

INFORME FINAL - TEMPORADA DEL AGUJERO DE OZONO ANTÁRTICO 2025

***Gerardo Carbajal Benítez¹, Héctor A. Ochoa^{2,3}, Eduardo Luccini^{4,5},
Facundo Orte⁶, Elián Wolfram^{1,6} y Héctor Estévez Pérez⁷.***

1. *Servicio Meteorológico Nacional, Argentina.*
2. *Dirección Nacional del Antártico / Instituto Antártico Argentino.*
3. *Universidad Tecnológica Nacional FRBA. Argentina.*
4. *CONICET - Centro de Excelencia en Productos y Procesos de Córdoba, Argentina.*
5. *Facultad de Química e Ingeniería del Rosario, Pontificia Universidad Católica Argentina.*
6. *CEILAP, UNIDEF (CITEDEF-CONICET), Argentina.*
7. *Instituto de Geofísica, UNAM, México.*

Febrero, 2026

Información sobre Copyright

Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.

La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.

INDICE	
RESUMEN	4
ANTECEDENTES	6
1. Introducción.	7
2. CONDICIONES METEOROLOGICAS PREVALECIENTES	8
2.1 Temperaturas.	8
2.2 Área y volumen las NEP	10
2.3 Estabilidad del vórtice.	13
3. OBSERVACIONES DE OZONO	17
3.1 Observaciones Satelitales.	17
3.2 Estaciones en superficie.	18
3.2.1 Estación VAG USHUAIA.	19
3.2.2 Estación Antártica San Martin	21
3.2.3 Estación Antártica Belgrano II	23
4. EL AGUJERO DE OZONO	26
4.1 El área del agujero de ozono.	26
5. CONCLUSIONES	29
6. AGRADECIMIENTOS	30
7. BIBLIOGRAFÍA	30

RESUMEN.

El presente informe analiza la formación, evolución y cierre del agujero de ozono antártico durante 2025, integrando información meteorológica estratosférica, observaciones satelitales y mediciones in situ en estaciones de superficie Argentinas y Antárticas. Durante el invierno y la primavera austral de 2025 se registraron múltiples calentamientos súbitos estratosféricos (SSW) aunque de significancia menor, caracterizados por incrementos abruptos de temperatura y sin inversión completa del viento zonal.

Estos eventos provocaron:

- ✓ Un aumento de la temperatura estratosférica, especialmente a 10 y 50 hPa, siendo la primera durante el mes de agosto.
- ✓ Perturbaciones en vórtice polar Antártico, con episodios de desplazamiento hacia el continente Antártico.
- ✓ Reducción en la estabilidad y extensión del vórtice, limitando las condiciones favorables para la destrucción química del ozono.

Las NEP Tipo I y Tipo II, fundamentales para la activación del cloro y la destrucción de ozono, mostraron:

- Valores máximos de área y volumen cercanos o ligeramente superiores a la media histórica antes de los SSW.
- Una disminución temprana a partir de mediados de agosto, especialmente en las NEP Tipo II, debido al SSW.
- Finalización anticipada del ciclo de NEP (Tipo II a fines de septiembre y Tipo I a fines de octubre).
- Los datos satelitales (NASA, TEMIS, Copernicus) evidenciaron una destrucción de ozono moderada y altamente influenciada por los SSW.

Las observaciones en superficie (Ushuaia, San Martín y Belgrano II) confirmaron:

- 5 veces paso el agujero de ozono sobre la Estación GAW-Ushuaia (sub-Antártica).
- Valores de ozono total frecuentemente cercanos o superiores a sus medias históricas posteriores a los SSW.
- Recuperación temprana del ozono a finales de noviembre.

Finalmente:

- Los ozonsondeos mostraron perfiles consistentes con el debilitamiento del vórtice y el aumento de temperatura estratosférica, inhibiendo la formación sostenida de NEP.
- El área máxima absoluta del área del agujero de ozono en 2025 fue de aproximadamente 22,9 millones de km², ubicándose en el ranking 23° de 46 años de registros (1979–2025).
- El área media (7 de septiembre al 13 de octubre) durante el período de máximo desarrollo fue de ~19,6 millones de km², el más pequeño de los últimos 6 años.
- El agujero de ozono cerró de forma relativamente temprana, durante la primera quincena de noviembre, favorecido por la actividad dinámica estratosférica.

Palabras Claves: Ozono, Estratosfera, Calentamiento Súbito Estratosférico, Antártida, Destrucción Química y Dinámica

ABSTRACT.

This report analyzes the formation, evolution, and closure of the Antarctic ozone hole in 2025, using stratospheric meteorological data, satellite observations, and in-situ measurements from Argentine and Antarctic surface stations. During the austral winter and spring of 2025, multiple sudden stratospheric warming (SSW) events were recorded, although their significance was minor.

These events were marked by abrupt temperature increases without complete zonal wind reversals. The effects of these events included:

- ✓ An increase in stratospheric temperatures, especially at 10 and 50 hPa, with the most notable temperature rise occurring in August.
- ✓ Disturbances in the Antarctic polar vortex, which were characterized by episodes of displacement toward the Antarctic continent.
- ✓ A reduction in the stability and extent of the vortex, limiting conditions favorable for ozone destruction.

Type I and Type II ozone-depleting particles (ODPs), which are essential for chlorine activation and ozone depletion, exhibited the following:

- Maximum area and volume values close to or slightly above historical averages prior to the SSW events.
- An early decline starting in mid-August, particularly in Type II ODPs, due to the SSW events.
- An early termination of the ODP cycle, with Type II ODPs ending in late September and Type I ODPs concluding by late October. Satellite data from NASA, TEMIS, and Copernicus indicated moderate ozone depletion significantly influenced by the SSW events.

Surface observations from Ushuaia, San Martín, and Belgrano II confirmed:

- The ozone hole passed over the GAW-Ushuaia Station (sub-Antarctic) five times.
- Total ozone values frequently approached or exceeded their historical averages after the SSW events.
- An early recovery of ozone levels was noted by the end of November. Ozone soundings revealed profiles consistent with a weakening vortex and an increase in stratospheric temperature, which inhibited sustained formation of neutral electromagnetic potential (NEP).

Finally:

- The absolute maximum area of the ozone hole in 2025 was approximately 22.9 million km², ranking 23rd out of 46 years of records (1979–2025).
- The average area during the period of maximum development (September 7 to October 13) was about 19.6 million km², the smallest recorded in the last six years.
- The ozone hole closed relatively early, during the first half of November, aided by dynamic stratospheric activity.

Key Words: Ozone, Stratosphere, Stratospheric Sudden Warming, Antarctica, Destruction, Chemistry and Dynamic.

ANTECEDENTES.

El descubrimiento de un agujero de la capa de ozono durante la primavera en la Antártida a mediados de la década de 1980, reveló la amenaza que representan las sustancias que agotan la capa de ozono producidas por el hombre. El daño causado por estos compuestos expone a las personas y los ecosistemas de la Tierra a la dañina radiación ultravioleta. Dentro de los 10 artículos más relevantes de la revista **nature**, se encuentra “El Descubrimiento del Agujero de Ozono en la Antártida” que cambió la perspectiva de las ciencias de la atmósfera y arrojó una de las políticas ambientales más exitosas de la historia, a nivel mundial, como lo es **el Protocolo de Montreal**. En 1985 Joe Farman, Brian Gardiner y Jonathan Shanklin reportan con 20 años de datos de ozono total de las Estaciones Antárticas Haley y Faraday, que los niveles de ozono comenzaron a descender (Agujero de Ozono) en los meses de primavera austral hacia fines de la década de 1970. Ellos sugieren y atribuyen a que esa disminución de ozono se debe a compuestos de origen antropogénico llamados Clorofluorocarbonos (CFC's) los cuales provienen del uso de aerosoles y accesorios para refrigerar, así como la fabricación de espumas y para limpieza de componentes electrónicos. En 1974 sugieren que el monóxido de cloro (ClO) se produce a partir de los CFC's y por lo tanto son destructores de ozono. A principios de la década de 1980, las mejores proyecciones de los modelos estratosféricos indicaron que, si la producción continúa de CFC's en grandes cantidades, pone en riesgo la destrucción de entre el 2% y el 4% de la capa de ozono para fines del siglo XX. Pero aún no se sugiere que el ozono en latitudes polares fuera especialmente sensible.

En 1974, Molina y Rowland publican los resultados de sus investigaciones en un artículo dentro de la revista **Nature**. En él advertían de la creciente amenaza que el uso de los gases CFCs representan para la capa de ozono, aviso que en aquel momento fue criticado y considerado excesivo por un sector de investigadores. Sin embargo, la tenacidad y el convencimiento que depositaron en sus propias teorías conquistaron las mentes más incrédulas. Tras arduas deliberaciones, Molina y Rowland consiguieron la aprobación a sus tesis en encuentros científicos internacionales y estuvieron presentes en las reuniones en las que se fijaron los parámetros de control que debían hacer cada país en la emisión de CFCs. El 4 de diciembre de 1995, Molina, Rowland y Crutzen fueron premiados con el **NOBEL** además por el Programa de la ONU para el Medioambiente (UNEP), por su contribución a la protección de la capa de ozono.

El agujero de ozono planteaba situaciones como el incremento de cáncer de piel, cataratas en los ojos, etc., además de algunos otros daños en la ecología y en materiales, debido al aumento de la radiación ultravioleta. Por lo tanto, los encargados de la formulación de políticas internacionales concluyeron que se necesitaba una estrategia cautelosa de protección del ozono. En marzo de 1985, se firmó la **Convención de Viena de las Naciones Unidas para la Protección de la Capa de Ozono**. Donde se pidió más investigación sobre la capa de ozono, pero no contenía objetivos legalmente vinculantes para la reducción de CFCs. El informe de Farman y sus colegas sobre la pérdida de un tercio de la capa de ozono en primavera sobre la Antártida se publicó unos meses después. La respuesta de los formuladores de políticas fue inicialmente bien recibida. Sin embargo, argumentaron que los principios de precaución eran parte de la convención y firmaron **el Protocolo de Montreal de 1987** sobre sustancias que agotan la capa de ozono. Este fue un acuerdo para detener el crecimiento de la producción y el consumo de sustancias que agotan la capa de ozono a las tasas vigentes en ese momento, y cumplir con el tiempo para considerar si disminuir la producción. Posteriormente se ratificó notablemente rápida en 1989 y a enmiendas posteriores (comenzando con **la Enmienda de Londres en 1990**) que incluyeron restricciones cada vez más estrictas sobre la producción y el consumo mundial de sustancias

que agotan la capa de ozono. El Protocolo de Montreal condujo a la eliminación mundial de la producción y el consumo de CFCs para 2010, y ahora el agujero de ozono antártico se está recuperando paulatinamente. Por tanto, el protocolo evitó que la capa de ozono colapsara y es una historia de éxito emblemática para la política medioambiental mundial. Debido a que los CFCs tienen una vida útil atmosférica de 50 años o más, la atmósfera no se recuperará por completo hasta después de 2050, incluso en ausencia de más emisiones (Solomon, 2017).

1. INTRODUCCIÓN

Un efecto relacionado e inesperado, se reveló a principios de la década de 2000, cuando los estudios mostraron que el agujero de ozono antártico ha afectado la circulación atmosférica en la superficie en el hemisferio sur, siendo notable el corrimiento de la corriente en chorro hacia el interior de la Antártida. Sin embargo, las observaciones y el modelado computacional confirman que la corriente en chorro troposférica es sensible a los cambios en los vientos estratosféricos y que el enfriamiento de la estratosfera polar está asociado con un desplazamiento hacia los polos de la corriente en chorro troposférica.

Para el final del siglo XX, se tiene la certeza de que, durante el verano, la corriente en chorro en la troposfera se ha desplazado 2° de latitud hacia la Antártida. Esto genera alteraciones en el transporte de calor y humedad en la atmósfera, produciendo un calentamiento en la Península Antártica, La Patagonia y Nueva Zelanda, además poca humedad (sequía) en el oeste de Tasmania y Nueva Zelanda. También, afecta la temperatura y salinidad del Océano Austral. Después de varias simulaciones por modelos, que incluyen efectos antropogénicos como aerosoles, gases de efecto invernadero, cambios de ozono en distintas capas de la atmósfera y Sustancias Destructoras de Ozono (ODS) y factores naturales como erupciones volcánicas y ciclos solares. En primer lugar, los resultados muestran que, al menos durante los últimos 20 años, la recuperación del ozono ejerció una fuerza sobre la circulación troposférica como para superar el efecto opuesto de los aumentos de gases de efecto invernadero.

Esta es una contribución crucial al debate de larga data sobre el papel relativo de estos dos factores en las tendencias de circulación pasadas y futuras. A medida que los niveles de ozono continúen recuperándose, su tasa de cambio y la influencia asociada sobre el clima se debilitarán, aumentando el papel relativo de los aumentos de los gases de efecto invernadero, especialmente en escenarios de 'solo negocios, como hasta ahora' en los que no se hace nada para mitigar las consecuencias de los gases de efecto invernadero para el futuro. Por lo tanto, tales aumentos de emisiones podrían dominar los cambios futuros de la circulación troposférica y empujar la corriente en chorro hacia el polo. En segundo lugar, los hallazgos se suman a la evidencia de que los cambios estratosféricos pueden afectar el clima en la troposfera. Esto es importante porque, a pesar de décadas de investigación, el mecanismo exacto de estratosfera-troposfera es poco entendido. Por último, los resultados proporcionan una señal clara de que las acciones humanas pueden afectar el clima de la Tierra: el Protocolo de Montreal ha detenido el cambio climático asociado con el agotamiento del ozono. Esta es una lección práctica sobre cómo debe reaccionar la comunidad internacional a los desafíos ambientales globales. Restringir las emisiones peligrosas y cambiar las prácticas comerciales es también la forma de combatir el calentamiento global causado por los gases de efecto invernadero (Karpechko, 2020).

El objetivo del presente Informe Final del Agujero de Ozono en la Antártida 2025, es monitorear la formación, evolución y finalización de la destrucción de ozono durante la primavera austral, a través de la evaluación de la Temperatura Estratosférica a nivel de 50 hPa y en latitudes polares, de 60° a 90° a 50 y 70 hPa, el análisis del área y volumen de las Nubes Estratosféricas Polares (NEP), así como la estabilidad del vórtice. Se incluye el análisis de observaciones satelitales y de superficie, la física del vórtice y el tamaño del Agujero de ozono.

2. CONDICIONES METEOROLÓGICAS PREVALECIENTES.

2.1. Temperaturas.

Ocasionalmente, durante el invierno del Hemisferio sur, la circulación atmosférica global se muestra perturbada, acompañada por una marcada amplificación de las ondas planetarias (Matsuno, 1971) tal como sucedió este año 2025. Simultáneamente, la temperatura estratosférica polar aumenta considerablemente en unas pocas decenas de grados Kelvin/Centígrados en unos pocos días (Andrews et al., 1987). Estos eventos de incremento de temperatura se les llaman Calentamiento Súbito Estratosférico (SSW).

Las dos categorías de los SSW son los eventos de calentamientos mayores y menores, donde la inversión del gradiente de temperatura media zonal se dirige hacia los polos de 60°. Además, la inversión del viento zonal medio a una latitud de 60° y un nivel de presión de 10 hPa es una característica del SSW mayor (Labitzke et al., 2005). Adicionalmente, en función de la estructura del vórtice polar, el SSW puede clasificarse como eventos de tipo “vórtice-desplazamiento” o “vórtice-división” (Charlton y Polvani, 2007). En base a lo anterior, este año el vórtice ha sido clasificado como vórtice-desplazamiento.

Haciendo un análisis de la temperatura mínima en la estratosfera (50hPa) del Hemisferio Sur (HS), sobre todo en su anomalía dentro de la **figura 1** encontramos que, durante los meses de enero hasta mediados de agosto, se observa un decremento de la temperatura, donde este enfriamiento tiene valores históricos -4°C menos que su media). Posteriormente, poco a poco se incrementa hasta mediados de octubre, donde baja, pero enseguida se observa un incremento que casi alcanza los 7°C por arriba de su media. Durante el mes de noviembre se observa un enfriamiento por debajo de los -7°C , seguido de un incremento de hasta 6°C , equivalente a un incremento en unos pocos días de aproximadamente 13°C . Finalmente en diciembre una nueva caída de temperatura de aproximadamente -5°C , pero ya sin algún efecto sobre el agujero de ozono, que para esas fechas ya se cerró.

En la **figura 2** se muestra la temperatura zonal a dos niveles de altura, la estratosfera baja **(a)** 50hPa y la alta **(b)** 10hPa. En **(a)** es muy consistente con las temperaturas mínimas, con la mayor parte del año la estratosfera esta fría, hasta inicios del mes de septiembre, donde se observa un incremento de la temperatura de hasta 5°C . Pero en la tercera semana de septiembre un incremento notable en la estratosfera que alcanza casi los 10°C y se mantiene la estratosfera caliente, hasta mediados de octubre, donde hay una caída de la temperatura, para que en noviembre, nuevo incremento de temperatura, pero ahora solo de 2.5°C .

En (b) se observa mejor el comportamiento de la temperatura respecto a los calentamientos súbitos estratosféricos (SSW) debido a que son más notorios a esta altura y claramente en

El primer SSW se observa a inicios del mes de julio y se sostiene hasta agosto, en pleno invierno austral. Se observan dos picos máximos en el aumento de la temperatura, el primero es de $\sim 15^{\circ}\text{C}$ (1 de julio) y un segundo con un incremento de $\sim 17^{\circ}\text{C}$ (05 de agosto). Esto repercute en la formación de las NEP inhibiendo y retardando el inicio de la formación del agujero de ozono. El segundo SSW tiene lugar a mediados de agosto e inicios de septiembre, con un incremento máximo de temperatura $\sim 6,5^{\circ}\text{C}$. El tercer SSW tiene un incremento máximo de temperatura de $\sim 7^{\circ}\text{C}$, durante la segunda semana de septiembre, en ambos casos repercutiendo, sobre todo en las NEP Tipo II donde se observa una pequeña caída. Finalmente, el cuarto SSW tiene lugar a inicios de octubre con un incremento de temperatura de aproximadamente 8°C mostrando un caída casi en su totalidad las NEP Tipo II.

Estos eventos pueden estar en la categoría de calentamientos menores, debido a que el viento medio zonal, si bien es claro que disminuye, no alcanza a invertirse. Es decir, no cumple con el requisito para ser considerados calentamientos mayores.

Fuente de datos: https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/temp_2024_MERRA2_SH.html

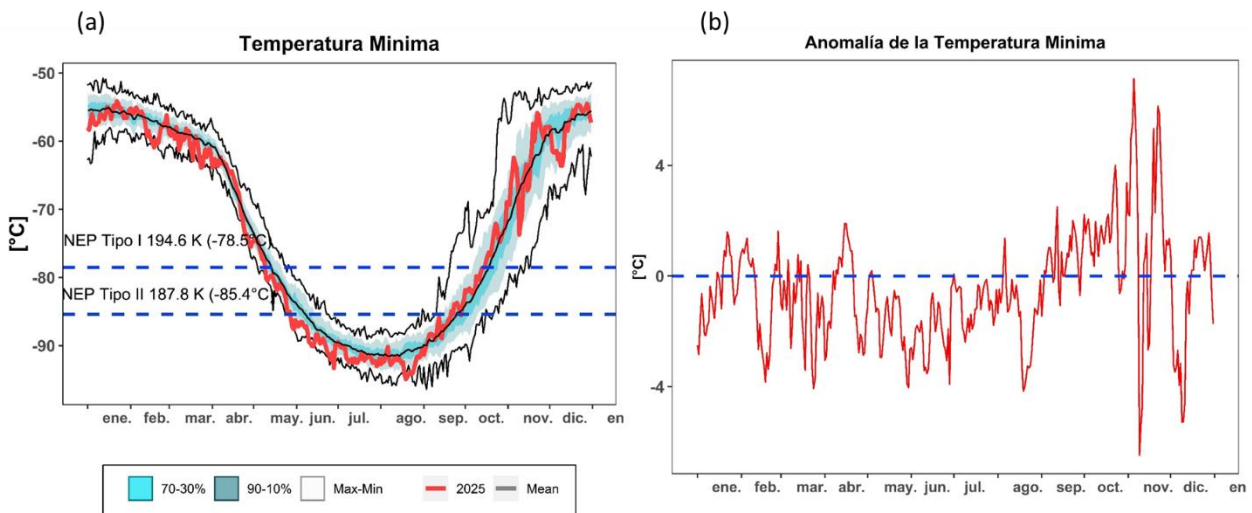


Figura 1. a): Temperatura mínima promedio a 50 hPa de altura y a una latitud entre 50° a 90° en el HS. La línea roja representa la evolución de la temperatura a lo largo del 2025, la línea gris es la temperatura promedio, los colores sombreados son los percentiles de 70 a 30% y 90 a 10%, mientras que las líneas externas negras, son las temperaturas máximas y mínimas, para el periodo 1979 al 2024. **b):** Anomalía de dicha Temperatura a lo largo del año 2025 (Color rojo).

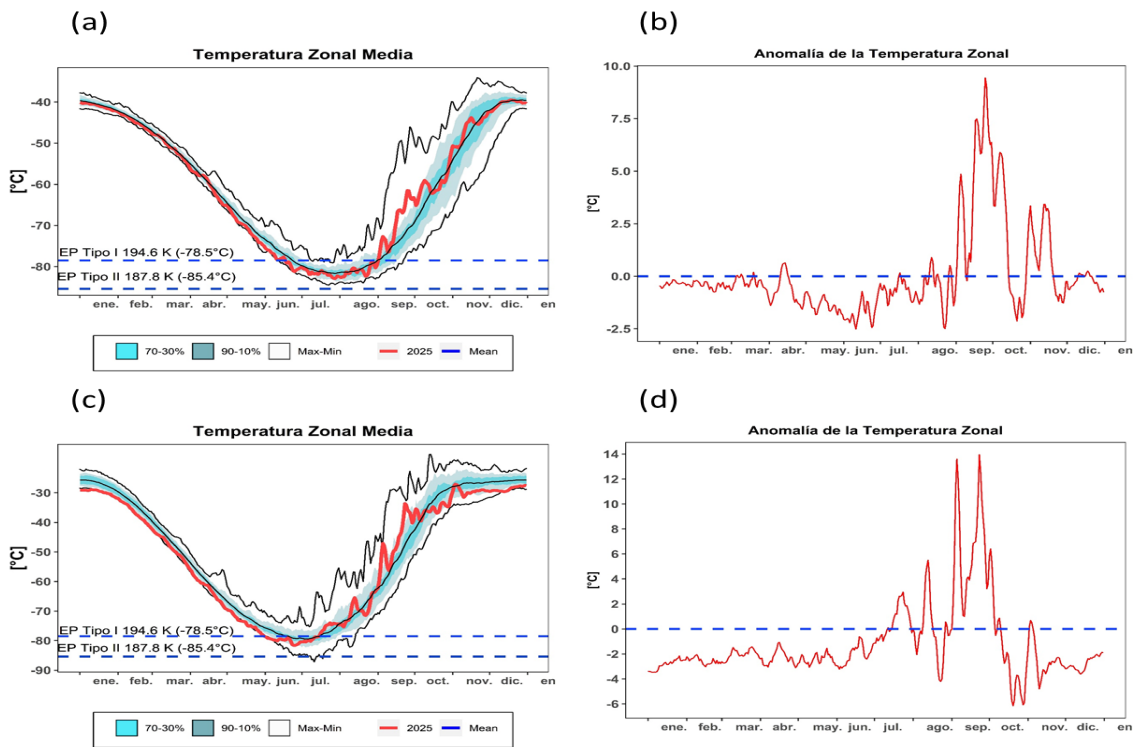


Figura 2. a): Temperatura zonal media a 50 hPa de altura y a una latitud entre 60° a 90° en el HS. **b):** Anomalia de dicha Temperatura zonal media. **c):** Temperatura zonal media a 10 hPa de altura y a una latitud entre 60° a 90° en el HS. **d):** Anomalia de dicha Temperatura zonal media. **a) y c)** La línea roja representa la evolución de la temperatura a lo largo del 2025, la línea gris es la temperatura promedio, los colores sombreados son los percentiles de 70 a 30% y 90 a 10%, mientras que las líneas externas negras, son las temperaturas máximas y mínimas, para el periodo 1979 al 2024. En ambas (Izquierda); **b) y d)** Es la anomalia de las temperaturas a lo largo del año 2025 (Color rojo).

2.2 Área y Volumen de las NEP.

Las Nubes Estratosféricas Polares (NEP) se forman a través de las bajas temperaturas mínimas en la estratosfera; se considera Tipo I (ácido nítrico trihidratado) las que se forman a partir de una temperatura mínima inferior a 194,6 K (-78,5°C) a nivel isoentrópico de 460 K y las Tipo II por debajo de los 187,7 K (-85,3°C). Los mecanismos de formación son a través de reacciones heterogéneas en la estratosfera (Carbajal et al., 2024). El umbral de temperatura para la formación de NEP Tipo I, depende de las concentraciones de ácido nítrico y agua, lo cual es particularmente importante debido a posibles cambios en la composición química en las próximas décadas (Vargin et al., 2023).

En la **figura 3 y figura 4** se puede observar que el área y volumen de las NEP Tipo I y Tipo II, respectivamente, donde ya han finalizado su ciclo debido a que las temperaturas están por encima de los umbrales de formación. Las NEP tipo I, se diluyen a finales de octubre. Mientras que, las NEP Tipo II de la misma manera, pero a finales de septiembre. Se observa que en ambos casos, que la disminución empieza a mediados del mes de agosto y no se desarrollan por encima de su media, consistente con el aumento de temperatura de la estratosfera por arriba de la media. En tal sentido, es evidente que los SSW que se presentan, impacta el crecimiento y desarrollo de las NEP en la estratosfera de la Antártida y se puede pensar de forma positiva para la formación del Agujero de

Ozono, debido a que hay menos reservorios que contienen a las sustancias destructoras de ozono, principalmente el cloro libre. Las NEP Tipo II son las más afectadas por las temperaturas elevadas.

En la **Tabla 1**, se muestra los valores máximos para el tamaño y formación de las NEP Tipo I y Tipo II durante el año 2025. Observamos que los dos tipos de nieves presenta máximos por arriba de sus medias históricas y ambos se dan previo al SSW.

Tabla 1. Las unidades son: Área [Millones de km²] y Volumen [Millones de km³]. Los números en color azul, muestran cuando los valores máximos son superiores a sus medias y los números rojos cuando el valor máximo es inferior a su media.

FECHA, 2025	NEP TIPO I			
	Área [Millones de km ²]	Área Media 1979 - 2024	Volumen [Millones de km ³]	Volumen Medio 1979 - 2024
09 – Julio	27,77	24,98	---	---
11 - julio	---	---	318,31	285,94
FECHA, 2025	NEP TIPO II			
	Área [Millones de km ²]	Área Media 1979 - 2024	Volumen [Millones de km ³]	Volumen Medio 1979 - 2024
5 – agosto	16,66	13,24	---	---
17 – agosto	---	---	195,33	175,79

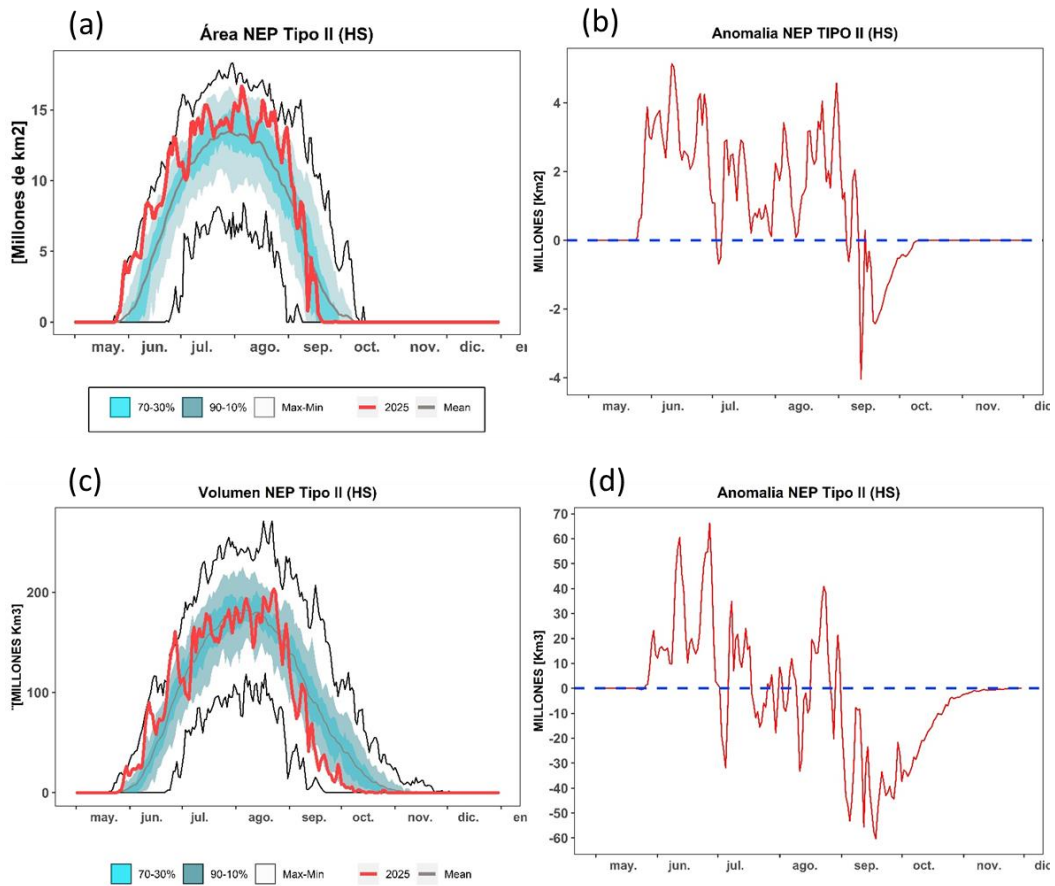
Fuente de datos:

https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/figures/merra2/temperature/natas_460_2025_merra2.txt

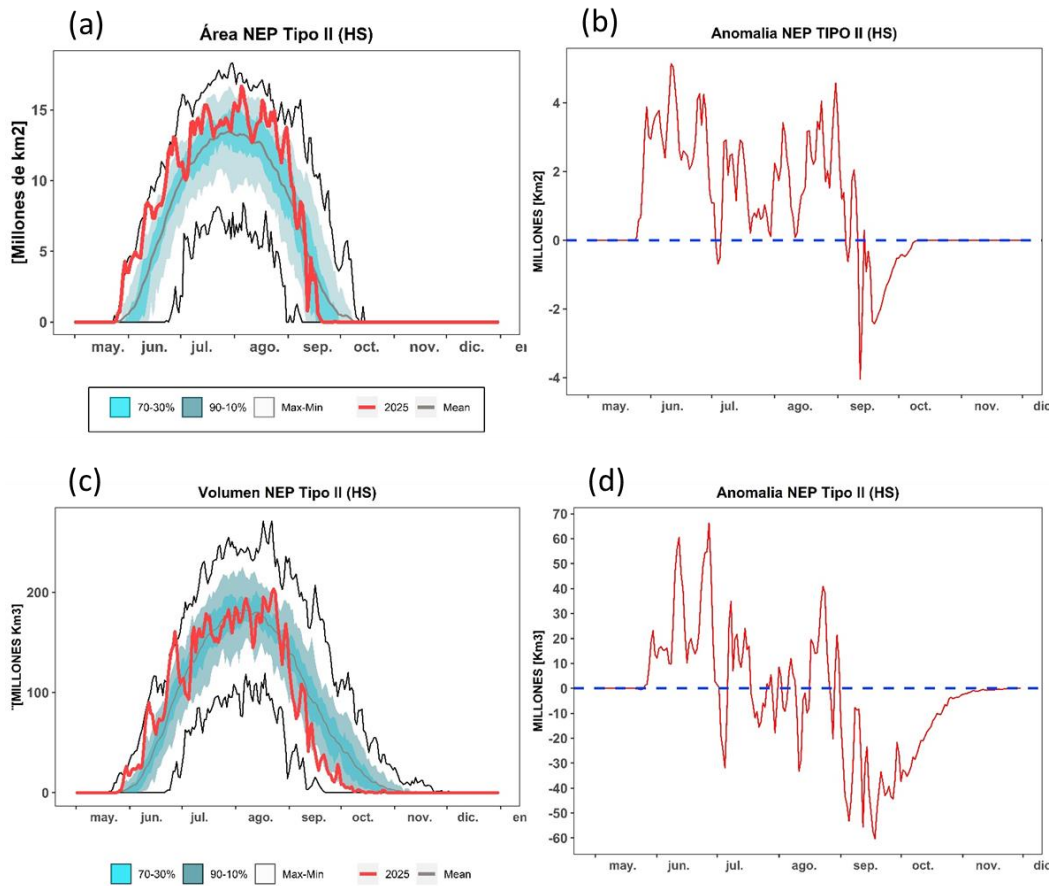
https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/figures/merra2/temperature/natvs_2025_merra2.txt

https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/figures/merra2/temperature/iceas_460_2025_merra2.txt

https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/figures/merra2/temperature/icevs_2025_merra2.txt



Figuras 3. Área (a) y Volumen (c) de las nubes estratosféricas polares (NEP) Tipo I, sobre la región Antártica. La línea color roja, representa la el año 2025. Las líneas externas y central negras, son los valores medias, máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2024. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90% para el mismo periodo. Las Anomalías del área (b) y volumen (c) se muestran con líneas color roja.



Figuras 4. Área (a) y Volumen (c) de las nubes estratosféricas polares (NEP) Tipo II, sobre la región Antártica. La línea color roja, representa la el año 2025. Las líneas externas y central negras, son los valores medias, máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2024. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90% para el mismo periodo. Las Anomalías del área (b) y volumen (c) se muestran con líneas color roja.

2.3 ESTABILIDAD DEL VÓRTICE POLAR

El flujo de calor promediado longitudinalmente entre los 45°S y los 75°S es una indicación de hasta qué grado está perturbada la estratosfera. En la **figura 5** se muestra el desarrollo del flujo de calor. Lea el subtítulo para mayores detalles de cómo interpretar el gráfico.

Se puede observar que, a partir del mes de agosto, hay un movimiento en cuanto al flujo de calor, que perturba el vórtice polar. Pero a partir del mes de octubre y entrado el mes de noviembre la propagación de calor desde la troposfera hacia la estratosfera va disminuyendo y tiende a ir hacia la calma.

Fuente de datos: https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/flux_2023_MERRA2_SH.html

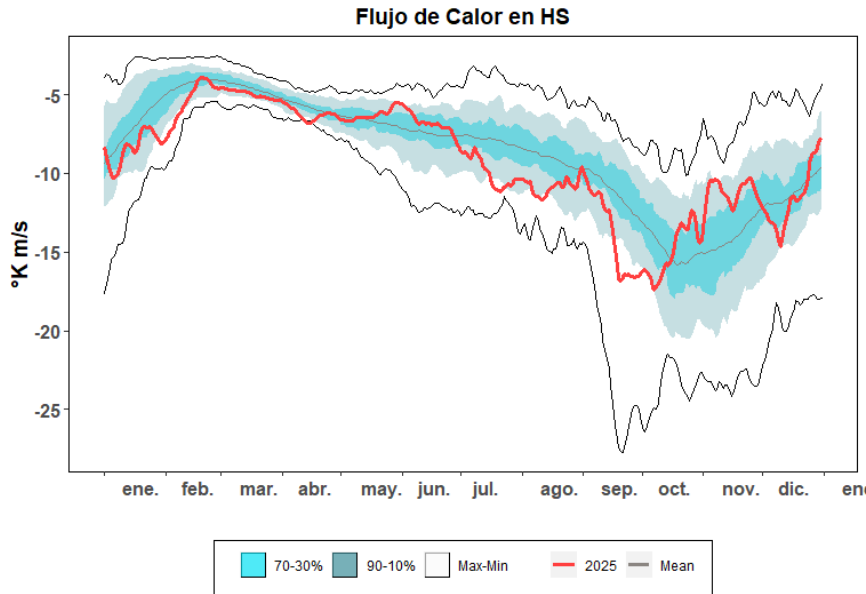


Figura 5. Serie de tiempo del flujo de calor meridional promediado sobre la región entre 45-75°S. La curva roja muestra los datos para 2025. Note que un gran número negativo significa un gran flujo de calor. Los valores cercanos a cero significan un flujo de calor pequeño. Las líneas externas y central negras, son los valores medias, máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2024. Las líneas sombreadas en azul-verde de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90% para el mismo periodo.

En la **Figura 6 (a)** se observa que la actividad de la amplitud de la altura geopotencial (gpm) o amplitud de la onda 1, presenta máxima actividad en su amplitud durante el mes de agosto, la cual se asocia al primer SWW, aunque no es significativo. Este crecimiento en la amplitud de la onda 1 se sostiene con variaciones durante los meses de septiembre y octubre, incluso alcanzando los valores máximos históricos (5, 17 y 18 de septiembre) **b)** En la figura se observa que se presenta un máximo en los días 26, 27 y 28 de agosto y posteriormente, no hay actividad significativa. **c)** Muestra el flujo vertical Eliassen – Palm (Onda total) donde se observa la fuerte actividad a que coincidente con la onda 1 y onda 2.

Esta cantidad de actividad, particularmente la onda 1, tiene repercusión como la reducción de la velocidad del viento, que inicia a partir del mes de agosto y se prolonga hasta el mes de octubre, esta dicha actividad no alcanza a detenerlos, mucho menos a invertirlos (**Figura 7 a)**), pero este impacto hace que el vórtice polar se comprima hacia el continente Antártico (Fase Positiva), esta situación se observa en la misma figura (**b)**) donde reduce su tamaño hasta por debajo de su media.

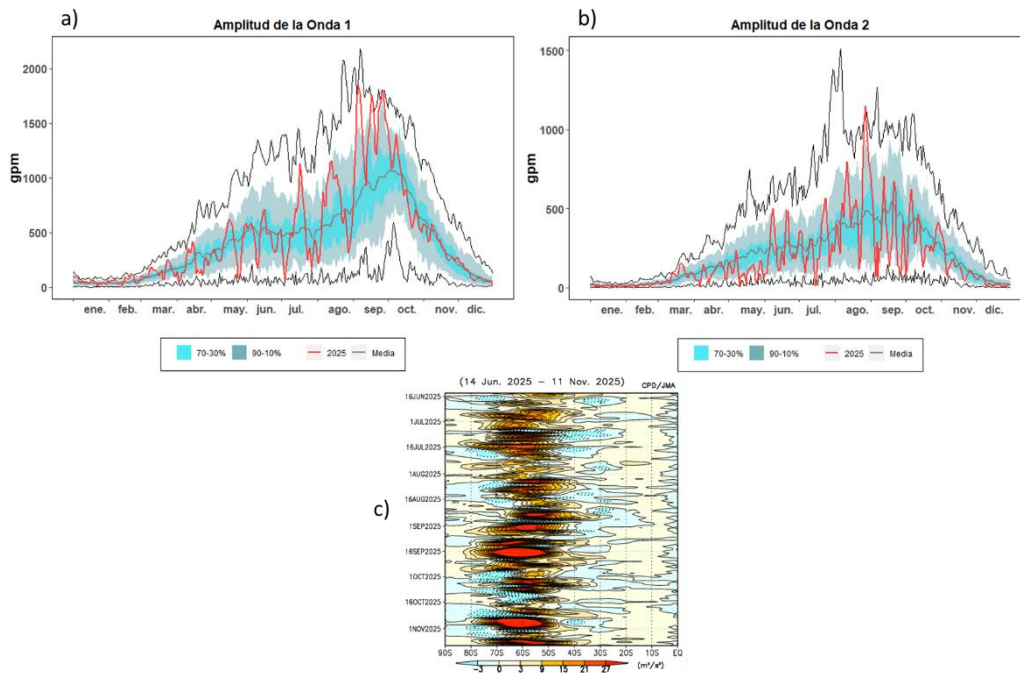


Figura 6. Actividad de las ondas atmosféricas que afectan el vórtice polar. **a)** Es la altura de la amplitud de la onda 1 a 10 hPa. **b)** Es la altura de la amplitud de la onda 2 a 10 hPa y **c)** El flujo vertical Eliassen-Palm de la onda total que se construye en la agencia de meteorología Japonesa.

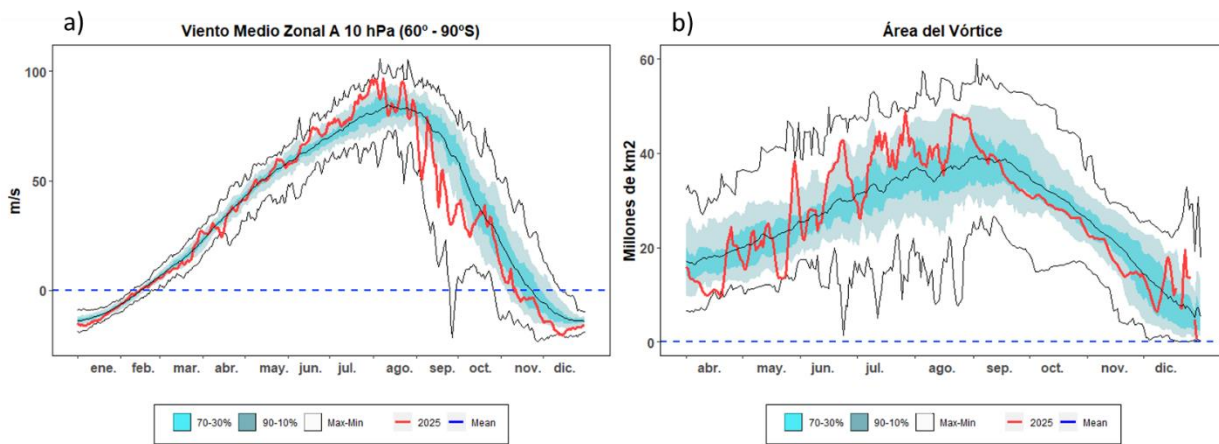


Figura 7. a) representa al viento zonal en la estratosfera, circundante a la Antártica (Vórtice polar). b) El área del vórtice polar en la estratosfera. En ambas figuras, las líneas rojas representan el año 2025, las líneas externas y central negras, son los valores medias, máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2024. Las líneas sombreadas en azul-verde de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90% para el mismo periodo.

En la **figura 8 (a)** se observa un día previo (25 de agosto) al aumento de la actividad de onda y posterior al incremento de la amplitud de la altura geopotencial de la onda 1 (26, 27 y 28 de agosto) y se observa un elongación lenta del vórtice polar, alargándose principalmente hacia el océano Pacífico sur. **(b)** Es otro impacto de la actividad de onda sobre el vórtice polar; se incluye el día previo (16 de septiembre) al crecimiento de la amplitud, principalmente de la onda 1. El día 17 y 18 de agosto, se observa una deformación del vórtice polar y debilitamiento, posteriormente, el día 19, comienza la recuperación poco a poco.

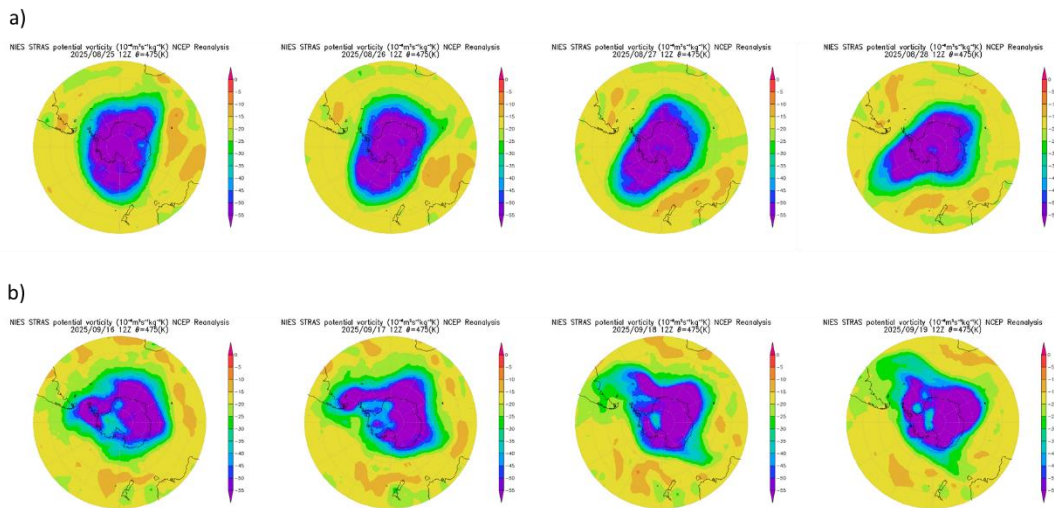


Figura 8. Campos de Potencial de Vorticidad (PV), a una superficie isentrópica de 475 K. Donde muestran la deformación del vórtice polar por día. a) Días del mes, iniciando el 25 y finalizando 28 de agosto. b) Días del mes, iniciando el 16 y finalizando 19 de septiembre. La escala de colores muestra la estabilidad del vórtice, cuando tiene a ser más negativo y tiende a ser más inestable, cuando el valor tiende a cero.

En la **figura 9** se muestra el impacto que tiene un vórtice polar, perturbado a los campos de temperatura en la estratosfera. a) Se muestra la deformación de la temperatura dentro del vórtice durante los días 16, 17, 18 y 19 de agosto. b) Estos campos son más notorios con un vórtice perturbado y con calentamiento dentro del vórtice, además consistentes con las series de tiempo de temperaturas zonales y tiene claro impacto, en la disminución de las NEP tipo I y II.

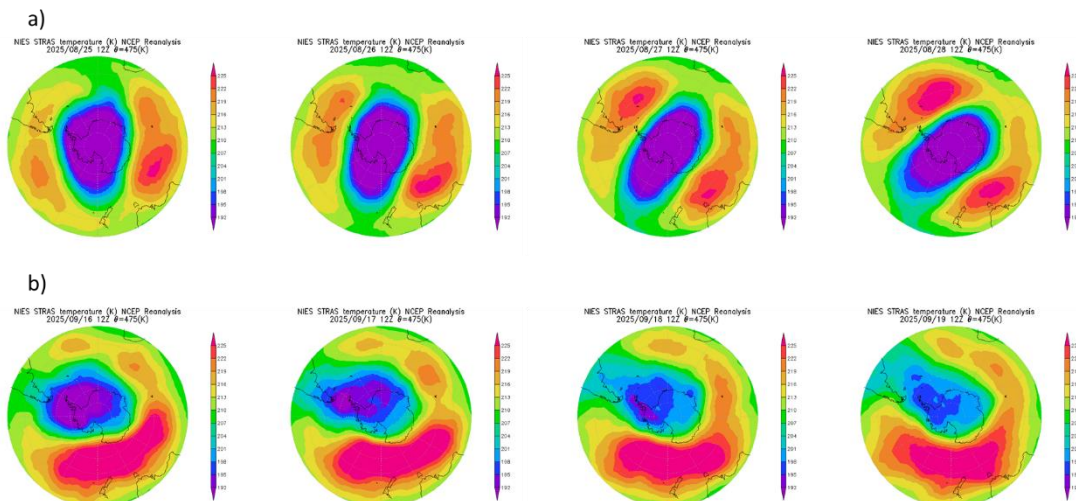


Figura 9. Campos de (a) Potencial de Vorticidad (PV) y (b) Temperatura ($^{\circ}$ K), a una superficie isentrópica de 550 K. Donde muestran la deformación del vórtice polar. Los campos son cada 3 días, iniciando el 1 de octubre y finalizando el día 16 de octubre del 2024.

Fuente de datos:

<http://www.pa.op.dlr.de/arctic/ecmwf.php?im=23>

<https://db.cger.nies.go.jp/gem/stras/en/forecast.html?date=20220830&polar=s&k=475>

<https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/clisys/STRAT/>

https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/ann_data.html

3. OBSERVACIONES DE OZONO

3.1 Observaciones Satelitales

Al inicio de la primavera austral, el sol empieza a retornar a la Antártida, ya que finaliza la noche polar. Tanto los datos satelitales, los datos de superficie y sondeos con globos muestran que el agujero de ozono, inició su formación.

Los sistemas satelitales que miden todo el año y de manera global, muestran el monitoreo de la capa de ozono con los sensores y aplicación de algoritmos para el procesamiento de los datos del TOMS, OMI y OMPS de manera global.

La **Figura 9 (a)** se muestra la columna de ozono mínimo en Hemisferio Sur (HS) y el ozono en la Capa Polar. Se nota claramente el efecto del SSW y su impacto en el vórtice polar y en las NEP tipo I y II. Durante el mes de abril a agosto es el invierno y en la estratosfera se observa que es fría durante ese periodo, de tal manera que se observaron incremento en el área y volumen de las NEP, en consecuencia gran destrucción de ozono en el HS. Mientras que en la capa polar, los valores de ozono se mantienen apenas por debajo de su media. **b)** Muestra la anomalía que es más claro, por ejemplo en el HS con NEP grandes en área y volumen, los mecanismos químicos de destrucción se activan en el mes de agosto. Similar ocurre en el ozono dentro de la capa polar, que después del primer evento de SWW, la NEP se diluyen y el ozono se recupera y se mantiene en una estratosfera con temperatura por arriba de su media, hasta el mes de octubre y posteriormente otro SSW desactiva las NEP y finaliza tempranamente la temporada del agujero de ozono la primera quincena de noviembre.

Fuente de datos: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/monthly/SH.html>

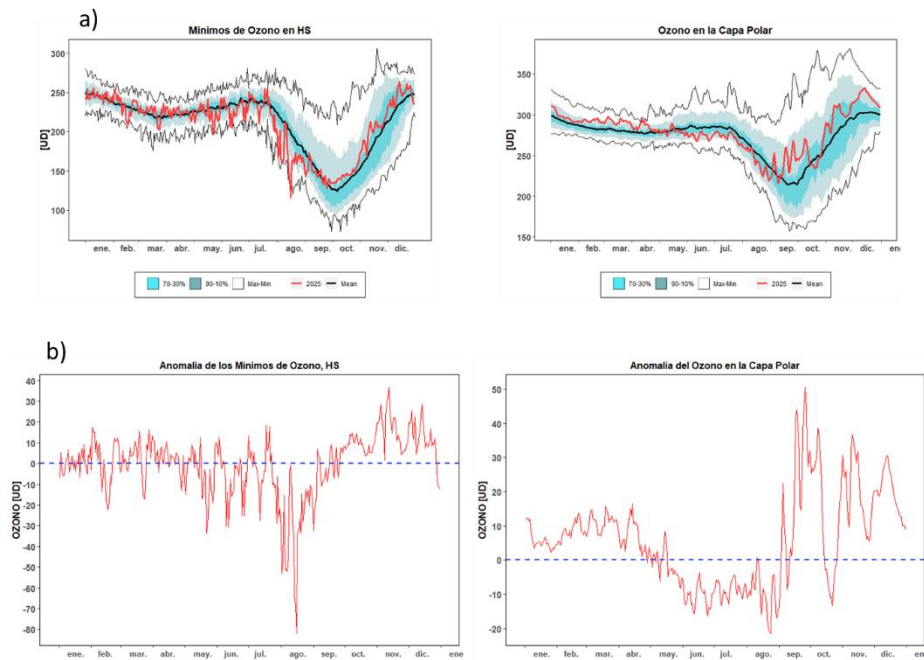


Figura 9. (a), mínimo diario de la columna total de ozono en el hemisferio sur y dentro de la capa polar. La línea roja es el año 2025, la línea negra representa la media del periodo 1979 a 2024. Las líneas externas negras, son los valores máximos y mínimos durante el mismo periodo. Las líneas sombreadas en azul-verde de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90% del mismo periodo. **(b)**, es la anomalía de la columna total de ozono dentro de la capa polar. En ambos casos, la línea roja muestra el año 2025,

3.2 Observaciones en superficie

Por ahora, solo se usan mediciones en superficie obtenidos mediante el Espectrofotómetro Dobson y ozonosondeos de la Estación GAW Ushuaia (54° 50' 54.46''S, 68° 18' 37.52''O) Y mediciones con Espectrofotómetro Dobson de la Estación Antártica Marambio (61° 14' 33.68'' S, 56° 37' 36.98'' O), dependientes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Ozonosondeos y mediciones del espectrofotómetro Brewer de la Estación Antártica Belgrano II (77°52'28''S 34°37'37''O), medidas con Espectrofotómetro Brewer de la Estación Antártica San Martín (68°07'48'' S, 67°06' 08'' O), ambos laboratorios bajo la dependencia de la Dirección Nacional del Antártico/Instituto Antártico Argentino (DNA/IAA).

3.2.1. Estación VAG Ushuaia.



El espectrofotómetro Dobson (D131) mide todos los días y en la **Figura 10**, se muestra la evolución diaria (**a**) y mensual (**b**) de la columna total de ozono durante todo el año 2025, comparado con su media histórica (1994-2024). Los datos diarios de ozono total, son muy acordes con los datos de ozono mínimo y están asociados a la temperatura en la estratosfera. Después de los SWW en agosto y septiembre, los datos en su mayoría están por arriba de su media, es decir menos destrucción química del ozono y de la estación permanece fuera del vórtice polar, donde se acumula ozono, debido a que ésta actúa como una barrera, aunque por momentos el ozono baja sus valores (< 220 UD), debido al paso del agujero de ozono que se ha deformado, por impacto, principalmente de la actividad de la onda 1. El paso del agujero de ozono para este 2025 han sido 5 veces y en marzo un mini agujero de ozono se observa en la estación VAG-Ushuaia, caso muy atípico (Laino-Bldini et al, 2025).

La amplitud en cuanto a los valores es notorio, incluso hay 9 valores altos que son igual o mayores que los máximos históricos en la estación, debido a paso de masas de aire ópticas ricas en ozono, alrededor del vórtice polar. A pesar de que en septiembre y octubre, paso el agujero de ozono las medias mensuales se observan valores de ozono por arriba de la media, incluso en noviembre.

En los valores medios mensuales, los valores oscilan alrededor de su media, durante los meses de mayo, junio y julio (Invierno) los valores se encuentran por debajo de la media, asociado a una estratosfera fría, antes de el primer SSW. Posteriormente, en los meses de agosto y septiembre, los valores coinciden con los valores medios históricos de la estación. En la misma figura no se observa algún evento de carácter mensual que sea de mayor importancia.

En la **Figura 11** se muestra los perfiles de ozono para el año 2025 (11 sondeos) De los 5 días del paso del agujero de ozono, se pudieron realizar 4 ozonosondeos, incluyendo el día 4 de noviembre, previo al cierre del agujero de ozono. En la tabla 2 se resumen algunos de los resultados obtenidos de las ozonondas.

Tabla 2. Se muestra la altura de la tropopausa en metros (m), la temperatura de la tropopausa en grados centígrados y el ozono total en Unidades Dobson (UD).

Fecha	Tropopausa (m)	Temperatura (°C)	Ozono Total (UD)
17 de sep.	10753	-67.0	198.0
9 de oct.	9969	-63.4	204.8
4 de oct.	11168	-69.5	205.3
8 de nov.	10395	-64.8	196.5

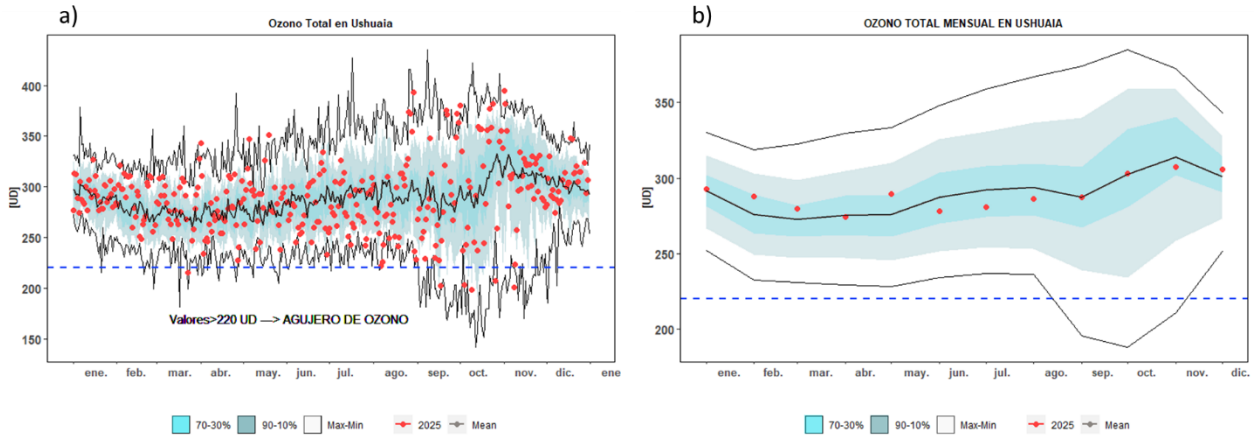
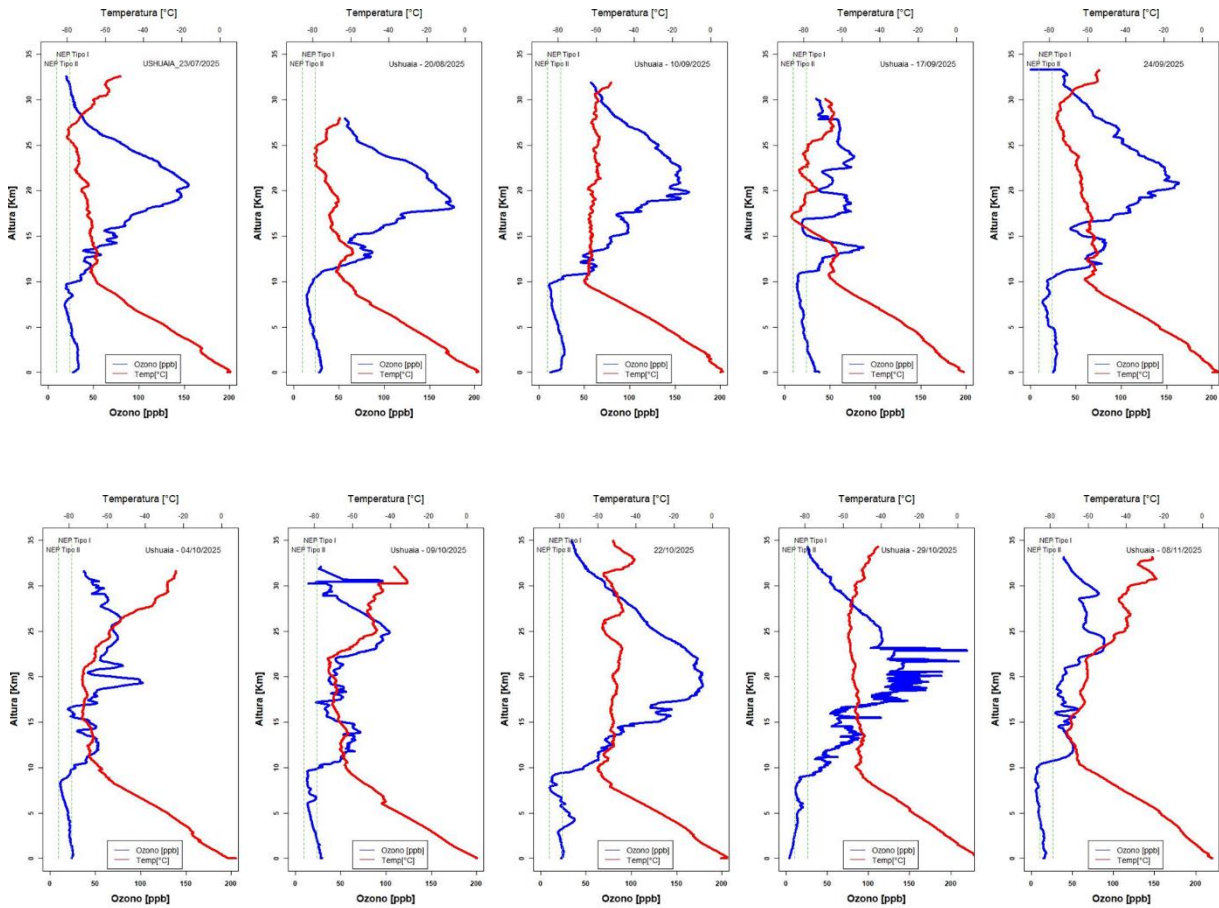


Figura 10. Datos de la columna Total de Ozono [UD] con el Espectrofotómetro Dobson en la estación VAG Ushuaia. En ambos gráficos los puntos rojos son los datos del año 2025. La línea negra central corresponde la media del periodo 1979 a 2024 y las líneas exteriores son los máximos y mínimos para el mismo periodo.



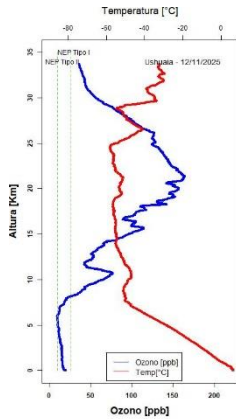


Figura 11. Ozonosondeos realizados en la Estación VAG de Ushuaia. En los dos gráficos, la línea azul es la relación de mezcla del ozono expresado en unidades partes por billón [ppb] en cada nivel de la atmósfera. Y la curva roja es el perfil de la temperatura en [°C].

3.3.3. Estación Antártica San Martín.

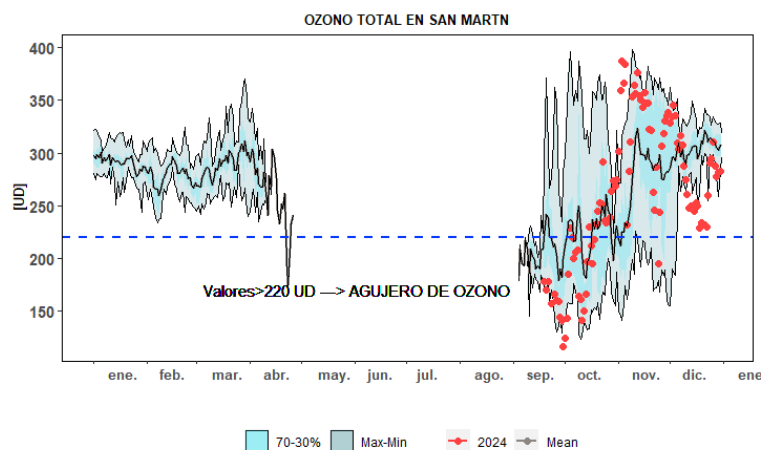


La estación Antártica San Martín se encuentra en la península Antártica San Martín ($68^{\circ}07'48''$ S, $67^{\circ}06'8''$ O) y forma parte de la red de medición de ozono total del programa VAG de la OMM. El instrumento Brewer #162 utilizado para medir el ozono total en la estación y a partir del 1 de diciembre de 2020, sus datos serán parte de la red europea de instrumentos Brewer **EUBREWNET**. El Espectrofotómetro Brewer se encuentra bajo un convenio entre el **Instituto Antártico Argentino (IAA)** y el ex **Comando Antártico de Ejército**.

El espectrofotómetro Brewer mide todos los días, excepto durante el invierno polar (abril a septiembre) o debido a situaciones complicadas que impidan la medición, como vientos fuertes, lluvia, etc.



Operadores del espectrofotómetro Brewer MKIV en Base San Martín. Ing. Joel Chaya y Téc. Pablo Signorelli (2025).



Medición de ozono total diario con el espectrofotómetro Brewer (#162) en la estación Antártica San Martín.

En la **Figura 12 a)** se muestra la evolución diaria para el año 2025, donde se observa que cuando se retoman las mediciones en el mes de agosto, casi la totalidad se encuentra bajo el agujero de ozono, inclusive un valor extremadamente bajo se 157 UD el día 2 de septiembre. Mientras que en el mes de octubre valores muy por arriba que alcanzan los 385 UD debido a la poca destrucción del ozono en la estratosfera. **b)** Muestra los valores medios mensuales y se observa que los meses de septiembre y octubre, permanecen por debajo del agujero de ozono, pero noviembre el valor esta por debajo de la media y por arriba de los 220 UD.

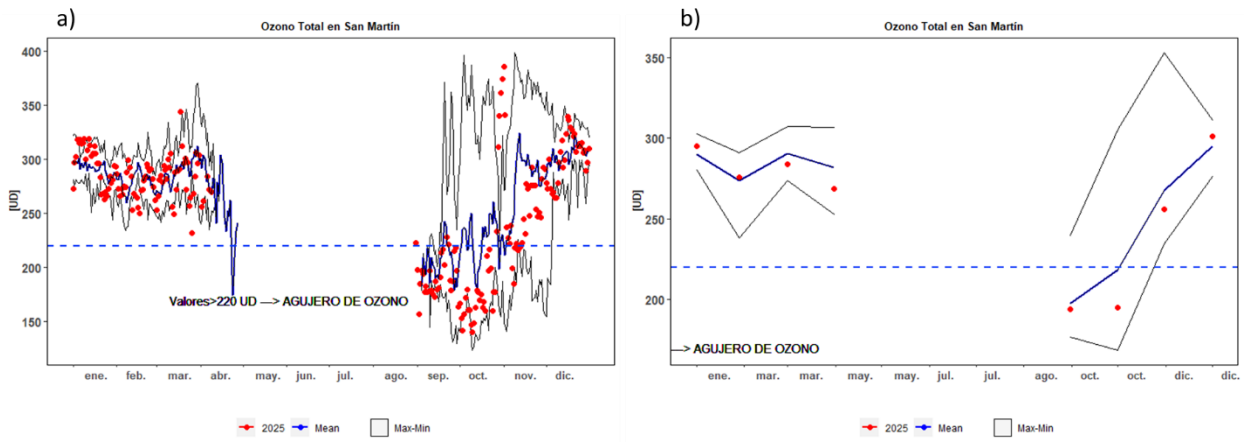
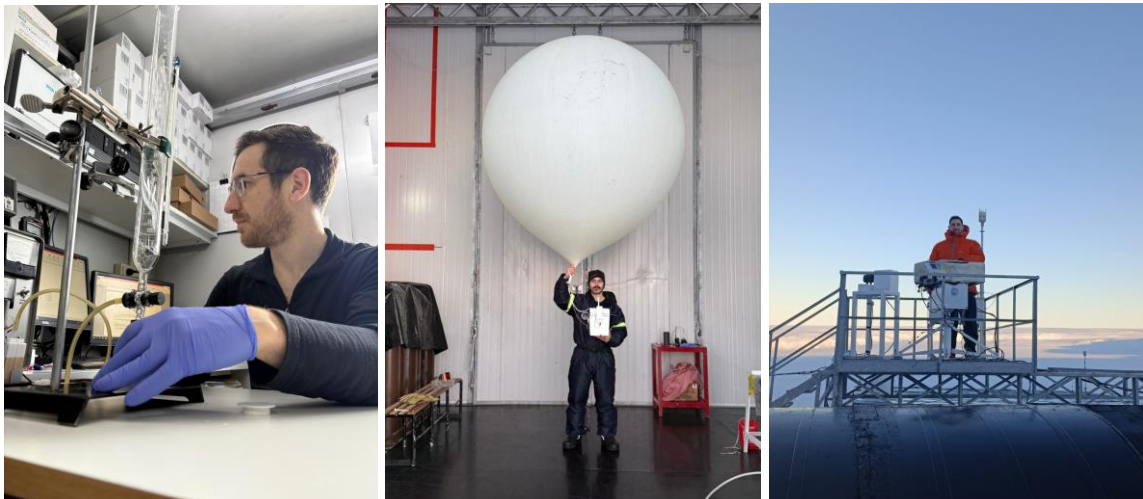


Figura 12. Datos de la columna Total de Ozono [UD] con el Espectrofotómetro Brewer #162 en la estación Antártica San Martín. En ambos gráficos los puntos rojos son los datos del año 2025. La línea azul central corresponde la media del periodo 1979 a 2024 y las líneas exteriores son los máximos y mínimos para el mismo periodo.

3.3.4 Estación Antártica Belgrano II.



Calibración de ozonsonda, Dr. Gastón Alonso. Lanzamiento de ozonsonda, Téc. Fernando Nicolas Rivas y operación de espectrofotómetro Brewer MKIV en la base Belgrano II (2025).

La estación Antártica Belgrano II se encuentra ubicada en el Nunatak Bertrab ubicado al sur del mar de Wedell en la Bahía Vahsel sobre la Costa Confin en la Tierra de Coats y forma parte de la red de medición de ozono total de programa VAG de la OMM. El ozono total se mide con espectrofotómetro Brewer MKIV desde 1992, Los datos del Brewer #99 desde el año 2020 son parte de la red europea de Brewer **EUBREWNET**. El Espectrofotómetro Brewer es un instrumento que deriva del convenio de Colaboración Científica entre la Dirección Nacional del Antártico - **Instituto Antártico Argentino** (IAA) y el **Programma Nazionale di Ricerche in Antartide** (PNRA) de Italia a través del Instituto de Física Atmosférica de Roma (IFAR).

La Estación Antártica Belgrano II es una estación NDACC y los datos pueden ser accedidos en el siguiente link: <https://ndacc.larc.nasa.gov/stations/belgrano-ii-station-antarctica>.

En la **Figura 13 a)** se muestran los resultados del monitoreo a lo largo del año 2025. La primera parte del año, han oscilado a lo largo de la media histórica del periodo 1992-2025. Durante la noche polar no se mide debido a las inclemencias del tiempo y las mediciones se retoman en el mes de septiembre con valores bajos y menores al umbral de los 220 UD, indicativo que la estación se encuentra influenciada por el agujero de ozono durante los meses de septiembre, octubre y noviembre, pero ya en el mes de diciembre los valores aumentan y se recuperan. **b)** Son las medias mensuales y claramente se observa que los meses de septiembre, octubre y noviembre, se han encontrado por debajo del agujero de ozono. Mientras que en el mes de diciembre el ozono total está por arriba de su media histórica.

Los ozonosondeos que se hacen en esta base, son realizados a través del convenio de Colaboración Científica entre la Dirección Nacional del Antártico - **Instituto Antártico Argentino** (IAA) y el instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial (INTA) de España desde 1994, donde se inicia la colaboración con el monitoreo de la capa de ozono y el dióxido de nitrógeno (NO₂) con el Espectrómetro Visible de Absorción (EVA), utilizando la técnica DOAS (Differential Optical Absorption Spectroscopy). Hoy se trabaja con espectrómetros que utilizan la técnica Max DOAS y un LIDAR para la detección de las NEP.

En la **Figura 14** la evolución del agujero de ozono se muestra a través de los 15 ozonosondeos, que se realizaron durante el año. En estos se muestra el perfil de ozono y de la temperatura, que a través de un análisis cualitativo muestra que la estación Belgrano II está bajo la influencia del agujero de ozono, aunque aún en formación, desde el 20 de agosto, pero a partir del día 24 de septiembre, ya se observa un agujero de ozono en crecimiento. Mientras que los perfiles de temperatura muestran el impacto del SSW, debido a que se observa que el perfil se va desplazando poco a poco hacia temperaturas menos frías, a partir del mismo día 24 de septiembre y el 24 de octubre la estratosfera ya no está en el orden de formación de la NEP y por lo tanto no se producen más. Finalmente, el último ozonosondeo realizado, se lanza previo al cierre del agujero de ozono, pero aún se muestra la influencia de éste.

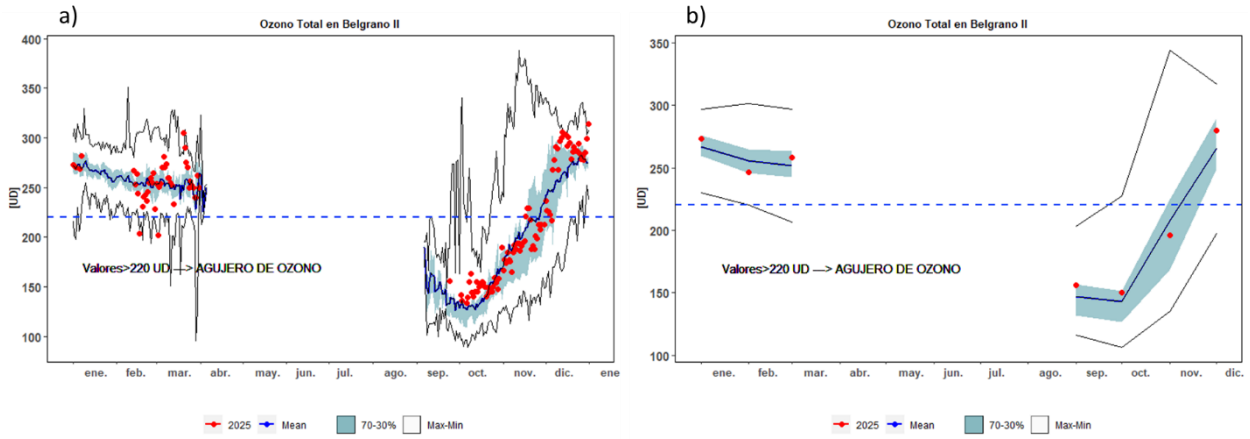
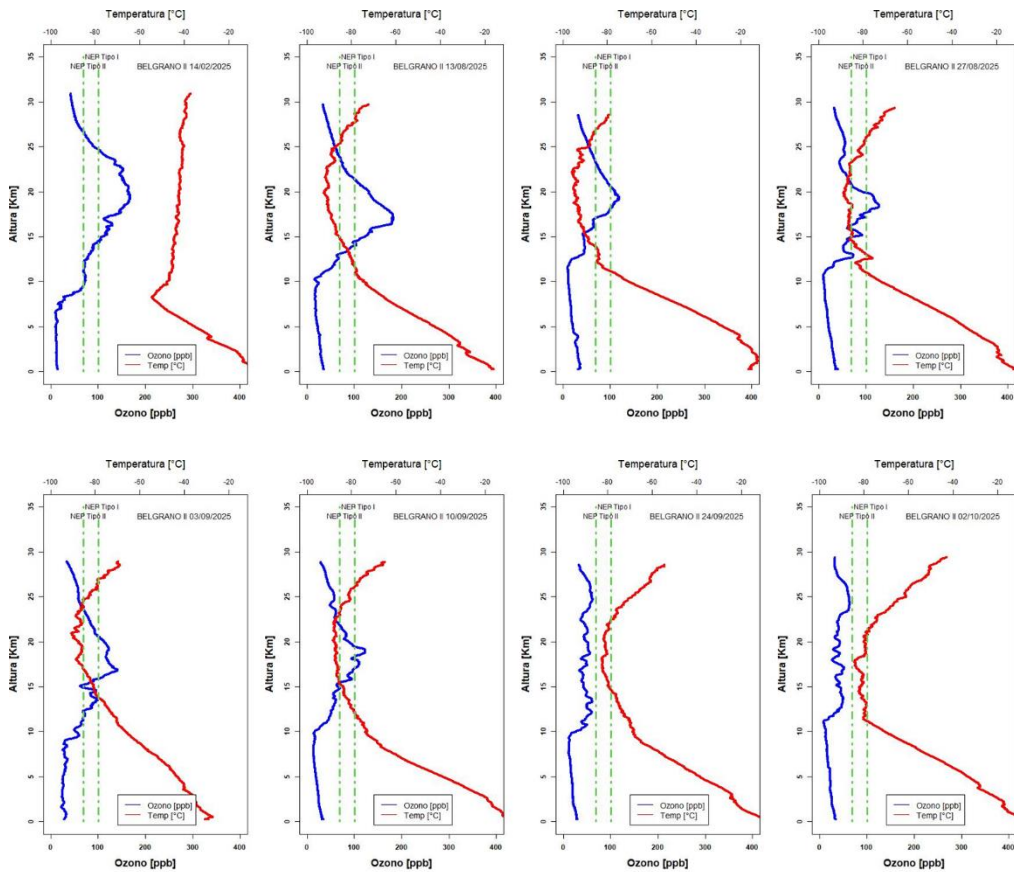


Figura 13. Medición de ozono total en la estación Antártica Belgrano II con el Espectrofotómetro Brewer. **(a)** valores diarios. **(b)** Promedios mensuales. Los puntos rojos representan las mediciones de ozono total para el año 2025. La línea negra central corresponde la media del periodo 1992 a 2024 y las líneas exteriores son los máximos y mínimos para el mismo periodo.



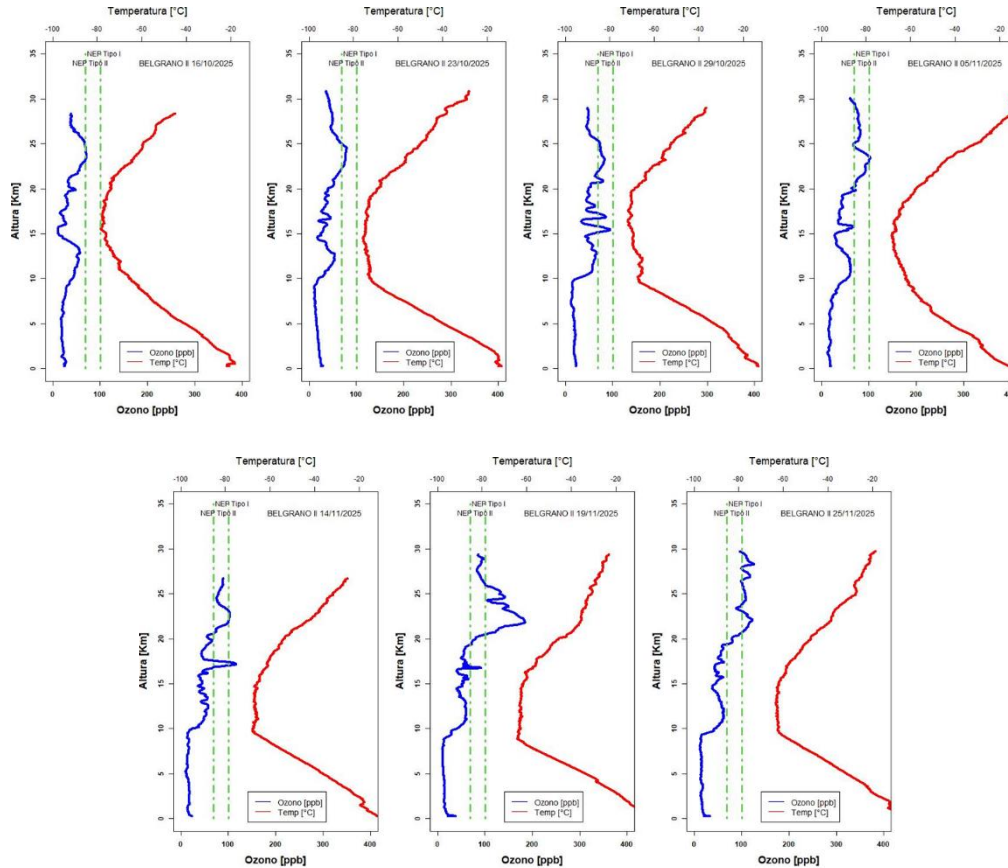


Figura 14. Ozonosondeo realizado en la Estación Antártica Belgrano II. En los dos gráficos, la línea azul es la relación de mezcla del ozono expresado en unidades partes por billón [ppb] en cada nivel de la atmosfera. Y la curva roja es el perfil de la temperatura en [°C].

4. El Agujero de ozono

4.1 El área del agujero de ozono

En la **figura 15** se muestra el área de la región en la que el ozono total es menor a los 220 UD (Definido por la comunidad científica como Agujero de Ozono). Actualmente son 3 los portales que reportan el área del agujero de ozono, los cuales muestran que, cualitativamente su comportamiento es muy similar y cuantitativamente difieren muy poco entre ellos. El agujero de ozono mostrado por la NASA (**a**) reporta un máximo de 22,86 millones de km² (TOMS + OMI + OMPS). El portal TEMIS (**b**) reporta aproximadamente 19,0 millones de km² (MSR2). En tanto que, COPERNICUS (**c**) muestra un máximo de 20,49 millones de km² (KAMS/C3S).

Fuente de datos:

https://www.temis.nl/protocols/o3hole/o3_size.php?date=20230922&lang=0

<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/monthly/SH.html> y <https://www.temis.nl/index.php>

<https://atmosphere.copernicus.eu/monitoring-ozone-layer>

https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar/gif_files/ozone_hole_plot_N20.png

Después de 3 calentamientos súbitos estratosféricos menores que ayudo a que éste no creciera demasiado el agujero de ozono y tuviera un cierre relativamente temprano. En la **figura 16** según reporta la NASA, se puede observar que el área máxima absoluta (**a**) y el promediado del 7 de septiembre al 13 de octubre (**b**) que, son la fechas en las que observa el tamaño máximo. **a)** está en el **Rankin 23°** de 46 años de medición, considerando de menor a mayor, más pequeño que los últimos 3 años. **b)** Mientras que el área promedio, ocupa el lugar del **Rankin 15°**, de menor a mayor, siendo este promedio menor al de los últimos 6 años. Si consideramos el área que reporta COPERNICUS podría llegar hasta el Rankin 12°. Mientras que la misma NASA argumenta que es 30% menor que el máximo histórico del año 2006, en tanto que es el 5° más pequeño después de 1992.

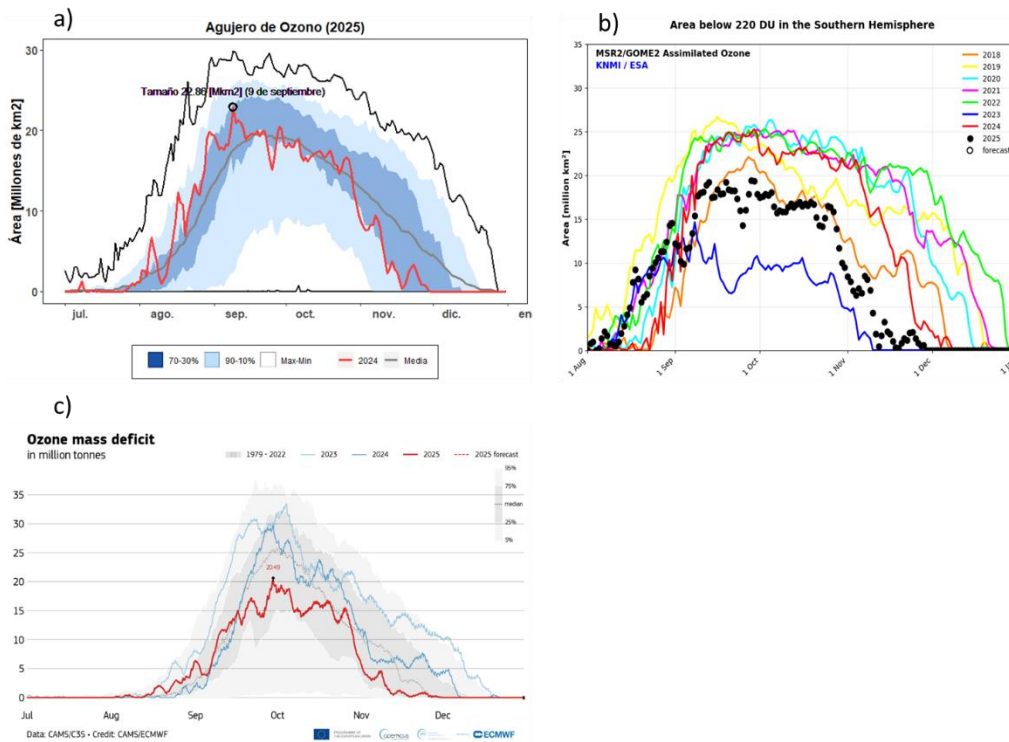


Figura 15. Área del Agujero de Ozono (millones de km²). a); son datos del TEMIS, Datos de la ESA (Agencia Espacial Europea). b) Es el consenso de satélites de la NASA, EEUU (TOMS+OMI+OMPS). c) es el monitoreo del COPERNICUS ATMOSPHERE MONITORING SERVICE (CAMS) del Centro Europeo ECMWF- d) el gráfico de la NOAA, solo del equipo OMPS.

La **figura 16**, muestra año con año la evolución del agujero de ozono desde 1979 al 2025. Para el caso de los máximos absolutos (**a**) se observan:

- 1) En promedio, el valor máximo de ozono (área en km²) **aumenta ~0,28 km² por año** en todo el período analizado (1979 - 2025), aunque a partir del año 2002 a la fecha se observa una tendencia a disminuir ($R^2 = 0,33$ y p-valor = $2,66 \times 10^{-5}$, Tendencia estadísticamente significativa).
- 2) Una tendencia definida a aumento del tamaño del agujero de ozono desde 1979 hasta alrededor del 2002 (año en que se presenta el máximo de toda la serie). Esta tendencia fue **aumentar ~1.03 km² por año** ($R^2 = 0.76$, p-valor = 5.2×10^{-8} , Tendencia altamente significativa).

- 3) Entre 2002 y 2019 se observa una tendencia negativa leve, no muy clara, consistente con una estabilización y comienzo de recuperación del agujero de ozono, aunque con alta variabilidad interanual, lo que reduce la significancia estadística.
- 4) Desde el año 2020 hasta el 2025 los seis últimos agujeros de ozono han sido muy similares, con una tendencia a **disminuir ~0.496 km² por año** ($R^2 = 0.76$, p-valor = 0,25, Tendencia no significativa) por lo tanto, estos últimos 6 años aún no se puede afirmar una recuperación.
- 5) El año 2025 se presenta el máximo absoluto el día 9 de septiembre con aproximadamente 22,86 millones de km², ocupando el 23° lugar en el ranking de menor a mayor de 1979 a 2025.

Para el caso de las medias del agujero de ozono **(b)** se observa:

- 1) Para el periodo de 1979 al 2006, la tendencia **umenta** más lenta que los valores máximos absolutos, es decir **~0,46 millones de km²** ($R^2 = 0,882$, p-valor < 0,001, Tendencia altamente significativa). Alrededor del **88.2%** de la variabilidad en el área puede explicarse por la tendencia temporal lineal.
- 2) Para el periodo de 2006 al 2019, se observaba una recuperación de ozono y **reducción** del agujero de ozono de **~0,597 millones de km² por año**, muy similar a los máximos absolutos ($R^2 = 0,321$, p-valor = 0,034, Tendencia significativa).
- 3) Los 6 años (2020 al 2025) se observa una **reducción** respecto al promedio de esos cuatro años de **~1.026 Millones de km²** ($R^2 = 0,768$, p-valor = 0,023, Tendencia significativa).
- 4) Para el año 2025, el tamaño del agujero de ozono presenta una área media de 19,6 Millones de km², ocupando el lugar del ranking 15°, de menor a mayor.

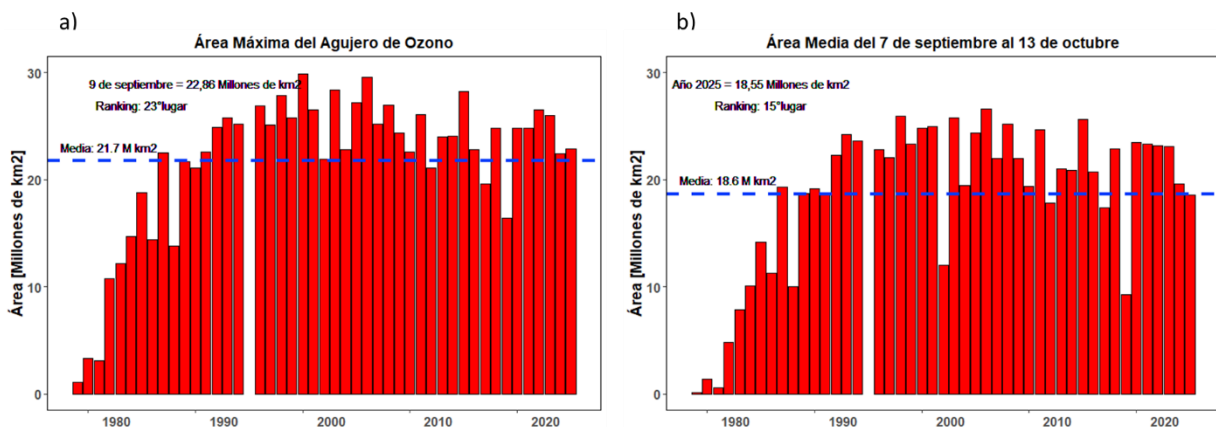


Figura 16. Evolución del Área del Agujero de Ozono (millones de km²) desde 1979 a 2025. (a); es el área máxima que se presentó en un día en específico. b); representa el área media para el periodo del 7 de septiembre al 13 de octubre, que es donde se presenta el área máxima del agujero de ozono.

En la **figura 17**, se observa de manera global, la distribución y crecimiento del agujero de ozono medio mensual para los meses de Julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, para el año 2025, 2019 y 2006. Comparando el 2025 con uno de los agujeros más pequeños del 2019 y con uno de los más grandes del año 2006. Se observa para este año, como un estado intermedio que es septiembre ya se encuentra presente el agujero de ozono que, es más grande e intenso que el de 2019 pero no tan grande que el del 2006. El agujero de ozono se fortalece en octubre, ocurriendo la misma situación que en el mes de septiembre. Posteriormente empieza a debilitarse y decaer en el mes de noviembre, aunque en el año 2006 persiste en tamaño y profundidad. Para el mes de diciembre ya no se observa destrucción de ozono y el agujero de ozono cerró su temporada.

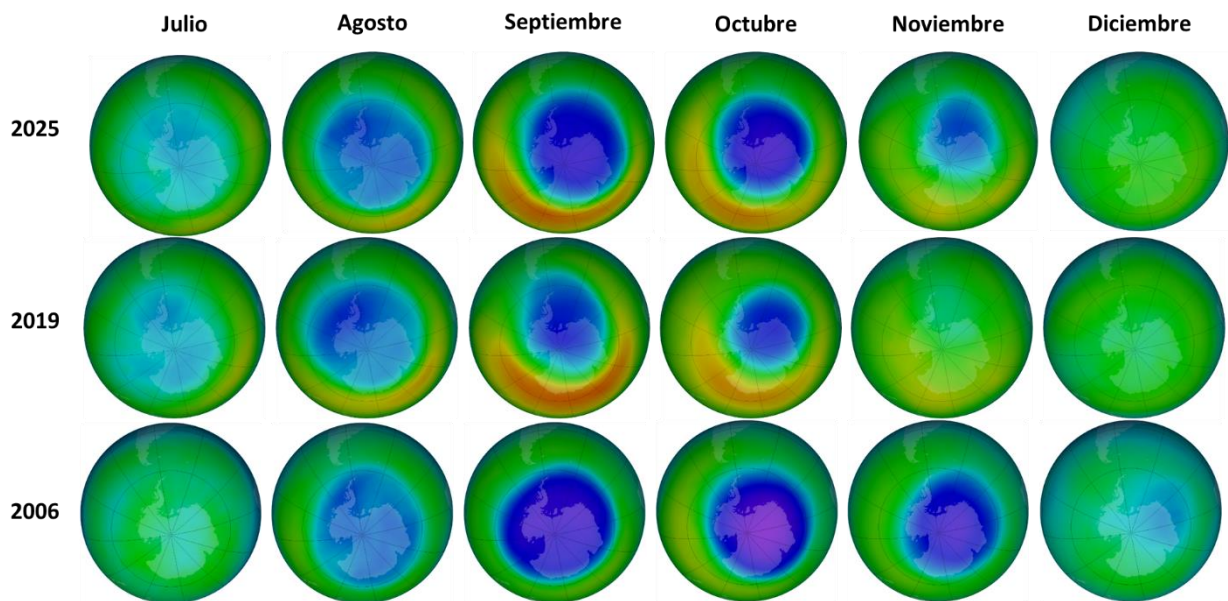


Figura 16. Evolución mensual del agujero de ozono para los años 2024, 2019 y 2006.

Animación de la evolución del agujero de ozono, para el año 2025:

<https://atmosphere.copernicus.eu/monitoring-ozone-layer>

5. CONCLUSION

La temporada 2025 estuvo fuertemente modulada por la dinámica estratosférica, más que por la química destructora de ozono total. Los SSW tuvieron un rol clave en la dilución e inhibición de las NEP reduciendo su magnitud y duración del agujero de ozono.

Aunque se observan señales consistentes con la recuperación gradual del ozono en los últimos 6 años, la alta variabilidad interanual impide aún afirmar una tendencia robusta en el corto plazo.

Los resultados refuerzan la evidencia del éxito del Protocolo de Montreal, pero subrayan la necesidad de mantener un monitoreo continuo y detallado.

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Oficina de Asimilación y Modelo Global (GMAO) de la NASA (MERRA).

Se agradece al Centro Europeo para Pronósticos del Tiempo de Medio Alcance (ECMWF), Instituto Noruego para Investigación del Aire (NILU) y a la Agencia Espacial Europea (ESA).

Se agradece a Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS - ECMWF).

Se agradece a Centro Climático de TOKIO, considerado Centro regional de Clima (RII, Asia).

Se agradece los datos de las ozonondas de Belgrano II del convenio entre el instituto Antártico Argentino (IAA) dependencia de la Dirección Nacional del Antártico de Argentina (DNA) y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) de España.

Se agradece al personal de la Estación VAG-Ushuaia; **Ing. Lino Fabián Condori, Sr. Emiliano Petrucci y Sr. Gonzalo Gambarte.**

Se agradece a los observadores Antárticos de San Martín del Laboratorio LASAN: **Ing. Joel Chaya y al Téc. Pablo Signorelli.**

Se agradece a los observadores Antárticos de Belgrano II del Laboratorio LABEL; **Dr. Gastón Alonso, Téc. Joaquín Cerlón y Téc. Fernando Nicolas Rivas.**

7. BIBLIOGRAFÍA

- Andrews, D.G., Holton, J.R., Leovy, C.B., 1987. Middle Atmosphere Dynamics (No. 40). Academic press.
- Banerjee, A., Fyfe, J. C., Polvani L. M., Waugh, D., and Chang K. A pause in Southern Hemisphere circulation trends due to the Montreal Protocol, Nature, Vol 579, 544-548.
- Banerjee A, Fyfe JC, Polvani LM, Waugh D, Chang KL. A pause in Southern Hemisphere circulation trends due to the Montreal Protocol. Nature. 2020 Mar; 579(7800):544-548. doi: 10.1038/s41586-020-2120-4. Epub 2020 Mar 25. PMID: 32214266.
- Botek E., Chabrilat S., Christophe Y. (BIRA-IASB) "Report on 2014 Antarctic ozone hole studies" MACC-III project (Monitoring Atmospheric Composition and Climate - III) 2014.
- Braathen Geir, "Boletín de Ozono Antártico", Editado por la WMO.
- Carbajal Benítez Gerardo, Facundo Orte, Elian Wolfram, Eduardo Luccini y Fernando Nollas. Boletines e Informe Final del Agujero de Ozono 2018, 2020, 2021.
- Carabajal Benitez Gerardo; Cupeiro Manuel; Sánchez Ricardo; Agüero Juan Daniel; Barlasina María Elena y Nollas Fernando. Caracterización de la Columna Total de Ozono medido con el Espectrofotómetro Dobson en cuatro estaciones en la Argentina. ISBN 978-987-1323-36-4.
- Charlton, A.J., Polvani, L.M., 2007. A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: climatology and modeling benchmarks. J. Clim. 20 (3), 449–469. <https://doi.org/>.

- Eskes H. J., van der A R. J., Brinksma E. J., Veefkind J. F., de Haan J. P., and Valks P. J. M. Retrieval and validation of ozone columns derived from measurements of SCIAMACHY on Envisat, Atmos. Chem. Phys. Discuss, 5, 4429-4475, 2005.
- Karpechko, A., Y. (2020). Jet stream stops shifting as ozone layer recovers, Nature, Vol 579, 544-501.
- Labitzke, K., Naujokat, B., Kunze, M., 2005. The lower Arctic stratosphere in winter since 1952: an update. Sparc Newsletter 24, 27–28. DOI:10.1175/JCLI3996.1.
- Laino-Baldini, C., Orte, F., Carmona, F., Luccini, E., Carbajal-Benítez, G., & Wolfram, E. (2026). Mini-ozone hole over Río Gallegos in March 2025: characterization and impact on UV radiation. Revista De Teledetección, (67). <https://doi.org/10.4995/raet.2026.24758>
- Matsuno, T., 1971. A dynamical model of the stratospheric sudden warming. J. Atmos. Sci. 28 (8), 14792–21494. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1971\)028<1479:ADMOTS>2.0](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1971)028<1479:ADMOTS>2.0).
- Manuel Gil Ojeda “El ozono estratosférico” Tethys, 3, 47–58, 2006. DOI:10.3369/tethys.2006.3.06.
- Newman P. (NASA), Nash E. (SSAI), Lait L. R., McPeters R. (NASA). NASA Ozone Watch: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>.
- Newman (NASA), E. Nash (SSAI), R. McPeters (NASA), S. Pawson (NASA) National Aeronautics and Space Administration - Goddard Space Flight Center - NASA Ozone Watch.
- Scientific Assessment of Ozone Depletion 2018 – Executive Summary – WMO UNO environment, NOAA, NASA, European Commission.
- Solomon, S. (2019). The discovery of the Antarctic ozone hole, Nature, Vol 575, 46-47.
- Veefkind, J.P., J.F. de Haan, E.J. Brinksma, M. Kroon and P.F. Levelt, Total Ozone from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) Using the DOAS technique, IEEE Trans. Geo. Rem. Sens., 2006, Vol. 44, No. 5, 1239-1244, doi:10.1109/TGRS.2006.871204.
- Valks, P.J.M., J.F. de Haan, J.P. Veefkind, R.F. van Oss and D.S. Balis, TOGOMI: An improved total ozone retrieval algorithm for GOME, XX Quadrennial Ozone Symposium, 1/6/2004-8/6/2004, C.S. Zerefos (Ed), 2004, Athens, University of Athens, 129-130.
-