investigación Gaia Antártica
(CIGA)

Iván Gómez Ocampo

Universidad Austral de Chile
Instituto de Ciencias Marinas y
Limnológicas
Centro FONDAP-IDEAL

Inti González

Línea de Cambio Climático y
Variaciones Recientes
Centro Regional Fundación CEQUA

Humberto E. González

Universidad Austral de Chile
Instituto de Ciencias Marinas y
Limnológicas
Facultad de Ciencias
Centro FONDAP-IDEAL

Juan Höfer

Pontificia Universidad
Católica de Valparaíso
Escuela de Ciencias del Mar
Centro FONDAP-IDEAL

José Luis Iriarte

Universidad Austral de Chile
Instituto de Acuicultura
Centro FONDAP-IDEAL

Pablo Iribarren Anacona

Universidad Austral de Chile
Instituto de Ciencias de la Tierra

Fabrice Lambert

Pontificia Universidad Católica de Chile
(CR)2
Núcleo Milenio Paleoclima

Marcelo Leppe

Instituto Antártico Chileno

Shelley MacDonell

Centro de Estudios Avanzados en
Zonas Áridas (CEAZA)

Francisco Matus

Universidad de La Frontera
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Laboratorio de Conservación y
Dinámica de Suelos Volcánicos

James McPhee

Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Físicas y
Matemáticas

Mireia Mestre Martín

Universidad de Concepción
Departamento de Oceanografía
Centro FONDAP-IDEAL

Jorge Navarro Azócar

Universidad Austral de Chile
Instituto de Ciencias Marinas y
Limnológicas
Facultad de Ciencias
Centro FONDAP-IDEAL

Nelso Navarro

Universidad de Magallanes
Facultad de Ciencias
Centro FONDAP-IDEAL

Luis Miguel Pardo

Universidad Austral de Chile
Instituto de Ciencias Marinas y
Limnológicas
Centro FONDAP-IDEAL

Gemita Pizarro

Instituto de Fomento Pesquero
Departamento Medio Ambiente
Centro de Estudios de Algas Nocivas

Elie Poulin

Universidad de Chile
Laboratorio de Ecología Molecular

Marius Shaefer

Universidad Austral de Chile
Instituto de Ciencias Físicas y
Matemáticas

Marcelo Somos

Universidad de la Frontera
Centro Butamallín: Investigación en
Cambio Global

Felipe Ugalde

Geoestudios

Pablo Wainstein

BGC Engineering

The background of the slide is a solid blue color. Overlaid on this is a complex, abstract pattern of thin, white, straight lines. These lines intersect to form a variety of geometric shapes, primarily triangles and quadrilaterals, creating a low-poly or crystalline effect. The lines are distributed across the entire frame, with some areas being more densely packed than others.

Enlaces

Association of Polar Early Career Scientists - Chile
<https://apecschile.wixsite.com/apecs-chile>

Atacama Ambiente Consultores
<http://www.atacamamb.com/>

Atlas de Oleaje de Chile
<https://oleaje.uv.cl/>

BGC Engineering
<https://bgcengineering.ca/bgc-engineering-esp.html>

Centro de Cambio Global UC
<https://cambioglobal.uc.cl/>

Center of Applied Ecology & Sustainability (CAPES)
<http://www.capes.cl/>

Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)
<http://www.cnrs.fr/>

Centro Butamallín: Investigación en Cambio Global
<https://butamallin.ufro.cl/>

Centro Regional Fundación CEQUA. Línea de Cambio Climático y Variaciones Recientes
<http://www.cequa.cl/cequa/cambio-climatico.html>

Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2
<http://www.cr2.cl/>

Centro de Ciencias Ambientales (EULA)
<http://www.eula.cl/>

Centro de Conservación Marina de la Pontificia Universidad Católica de Chile
<https://chileesmar.cl>

Centro de Datos Oceanográficos y Meteorológicos (CDOM)
<http://www.cdom.cl>

Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA)
<http://www.ceaza.cl/>

Centro de Estudios Avanzados (UPLA)
<https://www.upla.cl/estudiosavanzados/es/inicio/>

Centro de Estudios Científicos (CECs)
<http://www.cecs.cl/>



Centro de Investigación Dinámica de Ecosistemas Marinos de Altas Latitudes (IDEAL)

<http://www.centroideal.cl>

Centro de Investigación Gaia Antártica (CIGA)

<http://www.umag.cl/gaiaantartica/>

Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN)

<https://www.cigiden.cl>

Centro de Investigación Oceanográfica (COPAS Sur-Austral)

<http://www.sur-austral.cl>

Centro de Investigación e Innovación para el Cambio Climático (CiCC)

<http://www.ciicc.cl/>

Centro de Observación Marino para Estudios de Riesgos del Ambiente Costero (COSTAR-UV)

<https://costar.uv.cl/>

Centro Interdisciplinario para la Investigación Acuícola (INCAR)

<http://www.incar.cl/>

Centro para el Estudio de Forzantes Múltiples en Sistemas Socio-Ecológicos Marinos (MUSELS)

<http://www.eula.cl/musels>

Centro de Tecnología Ambientales (CETAM)

<http://cetam.usm.cl/>

Comisión para la Conservación de los Recursos Vivos Marinos Antárticos

<https://www.ccamlr.org/es/organisation/pagina-de-inicio>

Comité Científico de Investigaciones Antárticas

<https://www.scar.org/>

Dirección General de Aguas (DGA). Unidad de Glaciología y Nieves

<https://dga.mop.gob.cl/>

Geoestudio

<https://www.geoestudios.cl/esp/>

Global Ocean Acidification Observing Network (GOA-ON)

<http://www.goa-on.org/>



Instituto Antártico Chileno
<http://www.inach.cl>

Instituto de Ciencias Naturales Alexander von Humboldt
(ICNAvH)
<http://www.uantof.cl/institutos/oceanologicas>

Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB)
<https://ieb-chile.cl/>

Instituto de Fomento Pesquero (IFOP)
<https://www.ifop.cl>

Instituto Milenio de Oceanografía (IMO)
<http://es.imo-chile.cl/>

International Maritime Organization (IMO)
<https://www.imo.org>

International Associated Laboratory «Marine
Biogeochemistry and Functional Ecology»
<http://www.liamorfun.cl>

Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
<http://www.lincg.uc-csic.es/>

Laboratorio de Oceanografía Satelital (OCESAT)
<http://oceanografiasatelital.cl/>

NASA Climate Change
<https://climate.nasa.gov/>

Núcleo Milenio Paleoclima
<http://www.iniciativamilenio.cl/paleoclima/>

Núcleo Milenio de Ecología y Manejo Sustentable de Islas
Oceánicas (ESMOI)
<http://www.esmoi.cl/>

Ocean & Climate Platform
<https://ocean-climate.org/>

Organismo Internacional de Energía Atómica (OEIA-ONU)
<https://www.iaea.org>

Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC)
<https://www.ipcc.ch/>

Informe SROCC: Informe especial sobre el océano y la
criósfera en un clima cambiante
<https://www.ipcc.ch/srocc/>



Plataforma Intergubernamental de Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos (IPBES)
<https://www.ipbes.net>

Red de estaciones meteorológicas CEAZA (CEAZAMET)
<http://www.ceazamet.cl/>

Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN)
<https://www.sernageomin.cl/>

Sistema de Alerta de Marejadas de la Universidad de Valparaíso (SAM-UV)
<https://marejadas.uv.cl/>

Sociedad Chilena de la Criósfera (SOCHICRI)
<http://www.sochicri.cl/>

World Ocean Network
<https://www.worldoceannetwork.org/>

Centro de Datos Oceanográficos y Meteorológicos (CDOM)
<http://www.cdom.cl>

Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA)
<http://www.ceaza.cl/>

Centro de Estudios Avanzados (UPLA)
<https://www.upla.cl/estudiosavanzados/es/inicio/>

Centro de Estudios Científicos (CECs)
<http://www.cecs.cl/>

Centro de Investigación Dinámica de Ecosistemas Marinos de Altas Latitudes (IDEAL)
<http://www.centroideal.cl>

Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN)
<https://www.cigiden.cl>

Centro de Investigación Oceanográfica (COPAS Sur-Austral)
<http://www.sur-austral.cl>

Centro de Investigación e Innovación para el Cambio Climático (CiiCC)
<http://www.ciicc.cl/>



Centro de Observación Marino para Estudios de Riesgos del Ambiente Costero (COSTAR-UV)

<https://costar.uv.cl/>

Centro Interdisciplinario para la Investigación Acuícola (INCAR)

<http://www.incar.cl/>

Centro para el Estudio de Forzantes Múltiples en Sistemas Socio-Ecológicos Marinos (MUSELS)

<http://www.eula.cl/musels>

Centro de Tecnología Ambientales (CETAM)

<http://cetam.usm.cl/>

Comisión para la Conservación de los Recursos Vivos Marinos Antárticos

<https://www.ccamlr.org/es/organisation/pagina-de-inicio>

Comité Científico de Investigaciones Antárticas

<https://www.scar.org/>

Dirección General de Aguas (DGA). Unidad de Glaciología y Nieves

<https://dga.mop.gob.cl/>

Global Ocean Acidification Observing Network (GOA-ON)

<http://www.goa-on.org/>

Instituto Antártico Chileno

<http://www.inach.cl>

Instituto de Ciencias Naturales Alexander von Humboldt (ICNAvH)

<http://www.uantof.cl/institutos/oceanologicas>

Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB)

<https://ieb-chile.cl/>

Instituto de Fomento Pesquero (IFOP)

<https://www.ifop.cl>

Instituto Milenio de Oceanografía (IMO)

<http://es.imo-chile.cl/>

International Maritime Organization (IMO)

<https://www.imo.org>

International Associated Laboratory «Marine Biogeochemistry and Functional Ecology»

<http://www.liamorfun.cl>



Laboratorio Internacional en Cambio Global (LINCGlobal)
<http://www.lincg.uc-csic.es/>

Laboratorio de Oceanografía Satelital (OCESAT)
<http://oceanografiasatelital.cl/>

NASA Climate Change
<https://climate.nasa.gov/>

Núcleo Milenio Paleoclima
<http://www.iniciativamilenio.cl/paleoclima/>

Núcleo Milenio de Ecología y Manejo Sustentable de Islas
Oceánicas (ESMOI)
<http://www.esmoi.cl/>

Ocean & Climate Platform
<https://ocean-climate.org/>

Organismo Internacional de Energía Atómica (OEIA-ONU)
<https://www.iaea.org>

Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC)
<https://www.ipcc.ch/>

Informe SROCC: Informe especial sobre el océano y la
criósfera en un clima cambiante
<https://www.ipcc.ch/srocc/>

Plataforma Intergubernamental de Biodiversidad y Servicios
Ecosistémicos (IPBES)
<https://www.ipbes.net>

Red de estaciones meteorológicas CEAZA (CEAZAMET)
<http://www.ceazamet.cl/>

Sistema de Alerta de Marejadas de la Universidad de
Valparaíso (SAM-UV)
<https://marejadas.uv.cl/>

Sociedad Chilena de la Criósfera (SOCHICRI)
<http://www.sochicri.cl/>

World Ocean Network
<https://www.worldoceannetwork.org/>

