

# **Paralelo 60: Continente Antártico y su interacción basculante con el cambio climático global**

## ***Impacto del cambio climático sobre la Antártida(\*)***

*Dr Gustavo V. Necco Carlomagno*

- **Introducción**
- **Conceptos básicos**
  - . Tiempo y clima
  - . Calentamiento global, cambio climático y cambio medio-ambiental global (GEC)
  - . Efecto invernadero, visión holística, causas del calentamiento y consecuencias reales y potenciales
  - . Combustibles fósiles: consumo y emisiones.
- **Cambio climático en la Antártida**
  - . Criosfera
    - El hielo continental antártico
    - Hielo marino ártico vs antártico
    - Polinias en la Antártida
    - Aceleración del derretimiento de hielo en la Antártida
  - . Agotamiento del ozono antártico
  - . La atmósfera como un todo
  - . Resumen de impactos
- **Reacción de la comunidad científica**

---

(\*) *Texto complementario de las diapositivas de la presentación virtual (webinar) del 25 de junio 2020*



**Instituto Antártico Uruguayo**

## - Introducción

El calentamiento global, y el cambio climático derivado, es un hecho y sus consecuencias cada vez son más notorias a nivel mundial.

La Antártida, el continente helado, no está a salvo de estos efectos y se observan señales preocupantes que muestran la influencia de este calentamiento. En los últimos 50 años, la costa oeste de la Península Antártica ha sido una de las partes del planeta que se calienta más rápidamente. Este calentamiento no solo se limita a la tierra, sino que también se puede observar en el Océano Austral. Las temperaturas del océano superior al oeste de la Península Antártica han aumentado más de 1 ° C desde 1955. Se ha establecido que la Corriente Circumpolar Antártica se está calentando más rápidamente que el océano global en su conjunto.

Otras señales notables son: el volumen total de hielo perdido en la última década estimado en unos 1800 km<sup>3</sup> (equivale al total de agua potable consumida por Uruguay – unos 600 litros diarios per capita - en más de 2000 años!); en la Isla Águila (Eagle), extremo norte de la península Antártica, la nieve y el hielo se han retirado espectacularmente; y, recientemente, el Servicio Meteorológico Nacional de Argentina informó que el extremo norte de la península Antártica batió el 6 de febrero 2020 su récord de calor al alcanzar los 18,3°C.

En esta nota discutiremos los fenómenos meteorológicos y climáticos, su relación con el cambio climático y los impactos reales y potenciales de éste sobre la Antártida.

## - Conceptos básicos

### Tiempo y clima

Tenemos que distinguir claramente entre **tiempo** y **clima**. Esta distinción parece elemental, pero es muy frecuente confundir ambos conceptos.

Cuando hablamos de meteorología, temperie o **tiempo** meteorológico y no cronológico nos referimos al buen o mal tiempo, al sol, las nubes, la lluvia, el calor o frío en un momento y lugar específico.

El **clima** es el tiempo más probable, el que ocurre en promedio en un lugar y periodo del año. El concepto de clima incluye no sólo los valores medios de las variables meteorológicas, sino también sus dispersiones y extremos. Típicamente se promedia en 30 años. El escritor estadounidense Mark Twain lo resumió brillantemente: “*Weather is what you get, climate is what you expect*” (“*El tiempo es lo que tienes, el clima es lo que esperas*”).

Sin embargo es muy común escuchar en los noticieros expresiones sin sentido como “*El pronóstico del clima para mañana*”, “*El partido se desarrolló en un clima muy lluvioso*”. ¡El clima no cambia en 24 horas o es lo que ocurre en un momento!. Lamentablemente hay hasta “profesionales”, o sitios que se suponen profesionales, que siguen indicando “Clima” o “Pronóstico del clima” para los fenómenos de tiempo y su previsión.

## . Calentamiento global, cambio climático y cambio medio-ambiental global (GEC)

El **“calentamiento global”** es el aumento observado en la temperatura promedio de la atmósfera (y los océanos) de la Tierra. Los registros instrumentales de la temperatura de la atmósfera en superficie a nivel global muestran una clara tendencia ascendente que se aceleró a mediados de 1970.

Analizando registros globales de temperatura la NOAA encontró que el período 2010-2019 fue la década más calurosa jamás registrada. Los cinco últimos años (2014 – 2019) fueron los más calurosos de todos los registros y se observan temperaturas globales medias de alrededor de un °C por encima de la media del siglo pasado. Mas aún, de los registros actuales, se estima que 2020 podría también incluirse con los más calurosos de toda la serie.

¿Debemos preocuparnos por un aumento de la temperatura global de 1,0 a 2,0 grados centígrados? Si del invierno al verano pasamos de unos 10-15 grados a 30-35, es decir un aumento de unos 20 grados ¿porqué preocuparse de uno o dos grados?

Son dos situaciones totalmente diferentes. La primera resulta de una variación estacional recurrente en una zona o punto determinado de suma cero. La energía que se gana en una estación del año se pierde en la otra. En la segunda es el calentamiento de gran parte de la masa de la atmósfera. En los 5 primeros kilómetros de la atmósfera se encuentra el 50% de la masa atmosférica. Con un volumen de unos  $1.28 \cdot 10^{10} \text{ km}^3$  da una masa de alrededor de  $1.62 \cdot 10^{16}$  toneladas (16200 billones de toneladas). Calentar en uno o dos grados esta exorbitante masa requiere ingresar al sistema enormes cantidades de energía, que provocan fuertes alteraciones al comportamiento de la atmósfera (y por consiguiente al tiempo meteorológico y al clima) e inclusive afectar fuertemente al medio ambiente global.

Además de los registros térmicos existen otras mediciones que evidencian el aumento del calentamiento, por ejemplo el dramático decrecimiento de la extensión del hielo ártico marino y también de ciertas regiones del antártico. El hielo y la nieve son muy sensibles a los calentamientos.

También son muy notables los aumentos observados en el nivel medio global del mar (casi 20 cm desde finales del siglo XIX). Parte de este aumento se debe a la expansión de los océanos debido al calentamiento de las aguas y la expansión térmica resultante. Otra parte se debe a la contribución del derretimiento de los hielos árticos y antárticos y glaciares.

Un punto clave es que los océanos tienen, por lejos, la mayor capacidad de calor del sistema climático. El nivel del mar es un indicador muy fuerte de que el sistema climático está acumulando energía. La única forma en que esto puede suceder es que entra más energía en el sistema que la que sale, y la razón es porque estamos inyectando  $\text{CO}_2$  y otros gases de efecto invernadero a la atmósfera, lo que reduce el flujo de energía saliente de onda larga (infrarroja).

El **“cambio climático”** es un cambio en el estado de la atmósfera que puede ser identificado (p.e. usando pruebas estadísticas) por cambios en el promedio y/o la variabilidad de sus propiedades, y que persiste por un periodo extenso, típicamente décadas o más.

Para el **IPCC** de la ONU (Intergovernmental Panel for Climate Change – Grupo Intergubernamental para el Cambio Climático) se refiere a cualquier cambio del clima en el tiempo cronológico, sea debido a la variabilidad natural o como resultado de la actividad humana. El IPCC es una organización original, con científicos de alto nivel y representantes de los países participantes, auspiciada por las Naciones Unidas por iniciativa de la Organización Meteorológica

Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Fundada en 1988, su primer informe se publicó en 1990 y el último, Quinto Informe de Evaluación del IPCC - IPCC Fifth Assessment Report AR5, en 2013-2014. El próximo AR6 se publicará en el 2021.

Para el UNFCCC United Nations Framework Convention on Climate Change (Convención Marco de la NNUU para el Cambio Climático) el cambio climático se refiere a un cambio en el clima que se atribuye directa o indirectamente a la actividad humana que altere la composición de la atmósfera global y que se agrega a la variabilidad climática natural observada en periodos de tiempo comparables.

El “cambio global o cambio medio-ambiental global (GEC - Global Environmental Change)” aborda las perturbaciones químicas, biológicas, geológicas y físicas a gran escala de la superficie de la Tierra, la superficie del océano, la superficie terrestre y el ciclo hidrológico, prestando especial atención a escalas de tiempo de décadas a siglos, a perturbaciones causadas por el hombre y sus impactos en la sociedad. Este impacto humano creciente llevó a la definición de antropoceno, término que designa a un intervalo geológico, no reconocido aún de manera oficial o unánime, caracterizado por varios disturbios ecológicos ocasionados por la acción humana, entre los que se destaca la liberación de gases de invernadero (como dióxido de carbono y metano) a la atmósfera, debido a la actividad industrial en rápido crecimiento.

El antropoceno denota un comportamiento reciente distinguido por la alteración transversal y desproporcionada en todos los ecosistemas de la Tierra, particularmente por el uso de energía proveniente de la extracción y utilización de combustibles fósiles. La situación se relaciona con el incremento de la productividad tecno-industrial, así como al crecimiento desbordado de la población junto a la hiper-urbanización, los cambios en el suelo y la cobertura vegetal. Todo esto impacta en el clima, produciendo cambios que se refuerzan e intensifican por los procesos antropogénicos de diversa índole.

La segunda mitad del siglo XX es única en la historia de la existencia humana. Muchas actividades humanas alcanzaron los puntos de despegue en algún momento del siglo XX y se aceleraron bruscamente hacia el final del siglo (llamada *“la gran aceleración”*). Las últimas décadas han visto sin duda la transformación más profunda de la relación humana con el mundo natural en la historia de la humanidad.

Los efectos de los cambios humanos acelerados son ahora claramente discernibles a nivel del sistema Tierra. Muchos indicadores clave del funcionamiento del sistema terrestre muestran respuestas que son, al menos en parte, impulsadas por la cambiante huella humana en el planeta. La huella humana influye en todos los componentes del entorno global: los océanos, las zonas costeras, la atmósfera y el suelo. En este tiempo la humanidad ya es una fuerza geofísica global, comparable a los factores naturales por sus efectos sobre la evolución de la Tierra.

#### - Efecto invernadero, visión holística, causas del calentamiento y consecuencia reales y potenciales

El *calentamiento global* actual se produce básicamente debido a una modificación del balance de calor del planeta y es origen de un problema bastante complejo: el *cambio climático* (aunque más exactamente si seguimos a UNFCCC deberíamos referirnos a la “alteración del clima por efectos antrópicos”). La civilización industrial, con sus enormes demandas energéticas, hace que los seres humanos estemos modificando el clima, al generar con nuestras actividades grandes cantidades de gases que alteran el balance de calor (llamados *“de efecto invernadero”* o GEI).

Los procesos que producen el clima global involucran interacciones de la atmósfera, los océanos, el agua en todos sus estados, la litosfera y la biosfera y no es posible aquí tratar el problema en toda su complejidad. Aunque podemos ver rápidamente la esencia del proceso que genera el clima como resultado de un balance o equilibrio global de energía, a largo plazo.

El calor procedente del sol llega a la superficie terrestre en forma de radiación entrante de onda corta, visible, que es posteriormente reflejada hacia el exterior como radiación de onda larga, infrarroja. Pero la presencia de ciertos gases en la atmósfera, como el vapor de agua, el dióxido de carbono o el metano, hace que se reduzca la radiación saliente de onda larga y el calor quede retenido en la atmósfera provocando el llamado "*efecto invernadero*".

Este es un efecto natural que actúa como una "frazada" haciendo que la atmósfera del planeta alcance una temperatura media confortable (alrededor de 15 grados centígrados). Desde mediados del siglo XIX el incremento por la actividad humana de la concentración en la atmósfera de gases de efecto invernadero (GEI), como el dióxido de carbono o el metano, está provocando un aumento de este efecto y a esta contribución antropogénica se le atribuye un rol en el calentamiento observado en las últimas décadas.

Algunos escépticos han argumentado que esta influencia no existe ya que el componente mayor en los GEI es el vapor de agua, que no es influenciado por el hombre, y que, además, el dióxido de carbono – el más importante - es neutro, inodoro, incoloro, insípido, ayuda a crecer las plantas, no es un veneno y es prácticamente despreciable en la composición del aire (alrededor del 0.04 por ciento). Pero no es en las bajas concentraciones de los gases "traza" donde tenemos que poner nuestra atención, sino sobre cómo influyen en el balance global de calor. El sol entrega, por medio de su radiación de onda corta, unos 342 watts por metro cuadrado, en promedio, de los que se reflejan al espacio unos 107 watts por metro cuadrado y, por consiguiente, se pierden como calor (radiación infrarroja - onda larga) unos 235 watts por metro cuadrado.

Los GEI, a pesar de su muy baja concentración, son muy eficientes en alterar ("forzar") el balance de radiación de onda larga. ¿En cuánto? Se estima que actualmente alcanzan a forzar el balance en un nivel de 2 a 2.8 watts por metro cuadrado. Esto es casi un uno por ciento del monto del flujo energético en onda larga: un monto nada despreciable y que explica la importancia que el mundo científico da a los GEI y en particular al CO<sub>2</sub>. El dióxido de carbono es un gas que, una vez introducido en la atmósfera, permanece por mucho tiempo (es de "vida larga") y sus efectos se mantienen y acumulan.

Las investigaciones se han centrado en las causas del calentamiento observado desde mediados de la década del 70, período en el que la actividad humana ha tenido un crecimiento más rápido y se han podido realizar mediciones satelitales sobre toda la atmósfera. Como herramienta básica utilizan modelos físico-matemáticos de la atmósfera y sus movimientos.

¿Qué es un modelo? El fluido atmosférico se pone en movimiento gracias a la rotación terrestre, y a los efectos del calentamiento diferencial. En estos últimos influye la variación latitudinal en la energía solar entrante y la energía infrarroja emitida por la tierra, provocando un calentamiento en las zonas tropicales y un enfriamiento en las polares. También actúan en los cambios térmicos la absorción por las moléculas atmosféricas y la condensación del vapor de agua en forma de nubes (liberando calor), o su recíproca, la evaporación (que consume energía, enfriando). Desde hace poco más de dos siglos se conocen las leyes fundamentales de la mecánica de fluidos, y la termodinámica así como las leyes de la radiación y de los cambios de estado del agua.

A partir de estas leyes podemos escribir las ecuaciones matemáticas que gobiernan la evolución del tiempo que permiten, a partir de un estado inicial conocido, determinar las tendencias que, a su vez, nos permiten inferir los estados futuros. Lamentablemente estas ecuaciones son enormemente complejas y no pueden resolverse en forma exacta y hay que contentarse con soluciones numéricas aproximadas (algebraicas), calculadas gracias a los potentes computadores electrónicos de hoy en día. Podemos decir que, en la actualidad los sistemas mas avanzados de previsión numérica del tiempo dan resultados útiles hasta alrededor de una semana. Las previsiones de uno a dos-tres días son muy buenas o buenas; más allá se degradan poco a poco, hasta perder todo interés.

La previsión del tiempo por métodos deterministas tiene un claro límite. Sin embargo estos modelos numéricos se usan también para estimaciones climáticas. Hay previsiones que van más allá de ese limite digamos semanal, desencadenando severas críticas del tipo : “si no pueden prever más que unos días , errando tres veces al mes ¿como se atreven a previsiones o tendencias mensuales, estacionales, o más aún, a cambios climáticos! ¡es una desfachatez!”.

¿Hay esperanzas de ir más allá de los límites deterministas? Si, no sólo con la ayuda de la estadística, sino también del estudio del comportamiento a largo plazo del sistema Tierra (en particular de las interacciones entre sus componentes: atmósfera, tierra, océanos, hielos, biósfera). Mal que le pese a los impulsores del “new age” y el post-modernismo las leyes físicas se siguen cumpliendo (aunque a veces, es cierto, no se comprendan bien las causas).

A partir de los diez días la atmósfera tiene un comportamiento macroscópicamente previsible: las estaciones de año y las zonas climáticas testimonian de fenómenos reguladores de su circulación general. Un ejemplo típico es el fenómeno de El Niño, que pone en juego interacciones con la circulación oceánica, mucho más lenta a evolucionar que la atmósfera. Los regímenes de tiempo ligados al Niño tienen fuertes potenciales predictivos estacionales. También la temperatura del mar evoluciona lentamente y los modelos que acoplan la atmósfera con el océano podrían dar prospectivas estadísticamente útiles hasta uno o dos años. También hay otros fenómenos de evolución lenta que influyen en los regímenes de tiempo, como la humedad del suelo, la extensión de los campos de nieve o las circulaciones estratosféricas.

Si el tiempo es imprevisible mas allá de dos semanas, el Niño no más de uno a dos años ¿como pretender estimar el clima a cien años? No hay aquí ni antinomias ni paradojas. Hemos visto al principio que el clima se origina en las estadísticas el tiempo. Un modelo imita la naturaleza, fabrica sus propias perturbaciones que nacen, crecen y mueren siguiendo las leyes de la física; hace llover aquí y allí, filtra la radiación solar e infrarroja, induce cambios de temperatura en la atmósfera y el suelo. A largo plazo podemos calcular su propia climatología y, si esta coincide con la observada, podemos usarlo como herramienta para estudiar el impacto climático, por ejemplo del aumento de los gases de efecto invernadero, o de la deforestación o de la contaminación.

El IPCC ya en su cuarto informe (AR4, 2007), citando simulaciones numéricas, había considerado los efectos de cinco forzantes: los *gases de efecto invernadero*, la *radiación solar*, el *ozono*, la *cenizas volcánicas* y los *aerosoles*. Las simulaciones muestran que si se eliminan los GEI no se reproduce el aumento de temperatura observado a partir de mediados de los años 70, confirmando que los GEI son el principal forzante del calentamiento global observado.

Algunas consecuencias reales y potenciales del aumento de los gases de efecto invernadero que atrapan el calor y provocan el cambio climático son:

- **Cambio de poblaciones y hábitats de vida silvestre, así como extinción de animales.**
- **Pérdida de tierras habitables a baja altitud debido al aumento del nivel del mar.**
- **Menos agua potable debido a la fusión de los glaciares que almacenan aproximadamente las tres cuartas partes del agua dulce del mundo.**
- **Océanos más ácidos que amenazan la vida marina, los ecosistemas y la cadena alimentaria.**
- **Mayor frecuencia de sequías severas, que provocan incendios forestales, pérdida de cultivos y escasez de agua.**
- **Interrupción en el suministro de alimentos tanto de los cultivos como de la producción de carne debido al aumento de las temperaturas.**
- **Amenazas económicas como mayores precios mundiales de los alimentos, inflación, pobreza y otras.**
- **Especies dañinas que prosperan, como mosquitos, garrapatas, medusas y plagas de cultivos.**
- **Enfermedades diseminadas como la malaria, transmitida por mosquitos, y el virus del zika.**
- **Bosques moribundos por insectos que matan árboles, incendios, calor y estrés por sequía.**
- **Aumento de precipitaciones provocando inundaciones, o frío extremo en algunas regiones por nevadas más intensas.**
- **Los huracanes se vuelven más fuertes, más intensos y frecuentes.**
- **Mayor frecuencia de feroces olas de calor que pueden conducir a la pérdida de vidas.**

#### . Combustibles fósiles: consumo y emisiones.

En el año 2018 las mayores emisiones de dióxido de carbono en el mundo se registraron en China: 10065 Mt, EEUU: 5416 Mt, India: 2654 Mt, Rusia: 1711 Mt y Japón: 1161 Mt, con un total mundial de unos 33000 Mt . El Uruguay emite anualmente unas 7 megatoneladas de CO<sub>2</sub> (aunque captura por uso de la tierra y silvicultura casi el doble).

El consumo de combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas) aumentó desde 1970 a un ritmo medio de alrededor de 1.5 (1000 TWh/año) por década, pero en la década 1970-80 el ritmo de consumo de petróleo aumentó unos 4 (1000 TWh/año) y en la década 2000-2010 el carbón a unos 5 (1000 TWh/año). En esos períodos aparecieron los mayores ritmos de crecimiento global de temperatura. ¿Casualidad o causalidad?

Los resultados antes citados demuestran que todas las reuniones y acuerdos internacionales que se han realizado desde hace décadas para reducir estas emisiones (p.e. ya se efectuaron 25 Conferencias de las Partes, dentro de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático) son prácticamente letra muerta.

Antes de la pandemia de COVID19 las emisiones de dióxido de carbono crecían a una tasa de 1% por década (aunque en la década 2005-2015 esta tasa fue superior) y en el 2019 se mantuvieron estables en unas 100 MtCO<sub>2</sub>/día. Las políticas gubernamentales durante la pandemia alteraron drásticamente los patrones de demanda energética en el mundo. Muchas fronteras se cerraron y la gente fue confinada por lo que se redujo el transporte y cambiaron los hábitos de consumo. Las emisiones diarias de dióxido de carbono se redujeron en alrededor del 17% a principios de abril 2020 en comparación con los niveles medios de 2019. La mitad de estos cambios son debidos al transporte en superficie. En su pico las emisiones en los países individuales decrecieron un 26% en promedio. Se observa actualmente una leve recuperación, y las acciones de gobierno y los incentivos económicos post-crisis seguramente influenciarán las emisiones globales por décadas.

## - Cambio climático en la Antártida

La Antártida es el lugar más seco, más frío y más ventoso de la Tierra. Es también el almacén de los registros climáticos de hielo más antiguos del mundo, conservado en la helada Antártida durante millones de años.

La Antártida es considerablemente más fría que la región del Ártico. La temperatura más baja registrada en la Tierra es de -89.6 grados Celsius y se obtuvo en el Polo Sur. Ahí, la temperatura promedio es de -49 grados Celsius y los hielos nunca se derriten. En el Polo Norte, en cambio, la temperatura promedio en invierno es de -34 grados Celsius, pero sube significativamente en verano.

La Península Antártica Occidental es una de las áreas de calentamiento más rápidas en la Tierra (sólo algunas áreas del Círculo Polar Ártico experimentan cambios térmicos más rápidos). El mayor aumento de temperatura se observa en las partes oeste y norte de la Península Antártica, donde el aumento es de 0.53 ° C por década entre 1951 y 2006. En el oeste de la Península, el aumento es mayor en la temporada de invierno: 1.03 ° C por década en 1951-2006. En las partes orientales de la Península Antártica, las temperaturas han aumentado más en verano y otoño, aumentando 0.41 ° C por década entre 1946 y 2006.

La ciencia es clara: el cambio climático ya está afectando negativamente a la Antártida, incluyendo una mayor pérdida de hielo y nieve.

En lo que sigue presentaremos una rápida y breve discusión sobre las distintas consecuencias de este calentamiento basada en resultados recientes.

### . La criosfera:

Comprende la nieve, el hielo marino y continental, los casquetes polares, el permafrost (suelo congelado), y el hielo en ríos y lagos. Contribuye al albedo terrestre (porcentaje de radiación solar reflejada), influencia la circulación oceánica termohalina a través de cambios en el contenido de sal y es un reservorio de agua que puede influenciar el nivel del mar significativamente.

Como hemos visto, la criosfera es una parte integral del sistema climático global, con importantes vínculos y reacciones generadas a través de su influencia en los flujos de energía de superficie y la humedad, las nubes, la precipitación, la hidrología y la circulación atmosférica y oceánica.

### . *El hielo continental antártico*

La capa de hielo antártico (ice sheet) es la masa de hielo más grande en la Tierra. Cubre un área de casi 14 millones de km<sup>2</sup> y contiene 30 millones de km<sup>3</sup> de hielo. Alrededor del 60% del agua dulce del mundo se encuentra en esta capa de hielo, lo que equivale a un aumento de unos 70 m en el nivel global del mar. En la Antártida oriental, la capa de hielo descansa sobre una gran masa terrestre, pero en la Antártida occidental, el lecho está, en algunos lugares, a más de 2.500 metros bajo el nivel del mar.

La región de acumulación está en el interior del continente y las de ablación en zonas periféricas. El hielo continental antártico tiene un espesor de hasta 3000 m, pero se adelgaza hacia los márgenes del continente. Este hielo se desplaza varias centenas de metros por año y las corrientes rápidas se concentran en los márgenes, pero pueden originarse en el interior.

#### *. Hielo marino ártico vs antártico*

El Ártico es un océano, cubierto por una fina capa de hielo marino perenne y rodeado de continentes ("perenne" se refiere al hielo marino más antiguo y más grueso). La Antártida, por otro lado, es un continente, cubierto por una capa de hielo muy gruesa y rodeado por un borde de hielo marino y el Océano Austral.

Los hielos marinos antárticos desaparecen en el verano. Los cambios estacionales de cobertura de hielo marino son más importantes en el ártico.

El hielo marino austral en mayo tiene una superficie promedio (1981–2020) de 10.16 millones de km<sup>2</sup> con una tendencia (1979–2020) de +0.09 millones de km<sup>2</sup> /década (0.89%).

La cubierta de hielo marino antártico, a diferencia con la del Ártico, ha permanecido estable, e incluso, se ha incrementado por décadas: sus puntos máximos fueron en el 2008-09, 2014-15. Pero a partir de marzo de 2017, la fusión del hielo en el mar de la Antártida alcanzó un récord histórico sorprendiendo al mundo científico. Se cree que este hecho pueda ser una poco frecuente anomalía. La cobertura del hielo marino antártico continúa con un pequeño repunte que ha experimentado desde su declive precipitado de 2015 a 2017, aunque está lejos de recuperarse a su expansión récord de 2014-15.

#### *. Polinias en la Antártida*

Una *polinia* (del ruso polynye - По́льня) es un espacio abierto de agua rodeado de hielo marino. Se forman fundamentalmente de dos maneras: Polinia de calor sensible – p.e. por la surgencia en una región de agua caliente, lo que reduce la producción de hielo y que puede incluso detenerla por completo y Polinia de calor latente – p.e. por la acción del viento catabático o las corrientes oceánicas, que actúan para llevar el hielo fuera de la frontera fija de hielo permanente.

Las polinias de calor sensible puede aparecer lejos de la costa y permanecer allí durante semanas o meses, donde actúan como un oasis para que los pingüinos, las ballenas y las focas emerjan y respiren.

El interés por estos fenómenos, que se consideraban raros, se despertó en científicos (y medios de comunicación) cuando aparecieron agujeros en el hielo del mar de Weddell en 2016 y 2017, de unos 30 a 50 mil km<sup>2</sup>. Estas polinias fueron creadas por los fuertes vientos asociados con las tormentas y unas condiciones cálidas del océano sin precedentes. El agua más caliente y más salada del fondo, de cerca de un grado Celsius, sube a la superficie donde el aire la enfría y la hace más densa por lo que vuelve a descender. Cuando lo hace, es reemplazada por aguas más profundas y calientes en un mecanismo que se repite impidiendo la formación del hielo. Por otra parte, allí una montaña submarina llamada Elevación de Maud hace además que el agua se desplace en torno a ella y crea un vórtice sobre esa montaña que facilita la mezcla del agua. Las observaciones muestran que el océano bajo esos agujeros se enfrió 0,2 grados. El calor liberado en ese proceso podría afectar otros patrones climáticos e incluso los vientos a nivel global.

En las aguas profundas de la Antártica se encuentran los restos de organismos marinos muertos, que liberan carbono cuando se descomponen. Esta reserva de carbono permanece en las profundidades, pero si sube y entra a la atmósfera a través de las polinias podría contribuir al calentamiento global al ser ventilada en superficie.

#### . *Aceleración del derretimiento del hielo en la Antártida*

Las capas de hielo en los casquetes polares están siendo afectadas. La Academia de Ciencias de los EEUU utilizó datos actualizados de inventario de drenaje, espesor de hielo y velocidad de hielo para calcular la descarga de hielo de 176 cuencas que drenan la capa de hielo antártica de 1979 a 2017. Comparando los resultados con un modelo de balance de masa superficial dedujeron el balance de masa de la capa de hielo. La pérdida de masa total aumentó de  $40 \pm 9$  Gt/año en 1979–1990 a  $50 \pm 14$  Gt / año en 1989–2000,  $166 \pm 18$  Gt / año en 1999–2009 y  $252 \pm 26$  Gt / año en 2009–2017: es decir *aumentó en un factor seis*. En el periodo 2009–2017 la pérdida de masa estuvo dominada por los sectores del mar de Amundsen / Bellingshausen en la Antártida occidental ( $159 \pm 8$  Gt / año), de la Wilkes Land en la Antártida oriental ( $51 \pm 13$  Gt / año), y la península oeste y noreste ( $42 \pm 5$  Gt / año).

La contribución al aumento del nivel del mar desde la Antártida promedió  $3.6 \pm 0.5$  mm por década con un acumulado de  $14.0 \pm 2.0$  mm desde 1979, incluyendo  $6.9 \pm 0.6$  mm desde la Antártida Occidental,  $4.4 \pm 0.9$  mm desde la Antártida Oriental y  $2.5 \pm 0.4$  mm desde el Península (es decir, la Antártida Oriental es un participante importante en la pérdida de masa). Durante todo el período, la pérdida de masa se concentró en las áreas más cercanas a aguas cálidas, saladas, subsuperficiales, aguas profundas circumpolares (CDW), es decir, consistente con vientos polares más fuertes que empujan las CDW hacia la Antártida para derretir sus plataformas de hielo flotantes, desestabilizar los glaciares y elevar el nivel del mar.

Por otro lado, combinando datos de 11 satélites, casi un centenar de científicos del equipo IMBIE - Ice sheet Mass Balance Inter-comparison (NASA/ESA) - han obtenido la imagen más actualizada del estado de los casquetes polares comparando y reconciliando las mediciones obtenidas por distintas técnicas en ambos extremos del planeta.

Sus resultados muestran que el casquete antártico perdió  $2.720 \pm 1.390$  millones de toneladas de hielo entre 1992 y 2017, lo que corresponde a un aumento del nivel medio del mar de  $7,6 \pm 3,9$  milímetros (los errores son una desviación estándar). Durante este período, el derretimiento impulsado por el océano ha provocado que las tasas de pérdida de hielo de la Antártida Occidental aumenten de  $53 \pm 29$  mil millones a  $159 \pm 26$  mil millones de toneladas por año. El colapso de la plataforma de hielo ha aumentado la tasa de pérdida de hielo de la Península Antártica de  $7 \pm 13$  mil millones a  $33 \pm 16$  mil millones de toneladas por año. Encontraron grandes variaciones dentro y entre las estimaciones del modelo de balance de masa superficial y ajuste isostático glacial para la Antártida Oriental, siendo su tasa promedio de ganancia de masa durante el período 1992–2017 ( $5 \pm 46$  mil millones de toneladas por año) la menos segura.

Estos cambios en la masa de las capas de hielo de Groenlandia y la Antártida son de considerable importancia social ya que impactan directamente en los niveles del mar global: desde 1901, las pérdidas de hielo de la Antártida y Groenlandia, junto con el derretimiento de pequeños glaciares y casquetes de hielo y la expansión térmica de los océanos, han provocado un aumento del nivel global del mar a una tasa promedio de  $1.7$  mm / año. Entre 1992 y 2010, la tasa de cambio, medida por la altimetría satelital y los indicadores de marea, llegó a  $3.2$  mm / año. Esto se traduce en un aumento total de  $0.19$  m en el nivel medio del mar desde el comienzo del siglo XX (IPCC AR5).

## . Agotamiento del ozono antártico

El ozono estratosférico es un escudo natural de la Tierra, que protege la vida de la peligrosa radiación solar ultravioleta. Los productos químicos introducidos por el hombre en nuestra atmósfera, como los clorofluorocarbonos (CFC) utilizados durante muchos años como refrigerantes y en latas de aerosol, han afectado fuertemente la capa de ozono de la Tierra (en particular en la Antártida). Gracias al Protocolo de Montreal (1987) desde mediados de los 90 los niveles mundiales de ozono se han vuelto relativamente estables.

En general, la ocurrencia anual del agujero de ozono se debe a una notable combinación de procesos dinámicos y químicos que ocurren en la estratosfera inferior antártica entre el invierno y la primavera austral. Fue muy afortunado para la sociedad que la primera gran advertencia que tuvo el mundo sobre el agotamiento global del ozono por las emisiones antropogénicas se produjo en esta región específica de la atmósfera, en lugar de una escala global.

Veamos los procesos atmosféricos en la ozonósfera que, de alguna manera, la aíslan de las circulaciones en latitudes medias. Al igual que con el hemisferio norte y el Ártico, también hay un vórtice polar en el hemisferio sur. Este vórtice polar también se extiende a través de la estratosfera y hacia la mesosfera. En contraste con el vórtice boreal, el vórtice austral es más fuerte, más grande y más duradero. Además, las temperaturas son más frías y los niveles de ozono son más bajos que sus contrapartes boreales.

La diferencia entre los vórtices polares austral y boreal es causada por los efectos de las ondas planetarias troposféricas. Las ondas planetarias de gran amplitud que causan calentamiento son bastante frecuentes en el hemisferio norte por la presencia de cadenas montañosas. El hemisferio sur no tiene grandes cadenas montañosas (los Andes son altos, pero de longitud muy estrecha) y es principalmente un hemisferio cubierto de agua. Por lo tanto, el forzamiento del hemisferio sur por ondas a escala planetaria en la troposfera es muy débil y hay una relativa ausencia de ondas para calentar la región polar y erosionar el vórtice polar. Esto conduce a un vórtice polar austral muy simétrico, fuerte y persistente. Sólo hacia el final de la temporada invernal austral comienzan a formarse ondas planetarias troposféricas que se propagan hacia la estratosfera, erosionan el vórtice, desaceleran la corriente en chorro, calientan la región polar y aumentan los niveles de ozono.

El vórtice austral persiste hasta noviembre o diciembre. Además, las temperaturas en el vórtice permanecen bastante frías (por debajo de 195 K) hasta principios de octubre formándose nubes estratosféricas polares (“madreperla” o “nacaradas”). Las reacciones químicas en las superficies de las partículas de hielo que forman estas nubes convierten los compuestos de cloro de formas inertes en especies altamente reactivas. A medida que el sol sale sobre la Antártida, en agosto y septiembre, la radiación visible proporciona la energía para impulsar las reacciones catalíticas de cloro y bromo que destruyen rápidamente el ozono. Esta rápida destrucción del ozono produce *el agujero de ozono antártico*. Hay científicos que consideran que el agujero de ozono ha retrasado el impacto de los aumentos de gases de efecto invernadero en el clima del continente.

Las primeras mediciones remotas de ozono por instrumentos embarcados en satélites comenzaron en los años 60 con los satélites Echo y SAMOS. El conjunto más extenso de observaciones de la columna total de ozono provino del Nimbus 4, entre 1970 y 1977. Hay varias agencias espaciales que operan actualmente satélites con mediciones remotas de ozono. Lo que al principio se originó como una curiosidad científica ahora es una necesidad por razones de monitoreo ambiental. Ya a principios de la década de 1980, a través de una combinación de mediciones satelitales y terrestres, los científicos comenzaron a darse cuenta de que el escudo solar

natural de la Tierra se estaba reduciendo drásticamente sobre el Polo Sur en cada primavera.

Si bien las mediciones de ozono en la estratosfera están más relacionadas con los aspectos climáticos, o sea efectos a largo plazo, el ozono en la troposfera tiene diferentes implicaciones para la salud humana (cuando se inhala, el ozono es dañino para el sistema respiratorio), pero su medición remota está fuera del alcance de la tecnología actual.

Los modelos numéricos que ahora se utilizan para simular el agujero de ozono antártico son muy elaborados y pueden capturar la interacción acoplada de la química atmosférica y los fenómenos meteorológicos. Por ejemplo los resultados de simulaciones con el Modelo Químico-Climático del Sistema de Observación de la Tierra Goddard NASA (GEOS-CCM) sugieren que el ozono antártico debería volver a sus niveles anteriores a 1980 en la década del 2070.

### .La atmósfera como un todo

La atmósfera inferior y media afectan las ondas atmosféricas de la atmósfera superior que se propagan hacia arriba. Estas ondas pueden romperse, transfiriendo energía e impulso a la atmósfera circundante, lo que impulsa las circulaciones globales a gran escala y provoca mezcla.

Existe evidencia de que, como resultado del cambio climático provocado por el hombre en la atmósfera baja y media, tanto los procesos de generación de ondas como las condiciones de propagación han cambiado en las últimas 4-5 décadas, y se esperan más cambios en el futuro.

Esto ya ha causado cambios en los patrones de circulación a gran escala en la troposfera y la estratosfera, y es probable que también afecte el clima de la atmósfera superior. Esto se aplica también a las interacciones de la atmósfera antrópica con la de las latitudes medias.

### .Resumen de impactos

- Ascenso del nivel medio del mar por fusión del hielo.
- La Corriente Circumpolar Antártica se está calentando más rápidamente que el océano global en su conjunto.
- El derretimiento de las capas perennes de nieve y hielo ha resultado en una mayor colonización por las plantas.
- Las especies antárticas se ven afectadas dramáticamente. *(El krill a menudo se alimenta de algas debajo del hielo marino y las poblaciones han disminuido alrededor de la Península Antártica Occidental a medida que el hielo marino ha disminuido. Las poblaciones de pingüinos Adelia han estado disminuyendo en los últimos años debido a las reducciones en las poblaciones de krill y las condiciones climáticas cambiantes en sus áreas de anidación tradicionales. Los pingüinos emperador también son muy vulnerables y se prevé que sufrirán si la temperatura promedio del mundo aumenta).*

## - Reacción de la comunidad científica

La comunidad antártica internacional se reunió para identificar las preguntas científicas de mayor prioridad que los investigadores deberían aspirar a responder en el futuro próximo. En abril de 2014, el Comité Científico de Investigación Antártica (SCAR) convocó a 75 científicos y responsables políticos de 22 países para acordar estas prioridades estableciendo una hoja de ruta para la ciencia antártica y del océano austral para las próximas dos décadas y más allá.

Esta fue la primera vez que la comunidad antártica internacional formuló una visión colectiva, a través de discusiones, debates y votaciones. Las preguntas se agruparon en siete temas: i) Atmósfera Antártica y Conexiones Globales (*atmósfera*); ii) El Océano Antártico y el hielo marino en un mundo que se calienta (*hidrósfera y criósfera*); iii) Capa de Hielo Antártico y Nivel del Mar (*hidrósfera y criósfera*); iv) la Tierra dinámica (*litósfera*) ; v) La vida en el abismo (*biósfera*) ; vi) El espacio cercano a la Tierra y más allá y vii) Presencia humana en la Antártida (*antropósfera*).

El IAU basa sus proyectos y actividades científicas en esta hoja de ruta (ver su sitio web [iau.gub.uy/?lang=es](http://iau.gub.uy/?lang=es))

### **Fuentes**

. *Climate threat: what has changed, what could change*; Gustavo V. Necco, UNICAMP 5 October 2004, Campinas, Brazil.

<https://slideplayer.com/slide/6431252/>

. *El calentamiento global – resultados recientes*; Gustavo V. Necco Carlomagno, Revista ESTRATEGIA, Tercera Época Año 1 N° 1, CALEN, 2009, pp. 21-28.

[https://issuu.com/calen\\_uy/docs/revista\\_estrategia\\_1\\_2009\\_pdf](https://issuu.com/calen_uy/docs/revista_estrategia_1_2009_pdf)

. *La Argentina y el cambio climático - De la física a la política*; Vicente Barros e Inés Camilloni; EUDEBA, 2016.

. *Cambio Climático: Imperdible entrevista del Dr. Aiello al Dr. Necco Carlomagno*; AGROLINK, 14 de julio 2019

<https://agrolinkweb.com.ar/cambio-climatico-imperdible-entrevista-del-dr-aiello-al-dr-necco-carlomagno/>

. *NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Report for May 2020*, online June 2020

<https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/202005/supplemental/page-1>.

. *Consumo mundial de energía*, Wikipedia

[https://es.wikipedia.org/wiki/Consumo\\_y\\_recursos\\_energ%C3%A9ticos\\_a\\_nivel\\_mundial](https://es.wikipedia.org/wiki/Consumo_y_recursos_energ%C3%A9ticos_a_nivel_mundial)

. *Climate Change in Antarctica*, Norsk Polarinstittutt (Instituto Polar Noruego)

<https://www.npolar.no/en/themes/climate-change-in-antarctica/>

. *Temporary reduction in daily global CO2 emissions during the COVID-19 forced confinement*, Nature Climate Change, 19 mayo 2020

<https://doi.org/10.1038/s41558-020-0797-x>

- . *La Antártida registra una temperatura récord de 18,3°C*, Noticias ONU, 7 febrero 2020  
<https://news.un.org/es/story/2020/02/1469302>
- . *The Antarctic Peninsula's retreating ice shelves*, BAS, 1 enero 2012  
<https://www.bas.ac.uk/data/our-data/publication/the-antarctic-peninsulas-retreating-ice-shelves/>
- . *A Satellite Lets Scientists See Antarctica's Melting Like Never Before*, NYT 30 abril 2020  
<https://www.nytimes.com/interactive/2020/04/30/climate/antarctica-ice-climate-change.html>
- . *Quick Facts on Ice Shelves*, NSIDC National Snow and Ice Data Center  
<https://nsidc.org/cryosphere/quickfacts/iceshelves.html>
- . *Two Decades of Temperature Change in Antarctica*, NASA 2007  
<https://web.archive.org/web/20080920041805/http://earthobservatory.nasa.gov/Newsroom/NewImages/>
- . *La Antártida en peligro: el nuevo estudio que revela cómo y por qué se derrite el continente blanco*, 17 octubre 2019  
<https://www.infobae.com/sociedad/2019/10/17/la-antartida-en-peligro-el-nuevo-estudio-que-revela-como-y-por-que-se-derrite-el-continente-blanco/>
- . *El sistema climático: Criosfera*, FCIEN, UdelaR, 2017  
[http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/El\\_Sistema\\_Climatico/2017/Clase92017.pdf](http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/El_Sistema_Climatico/2017/Clase92017.pdf)
- . *Polynyas in the Southern Ocean*, SCIENTIFIC AMERICAN Junio 1988  
[https://www.ldeo.columbia.edu/~agordon/publications/Gordon\\_Polynya\\_SciAmer\\_june1988.pdf](https://www.ldeo.columbia.edu/~agordon/publications/Gordon_Polynya_SciAmer_june1988.pdf)
- . *Deciphering the Maud Rise Polynya*, NASA Earth Observatory, diciembre 2017.  
<https://earthobservatory.nasa.gov/images/145069/deciphering-the-maud-rise-polynya>
- . *Derretimiento de la Antártica: por qué preocupa a los científicos el deshielo del Thwaites, el glaciar del "Día del Juicio Final"*, BBC News 29 enero 2020  
<https://www.observador.com.uy/nota/derretimiento-de-la-antartica-por-que-preocupa-a-los-cientificos-el-deshielo-del-thwaites-el-glaciar-del-dia-del-juicio-final--20201298337>
- . *El deshielo de los polos aumenta a un ritmo vertiginoso*, Ambientum, marzo 2020  
<https://www.ambientum.com/ambientum/cambio-climatico/el-deshielo-de-los-polos-aumenta-a-un-ritmo-vertiginoso.asp>
- . *Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017*, PNAS January 22, 2019 116 (4) 1095-1103  
<https://www.pnas.org/content/116/4/1095>
- . *Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017*, The IMBIE team, Nature 558, 219–222(2018)  
<https://www.nature.com/articles/s41586-018-0179-y>
- . *Global Atmosphere – The Antarctic Ozone Hole*, Martyn P. Chipperfield en *Still Only One Earth: Progress in the 40 Years Since the First UN Conference on the Environment*, 2015, pp. 1-33  
<https://pubs.rsc.org/en/content/chapterhtml/2015/bk9781782620761-00001?isbn=978-1-78262-076-1>

. *The Antarctic Ozone Hole Will Recover*, NASA's Goddard Space Flight Center  
<https://svs.gsfc.nasa.gov/30602>

. *Whole Atmosphere Climate Change*, Proyecto BAS  
<https://www.bas.ac.uk/project/whole-atmosphere-climate-change>

. *A roadmap for Antarctic and Southern Ocean science for the next two decades and beyond*, M.C. KENNICUTT II et al.  
Antarctic Science 27(1), 3–18 (2015)

### **Videos You Tube sobre Antártida**

. *Climate change in the Antarctic* | DW Documentary 2020  
<https://youtu.be/iLGgILUqbcc>

. *In Depth: Melting Antarctica*, Rajya Sabha TV 2020  
<https://youtu.be/7rsKWXzRGXI>

- *Antarctica is losing ice at an accelerating rate. How much will sea levels rise?*, PBS News 2019  
<https://youtu.be/YRe1ymYR45k>

. *Scientists document glaciers melting in Antarctica*, CBS 2017  
[https://youtu.be/ezSxB\\_gKDMA](https://youtu.be/ezSxB_gKDMA)

. *Impact of massive iceberg that broke off Antarctica*, CBS 2017  
[https://youtu.be/\\_Ci3hwpyM8](https://youtu.be/_Ci3hwpyM8)

. *A mysterious 'hole' has reappeared in the middle of Antarctica*, Tech Insider 2017  
<https://youtu.be/A4GB0pkGKAQ>

- *The Antarctica Challenge: A Global Warning (FULL MOVIE)*, Free Documentary, 2015  
<https://youtu.be/9Im2O6d zpUE>

## **Perfil del autor**

*Licenciado en Meteorología en la Universidad de Buenos Aires (1968) y DSc en la Universidad de París VI, Francia (1972).*

*Docente en la carrera Licenciatura en Meteorología, FCEyN -UBA (de Ayudante Ad-honorem a Profesor Titular) (1968- 1984); pasante en el proyecto francés EOLE, Laboratoire de Météorologie Dynamique, ENS/CNRS, París (1970-72 ); docente en el Doctorado en Geofísica, Universidad Nacional de La Plata, Argentina (1973); miembro de la carrera del Investigador Científico en el CONICET (Concejo Nacional para la Investigación Científica y Técnica) argentino (1974-83); Jefe del Instituto de Investigaciones Sinópticas, SMN argentino (1976-85); autor texto “Curso de cinemática y dinámica de la atmósfera”, EUDEBA (1980); científico visitante en la División de Desarrollos del NMC (National Meteorological Center), Washington DC, EEUU (1981-82); miembro del Grupo de Expertos sobre Satélites Meteorológicos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), Ginebra, Suiza (1983-85); Profesor Titular, en dinámica de los océanos, en el Instituto Tecnológico de Buenos Aires – ITBA (1984-85); Director del Programa de enseñanza y formación profesional de la OMM (1985-2002); Director del Instituto Inter-Americano para la Investigación del Cambio Global (IAI), con sede en Brasil (2002-2004); miembro del Grupo de Expertos sobre Enseñanza y Formación Profesional de la OMM, representando la Región III (América del Sur) (2003-2011).*

*En diciembre 2004 se jubila y traslada a Montevideo, donde reside en forma permanente. Profesor de Meteorología, ESANA, Laguna del Sauce (2006-2007). Desde el 2007 hasta la fecha es docente honorario por el IMFIA/FING en la Licenciatura en Ciencias de la Atmósfera, Universidad de la República.*