

LA ANTARTIDA, UN CONTINENTE CONECTADO AL MUNDO

Dr. Jorge Carrasco Cerda
Universidad de Magallanes

La pregunta

Desde la segunda mitad del siglo XX, después del Año Geofísico Internacional en 1957-1958, la Antártida ha recibido a cientos de científicos de todas las disciplinas y países que han escudriñado en busca del conocimiento de su biodiversidad terrestre y acuática, su geografía y geología, de su atmósfera y dinámica de la criósfera, y de tantas otras cada vez más especializadas disciplinas de la ciencia. Luego a partir de la década de los setenta la Antártida comenzó a tener cada vez mayor importancia y relevancia científica debido a los impactos del agujero de ozono y del cambio climático. La Antártida es hoy considerada un territorio internacional dedicada a la ciencia y protegida por el Tratado Antártico y Protocolos medioambientales de las cuales nuestro país ha sido protagonista activo desde sus inicios.

Por su cercanía al territorio sudamericano y en particular a nuestro país, la Península Antártica ha sido la región de mayor interés para Chile, lo que motivó al entonces Presidente Gabriel González Videla a proclamar un sector chileno en la Antártida, materializada en el Decreto Supremo N° 1747 del 6 de noviembre de 1940¹. Esto llevó a que en el verano de 1947 se realizara la primera expedición antártica liderada por el Comodoro Federico Guesalaga Toro, quien inauguró la primera estación meteorológica y radiotelegráfica en el Puerto Soberanía en la Isla Greenwich del sector de la Península Antártica, que actualmente lleva el nombre de Base Arturo Prat y es operada por la Armada de Chile. Al año siguiente, en febrero de 1948 el mismo Presidente González Videla inauguró la Base General Bernardo O'Higgins en la costa noroeste de la península, que es operada por el Ejército de Chile. Más tarde en diciembre de 1969, se estableció la Base Eduardo Frei Montalva en Isla Rey Jorge, operada por la Fuerza Aérea de Chile, y en donde se encuentra el Centro de Comunicaciones Antártica y Centro Meteorológico Antártico con la responsabilidad de la colección de datos meteorológicos de las estaciones localizadas en la península, y de los pronósticos meteorológicos para la región oceánica y de la Península Antártica desde la latitud 55° S al polo. En el mes de febrero de 1980 dos Twin Otter procedentes de Punta Arenas aterrizan en las cercanías de la Base Eduardo Frei, inaugurándose así el aeródromo Teniente Rodolfo Marsh; el que hoy día cuenta con todas las facilidades aeronáuticas para las operaciones aéreas hacia y desde la Isla Rey Jorge, apoyando logísticamente las actividades del país y otras naciones en el continente antártico.

¿Es la Antártida un continente aislado? Para los exploradores antárticos del siglo XIX y gran parte del siglo XX, así parecía serlo. El llamado de Ernest Shackleton en un diario de la

¹ GAV Maximiliano Larraechea Loeser "Exploración Antártica: su valor estratégico y la imprescindibilidad del medio aéreo". Centro de Estudios Estratégicos y Aeroespaciales. <http://www.ceeaa.cl/2016>.

época lo refleja al publicitar un llamado para unirse a su expedición: “Hombres son requeridos: para un viaje peligroso. Bajos salarios. Intenso frío, largos meses de completa oscuridad, peligro constante, regreso seguro dudoso. Honor y reconocimiento en caso de éxito”. Sin embargo, el conocimiento que tenemos hoy nos indica que la Antártida, desde el punto de vista atmosférico y oceánico no está aislada sino que forma parte del sistema climático planetario como veremos, en algunos aspectos, a continuación.

La Antártida es parte del sistema climático global

En promedio, la Tierra gana calor en latitudes ecuatoriales y pierde en las regiones polares. De este modo, la superficie y la atmósfera inmediatamente adyacente (la troposfera) se calienta en la franja ecuatorial y se enfría en las zonas polares, creando un gran gradiente de temperatura entre las zonas ecuatoriales y polares por el exceso y déficit de calor lo cual origina un intercambio meridional. Esto se traduce en que las masas de aire frío se desplacen hacia el ecuador mientras que las masas de aire cálido lo hacen hacia los polos, estando así la atmósfera en un constante movimiento tratando de homogenizar la distribución de calor en el planeta. Las zonas de encuentro de las masas de aires dan origen a los sistemas frontales y éstos a su vez contribuyen a eventuales eventos de precipitación que tienen lugar en diversos lugares del planeta, principalmente en latitudes medias y altas. Algo similar ocurre con la circulación de los océanos como respuesta al gradiente térmico en las aguas.

El calentamiento de las zonas ecuatoriales y el enfriamiento en las latitudes polares genera respectivamente una zona de bajas y altas presiones a nivel superficial. Así, si la Tierra no rotara, la diferencia de presión haría que el intercambio de las masas de aire ocurriera directamente de norte a sur y viceversa. Es decir, se tendría una circulación meridional directa con aire cálido y húmedo ascendiendo en las zonas ecuatoriales, el que se desplazaría en altura hacia los polos donde descendería, y con aire frío y seco que se desplazaría en los niveles bajo de la atmósfera desde las zonas polares hacia el ecuador, constituyendo así una sola celda de circulación meridional por hemisferio (celdas de Hadley; Figura 1). Sin embargo, el efecto de la rotación de la Tierra (llamado *efecto de Coriolis*) modifica este movimiento meridional desviando el desplazamiento de las masas de aire hacia la izquierda en el Hemisferio Sur (a la derecha en el Hemisferio Norte), lo que en superficie da origen a los **vientos de los oeste** en las latitudes medias; de modo que, en vez de tener una sola celda por hemisferio, la circulación de la atmósfera adquiere una estructura compleja de tres celdas por hemisferio (Figura 1). Así, la celda de Hadley se reduce entre el ecuador a las zonas subtropicales de altas presiones, se establece otra celda entre la zona subtropical y la banda de bajas presiones alrededor de la Antártica (celda de Ferrel), y una tercera que va desde la zona de bajas presiones al Polo Sur (celda Polar austral).

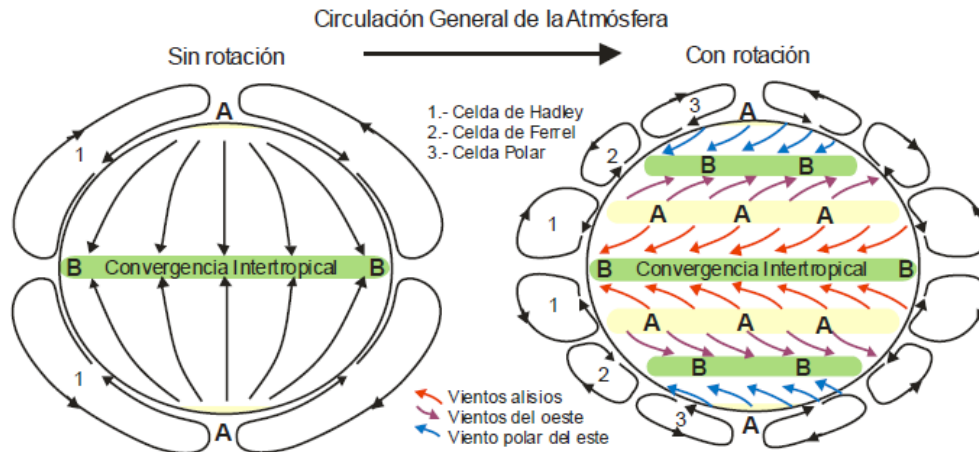


Figura 1. Representación esquemática de la circulación de la atmósfera para una Tierra homogénea sin y con rotación. A: alta presión y B: baja presión.

La circulación atmosférica en la Antártida y sus implicancias

Las características físicas y topográficas junto con la ubicación geográfica de la Antártida, con un domo continental de elevación por sobre los 4.000 m desplazado respecto al eje de rotación de la Tierra (asimetría), hace del continente un obstáculo topográfico relevante para los vientos troposféricos del oeste que circulan a su alrededor, siendo responsable de la generación de los movimientos ondulares de los vientos en la troposfera superior (llamados ondas de Rossby) en las latitudes medias del Hemisferio Sur; y por lo tanto, jugar un papel importante en la formación y/o localización de la difluencia de la corriente en chorro en las cercanías de Nueva Zelanda. De esta manera la sola presencia de la Antártida incide en la circulación de los vientos y en la evolución de los sistemas meteorológicos que afectan día a día a todo el hemisferio, y en particular los que tienen lugar en el sector del Océano Pacífico Sur y que pueden afectar a Chile continental.

La climatología de la Antártida nos señala una zona de bajas presiones conocida como **vaguada circumpolar**, que en promedio se ubica entre los 60° S y 74° S (Figura 2), que rodea el continente y que es resultado de la actividad de ciclones frontales que se desplazan al sureste desde las latitudes medias, y de la actividad de ciclones a mesoescala que se desarrollan alrededor del continente. Los ciclones frontales mayoritariamente se disipan en las latitudes polares del Océano Pacífico, en las cercanías del Mar de Ross y en menor grado en los mares de Amundsen y Bellingshausen; en el sector austral del Océano Atlántico (al este del Mar de Weddell) y del Océano Indico (ver Figura 2).

El gradiente de presión entre las altas presiones subtropicales y las bajas presiones alrededor de la Antártida genera un flujo que por el *efecto de Coriolis* adquiere una dirección hacia el este. Esto es el flujo del oeste que afecta las latitudes medias y que actúa como forzante de la **corriente circumpolar Antártica** (corriente marina fría que circula de oeste a este alrededor del continente).

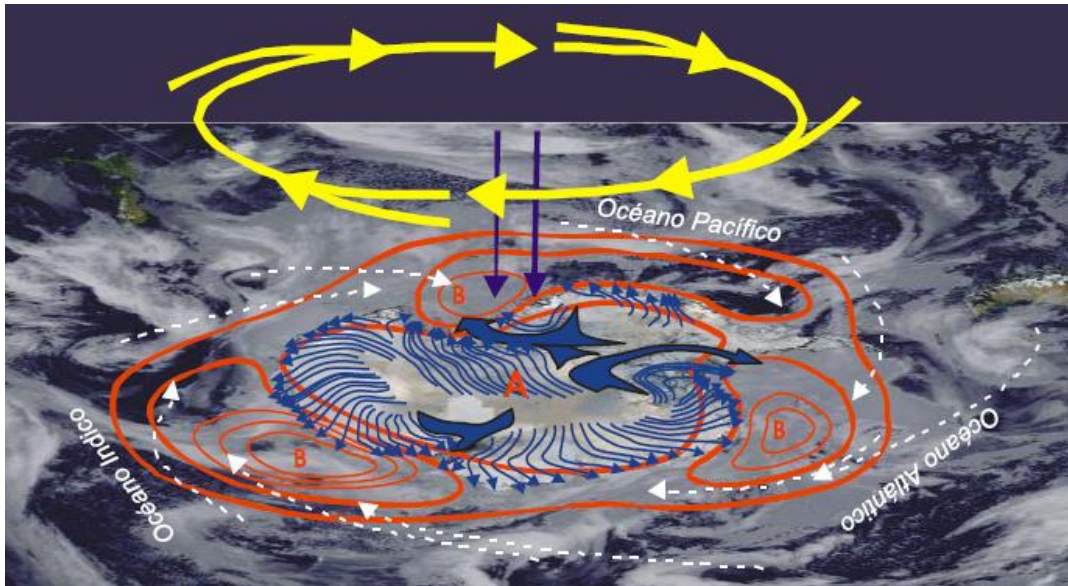


Figura 2. Representación esquemática de la vaguada circumpolar (curvas rojas: isobaras) donde B indica la localización media anual de los centros de baja presión. Probable trayectorias de los sistemas frontales se señalan con curvas punteadas blancas, los vientos catabáticos se representan con las curvas de color azul. Curvas amarillas indican el flujo troposférico del vórtice polar, mientras que las flechas púrpuras representan el descenso de aire (subsistencia) en el interior del continente en donde encontramos el sector de alta presión (A).

Al interior de la Antártida se desarrolla una zona de alta presión y por sobre el continente se ubica el **vórtice polar** que se extiende verticalmente desde troposfera media a la alta atmósfera. La circulación atmosférica que tiene lugar en las latitudes polares se complementa con los **vientos catabáticos** que descienden desde el interior del continente hacia la costa. Estos vientos no son más que masas de aire frío que se desplazan y llegan a interactuar con masas de aire relativamente más cálidos y húmedos de más al norte contribuyendo a generar actividad ciclónica a mesoescala. A su vez, estos vientos pueden empujar las masas de hielo marino hacia el norte permitiendo la formación de **polynias y leads** (áreas de mar despejadas de hielo marino). Cuando esto ocurre, en estas zonas de mar abierto y expuesto a la interacción con la atmósfera, el agua de mar se congela formando nuevo hielo marino y liberando sal que densifica el agua superficial que se hunde, contribuyendo así a la formación de la circulación vertical de las aguas en el océano adyacente al continente antártico (Figura 3). También, los vientos antárticos del este (en parte de origen catabático) son forzantes de la **corriente marina Antártica costera**, que se desplaza hacia el oeste casi paralelo a la línea de costa y que es importante en el intercambio océano-atmósfera que conlleva a la convección profunda y a la producción de las masas de aguas profundas.

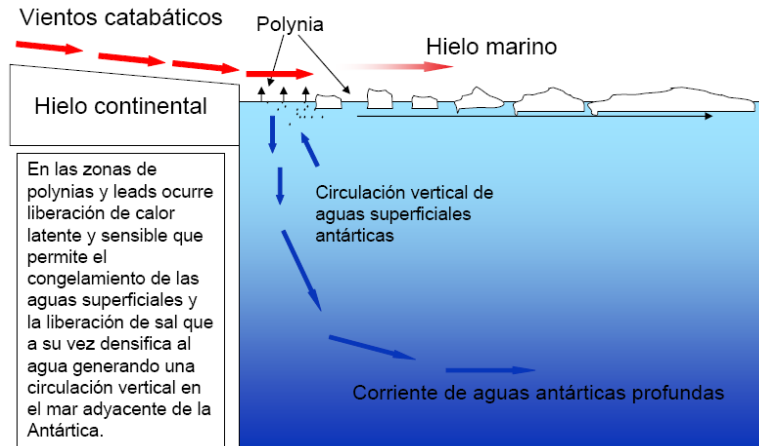


Figura 3. Vientos catabáticos antárticos y su relación con la formación de polynias y la circulación de aguas profundas.

La Antártida, el Ozono y el Cambio Climático

El agujero de ozono

Por otra parte, el vórtice polar es un ciclón permanente de gran escala que se extiende verticalmente por la atmósfera polar a partir de aproximadamente de los 4.000 m de altitud (Figura 2). Es un flujo de viento que gira alrededor de la Antártida que se intensifica (vientos más fuertes) durante el invierno austral y se debilita en verano. La dinámica de los movimientos a gran escala y en altura hace que el vórtice “aísle” temporalmente el aire estratosférico en su interior durante el invierno, conteniendo ozono y compuestos clorofluorocarbonos (CFC). A la llegada de la primavera austral la radiación solar provoca reacciones fotoquímicas al interior del vórtice en la presencia de las nubes estratosféricas que se desarrollan a temperaturas bajo -80°C . Estas nubes convierten los CFC y otros aerosoles en destructores del ozono. Esto provoca una marcada disminución del ozono estratosférico, conocido como **el agujero de ozono**. El tamaño del "agujero de ozono Antártico" está definido por la extensión espacial del vórtice polar. Durante la primavera austral, las concentraciones de ozono estratosférico menores a 220 unidades Dobson (UD) se centran sobre el continente Antártico. El valor constante de 220 UD^2 define el borde externo de la extensión del agujero (Figura 4a). La llegada del verano, debilita el vórtice polar, las masas de aire de las latitudes medias rica en ozono interactúan con aire polar provocando una redistribución del ozono y el término del episodio del agujero. Como resultado del Protocolo de Montreal, la abundancia total de los gases que agotan la capa de ozono en la atmósfera ha comenzado a disminuir en la última década. Se espera que la disminución continúe durante todo el siglo XXI en cumplimiento del Protocolo y con ello el restablecimiento de las concentraciones del ozono estratosférico. La Figura 4b muestra el comportamiento anual de la extensión máxima del tamaño alcanzado por el agujero de ozono en el respectivo año, junto al valor mínimo de la concentración total de la columna de ozono en la Antártica.

² El valor de 220 DU fue elegido ya que los valores de ozono total menores a 220 DU no fueron encontrados en las observaciones históricas en la Antártida antes de 1979 (<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov>).

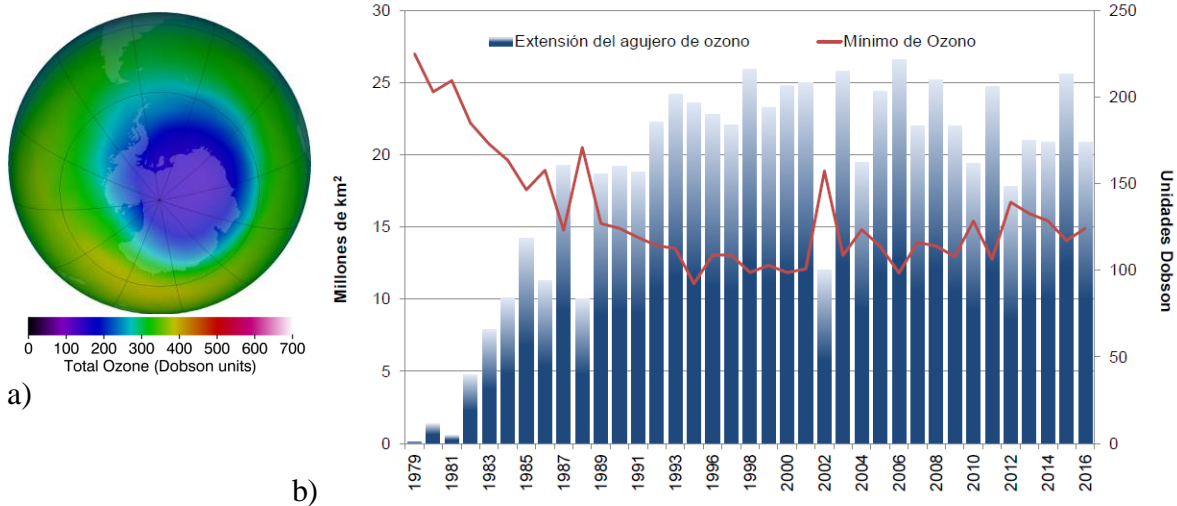


Figura 4. a) Mapa de total de ozono atmosférico en el Hemisferio Sur para el mes de septiembre de 2016. Colores azules y violetas (menores a 220 UD) muestran el tamaño del agujero de ozono. b) Variación anual del tamaño del agujero de ozono Antártico y el mínimo de concentración de la columna total de ozono (<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>).

Cambio climático en la Península Antártica

Si bien la Antártida Oriental no muestra un calentamiento y a pesar de un leve enfriamiento que ha ocurrido en el presente siglo, la Península Antártica es la región del planeta en donde más ha aumentado la temperatura del aire desde la segunda mitad del siglo XX y por ende se considera una región sensible al **cambio climático**. La Figura 5 grafica el comportamiento anual medio de la temperatura mínima y máxima y sus tendencias incluyendo la tendencia del promedio anual para el período entre 1970 y 2015, de los datos recolectados en la Base Eduardo Frei. Para el periodo, la tendencia lineal del promedio anual de la temperatura del aire indica un aumento de 0.17°C , pero un análisis de las tendencias de la temperatura mínima y máxima revelan un calentamiento de 0.81°C y un enfriamiento de -0.46°C , respectivamente. Las curvas de tendencia muestran una disminución de la temperatura máxima a partir de los noventa (curva roja). Por otra parte, se obtiene un aumento de la temperatura mínima hasta comienzos del siglo 21 y luego un breve enfriamiento (curva azul), similar comportamiento muestra la tendencia del promedio (curva negra). Esto revela que, de acuerdo a los resultados de los datos de la Base Frei, la temperatura mínima es la que ha forzado el calentamiento observado en la Península Antártica y que la oscilación diaria (diferencia entre la temperatura mínima y máxima) en promedio ha disminuido a lo largo del periodo. Como consecuencia del aumento de la temperatura en la región peninsular, grandes extensiones de plataformas de hielo se han desintegrado, así como se ha observado un retroceso y disminución de la mayoría de los glaciares de la península. A diferencia de su contraparte, el Ártico, la Antártica como un todo, muestra un aumento del 1,5% por década de la extensión del hielo marino entre 1979 y 2012, aunque existen diferentes tendencias regionales. Por ejemplo, el hielo marino del sector del Mar de Bellingshausen/Amundsen ha disminuido 4,3% por década, mientras que el resto de la Antártica ha aumentado, como ha ocurrido en el sector del Mar de Weddell y

del Mar de Ross donde se ha registrado un aumento del 1,3% y 4,3% por década, respectivamente³.

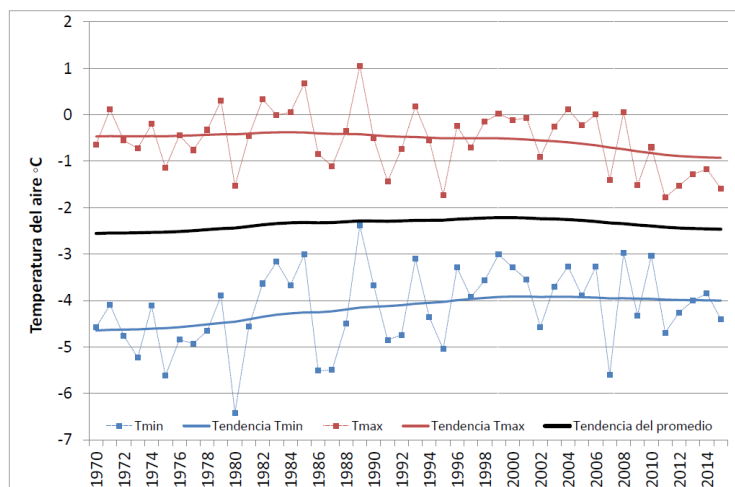


Figura 5. Comportamiento de la temperatura media anual del aire para el período 1970 y 2015, realizado a partir de datos diarios registrados en la Base Eduardo Frei.

Los modelos de simulación climática indican que el aire troposférico continuará calentándose y en particular, este aumento de la temperatura será más marcado en las zonas polares. La Figura 6 muestra los cambios de la temperatura media anual superficial y de precipitación para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 en la Antártida. Los RCPs (Representative Concentration Pathways) son escenarios de concentración de gases de efectos invernaderos (GEI) proyectados a futuro de acuerdo a un supuesto desarrollo socio económico mundial. RCP4.5 a un escenario en donde las emisiones de GEI alcanzan su máxima concentración alrededor del año 2040 y luego declinan. Se puede decir, que es un escenario intermedio si los países finalmente se ponen de acuerdo a reducir las emisiones de GEI, tal como se proponen en las reuniones de la Conferencias de la Partes sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas. En cambio el escenario RCP8.5 representa un desarrollo que conlleva un continuo aumento de emisiones de GEI. Puede verse que en la Antártida la temperatura del aire puede llegar aumentar 2 a 3°C para fines del siglo 21, pero el calentamiento puede alcanzar los 5°C en el peor escenario RCP8.5. La precipitación también muestra un aumento de 10 a 20% en zonas costeras y océanos australes, y aún más (hasta un 30%) en el peor escenario. Al interior del continente, si bien se revelan aumentos mayores, estos no debieran considerarse significativos ya que la precipitación anual es muy menor (menos de 20 mm en equivalente a agua). Con estas predicciones, esperaríamos que la temperatura del aire (y el océano) en la Península Antártica siga calentando y que la precipitación total aumente, pero a la vez, debido al calentamiento, la precipitación al menos en la costa de la Antártida, en parte cambie de sólida a líquida, es decir, más eventos

³ Vaughan, D.G., J. C. Comiso, I. Allison, J. Carrasco, G. Kaser, R. Kwok, P. Mote, T. Murray, F. Paul, J. Ren, E. Rignot, O. Solomina, K. Steffen, and T. Zhang, 2013. Observations: Cryosphere. In book: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter: Fourth, Publisher: Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Editors: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley.

de lluvia y menos eventos de nieve, sobre todo en verano. La Península Antártica se alza de esta manera como una región sensible a los cambios ambientales y a los impactos a los ecosistemas que alberga, ya que se encuentra ubicada en la zona del cinturón de los vientos del oeste; los cuales se asume que su intensificación y desplazamiento hacia el sur responden al aumento de la concentración de los gases de efecto invernadero.

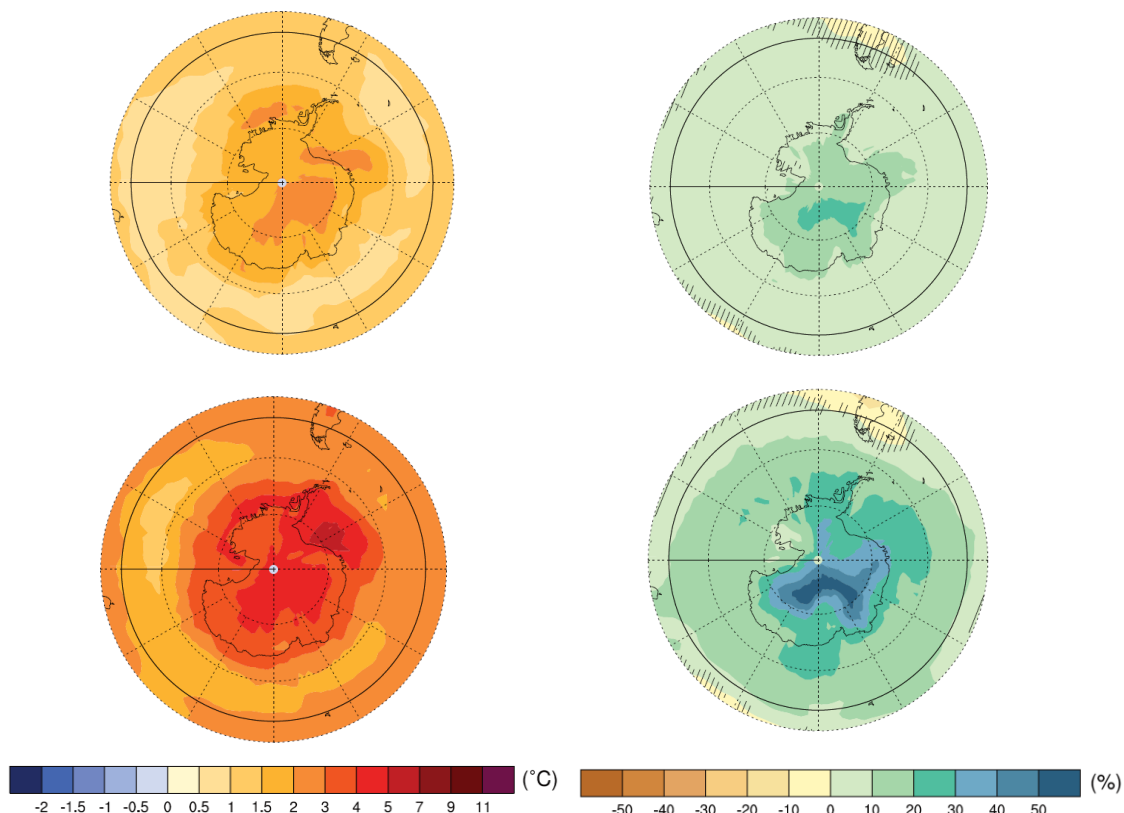


Figura 6. Resultados de la simulación de los cambios de la temperatura media anual del aire y cambios de la precipitación relativos al periodo 1986-2005 para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para fines de siglo 20 (2081-2100). Los mapas corresponden a la mediana del ensamble de los diferentes modelos (CMIP5) usados por el IPCC en el 5to Reporte.

De la exploración a la ciencia

El 14 de diciembre de 1911 el explorador noruego Roald Amundsen junto a su equipo alcanzó por primera vez el Polo Sur, después de 57 días de haber partido desde “Bahía de las Ballenas” en la costa noreste de la Plataforma de Hielo Ross. Más tarde, el 17 de enero de 1912, el británico Robert Scott también arribó al Polo Sur, pero para descubrir que su competidor Amundsen ya había estado allí. A Scott y su equipo les tomó 79 días partiendo desde la misma plataforma pero desde la costa del lado noroeste, cerca de la Isla Ross. El primero volvió para recibir en vida el reconocimiento de su logro, el segundo junto a sus exploradores dejaron sus vidas congeladas para siempre en este lejano continente y son recordados como esforzados valientes de una hazaña frustrada por el destino y las

inclemencias del tiempo que tiene lugar en la Antártida. Han pasado 105 años y este territorio lejano, inhóspito y en muchos aspectos aún prístino, ya no se puede considerar un “*lugar de otro mundo*”. Los primeros exploradores e investigadores antárticos así veían la Antártida, como un continente “aislado” del resto del planeta, con una biodiversidad única no replicada en otras latitudes, condiciones atmosféricas y ambientales propia que no tenían relación e impacto en el resto del planeta. Un territorio lejano y aislado, extremadamente frío e inhóspito en donde llegar y explorar era sentirse aislado humanamente del resto de la civilización. Hoy en día, si bien muchas de estas características se mantienen, la tecnología, las comunicaciones y el transporte moderno permiten a los actuales “exploradores” una conectividad permanente con quienes dejan en casa.

Por otra parte, el avance de la investigación científica antártica nos ha llevado a concluir que este continente está conectado con el resto del planeta a través de las interacciones y tele-conexiones oceánicas y atmosféricas, que hace que alteraciones que ocurren en un lugar del mundo pueden alterar el comportamiento medioambiental de la Antártida y viceversa. Ejemplos de ello son el desarrollo del agujero primaveral del ozono estratosférico que tiene lugar en el Polo Sur como consecuencia de su destrucción por el uso de los compuestos CFC (situación que se asume superada); y los impactos del cambio climático que afecta al planeta como resultados del aumento de la concentración de gases de efectos invernadero. Ambas como resultado de contribuciones antropogénicas que han tenido lugar en otros continentes, principalmente en el Hemisferio Norte, que sin embargo, se han hecho sentir en las latitudes polares del Hemisferio Sur.

La Antártida es considerada un laboratorio natural en donde la actividad científica es el actor protagónico y el continente propiamente tal, se alza con un rol influyente e integrado en el sistema climático del planeta. Allí concurren científicos de todas las nacionalidades con el sólo propósito de escudriñar y cooperar en pos del conocimiento científico que nos permita entender mejor la dinámica de los movimientos atmosféricos, oceánicos y de los hielos y sus interacciones más allá del continente mismo. Así como también conocer y comprender su biodiversidad y su historia geológica. Chile no ha estado ajeno a este esfuerzo científico, y con mayor y menor grado sus científicos han contribuido con sus investigaciones al conocimiento universal de la Antártida y su rol a nivel planetario.

Documento actualizado a partir del artículo “El Clima Antártico: más allá de sus fronteras”, pp. 63-68, en “CHILE ANTARTICO: a través del vuelo de la Fuerza Área”. Origo Ediciones, Santiago – Chile. Agradecimientos a los proyectos N° 1151034 “Reflectivity of Antarctica” y N° 1151034 “Black carbon in the Andes Cryosphere”.