

# INFORME FINAL - TEMPORADA DEL AGUJERO DE OZONO ANTÁRTICO 2024

***Gerardo Carbajal Benítez<sup>1</sup>, Héctor Ochoa<sup>2,3</sup>, Eduardo Luccini<sup>4,5</sup>,  
Facundo Orte<sup>6</sup>, Elián Wolfram<sup>1,6</sup> y Héctor Estévez Pérez<sup>7</sup>.***

- 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, 2025

### *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	5
1. Introducción.	6
2. CONDICIONES METEOROLOGICAS PREVALECIENTES	7
2.1 Temperaturas.	7
2.2 Área y volumen las NEP	9
2.3 Estabilidad del vórtice.	10
3. OBSERVACIONES DE OZONO	14
3.1 Observaciones Satelitales.	14
3.2 Estaciones en superficie.	14
3.2.1 Estación VAG USHUAIA.	15
3.2.2 Estación Antártica MARAMBIO.	16
3.2.3 Estación Antártica San Martin	18
3.2.4 Estación Antártica Belgrano II	20
4. EL AGUJERO DE OZONO	22
4.1 El área del agujero de ozono.	22
5. CONCLUSIONES	25
6. AGRADECIMIENTOS	26
7. BIBLIOGRAFÍA	27

## RESUMEN.

El presente informe, tiene por objetivo, establecer la evolución del Agujero de Ozono sobre la Antártida para el año 2024. La temperatura de la estratosfera mínima y zonal (50 – 90°S) en la primera parte del año han oscilado alrededor de la media hasta el mes de julio, donde se presenta un calentamiento súbito estratosférico (SSW) el cual produce un inicio tardío en los mecanismos de destrucción de ozono, producto de la inhibición y destrucción de las Nubes Estratosféricas Polares (NEP), en especial de las NEP Tipo II. Otros dos eventos de SSW tienen lugar en agosto y septiembre de menor intensidad que el primero, pero que también afectan a la formación y destrucción de este tipo de nubes pero en menor grado. Finalmente, una cuarto SSW afecta le vórtice polar en el mes de octubre, ya cuando las NEP's están cerca de finalizar su estadía en la Antártida. Los SSW se consideran no tan significativos, si bien el primer caso supera los 15°C y reduce los la intensidad de los vientos que circundan a la Antártida, no logran invertirlos. Estos SSW son principalmente generados por la intensa actividad de la onda Rossby que intensifican el flujo de calor que penetra en el vórtice polar y lo perturba. La actividad de onda, que incluso la amplitud de la onda 2, se incrementa y rompe record, lo que favorece la disminución del tamaño del agujero de ozono que, tiene un máximo absoluto el día 21 de septiembre con aproximadamente 26 millones de km<sup>2</sup>, ocupando el 30° lugar en el ranking de mayor a menor, en tanto que, el área media (7 septiembre al 13 de octubre) es 19,6 Millones de km<sup>2</sup>, ocupando el lugar del ranking 16, de mayor a menor. Siendo el menor de los agujero de ozono de los cinco últimos años.

**Palabras Claves:** Ozono, Estratosfera, Antártida, Destrucción, Química y Meteorología-

## ABSTRACT.

The present report aims to examine the evolution of the Ozone Hole over Antarctica in 2024. During the first part of the year, the minimum zonal stratospheric temperature (50 - 90 °S) fluctuated around the average until July, when a sudden stratospheric warming (SSW) occurred. This event led to a delayed onset of ozone destruction mechanisms due to the inhibition and destruction of Polar Stratospheric Clouds (PSCs), particularly Type II PSCs. In August and September, two additional SSW events took place, each less intense than the first but still influencing the formation and destruction of these clouds, albeit to a lesser extent. A fourth SSW impacted the polar vortex in October, occurring just as the PSCs were nearing the end of their presence in Antarctica. While these SSWs are not deemed highly significant—despite the first event exceeding 15°C and reducing wind intensity around Antarctica—they do not reverse the winds. These SSWs are primarily generated by intense Rossby wave activity, which enhances the heat flow entering the polar vortex and disrupts it. Notably, the amplitude of wave 2 has increased and broken records, favoring the expansion of the ozone hole. The ozone hole reached its absolute maximum on September 21, covering approximately 26 million km<sup>2</sup>, which places it 30th in size ranking from largest to smallest. The average area of the ozone hole from September 7 to October 13 was 19.6 million km<sup>2</sup>, ranking 16th in size, making it the smallest ozone hole observed in the past five years.

**Key Words:** Ozone, Stratosphere, Antarctica, Destruction, Chemistry y Meteorology

## 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 continua 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 2023, 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. Finalmente, el impacto de la radiación ultravioleta en la Antártida y las conclusiones.

## 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. 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 calentamiento se les llaman Calentamiento Súbito Estratosférico (SSW).

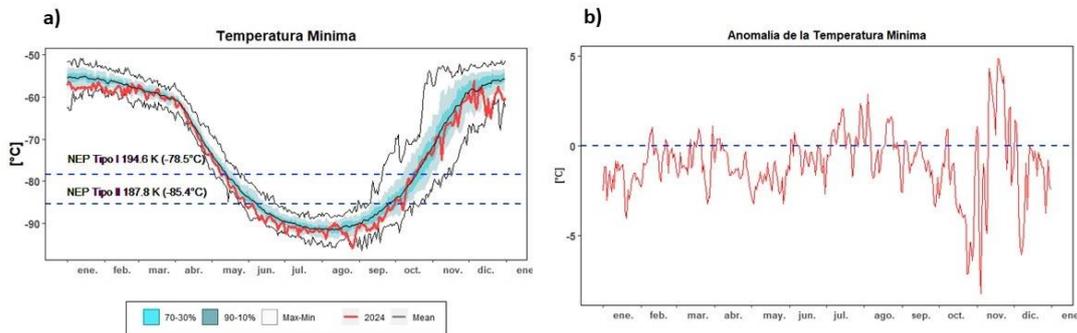
Las dos categorías de los SSW son los eventos de calentamientos mayores y menores, donde la inversión del gradiente de temperatura media zonal se dirige hacia los polos de 60°. Además, la inversión del viento zonal medio a una latitud de 60° y un nivel de presión de 10 hPa es una característica del SSW 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).

Haciendo un análisis de la temperatura mínima en la estratosfera (50hPa) del Hemisferio Sur (HS), dentro de la **figura 1** encontramos que, la temperatura en la estratosfera oscilan y se mantienen bajas en términos generales, esto durante los meses de enero hasta mediados de junio, donde se observa un incremento de la temperaturas, posteriormente a mediados de agosto se presenta un enfriamiento notorio. Después de mediados de agosto, las temperaturas caen y se enfría la estratosfera, consecuencia de poco flujo de calor desde el trópico (más adelante). Finalmente, después de esa caída de temperatura se invierte la situación y se observa una caída de temperatura hasta finales de año. 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. Algunos eventos de temperatura que superan su media se pueden observar, pero se explica mejor a la siguiente altura. 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. 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 ~15°C (1 de julio) y un segundo con un incremento de ~17°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 ~6,5°C. El tercer SSW tiene un incremento máximo de temperatura de ~7°C, durante la

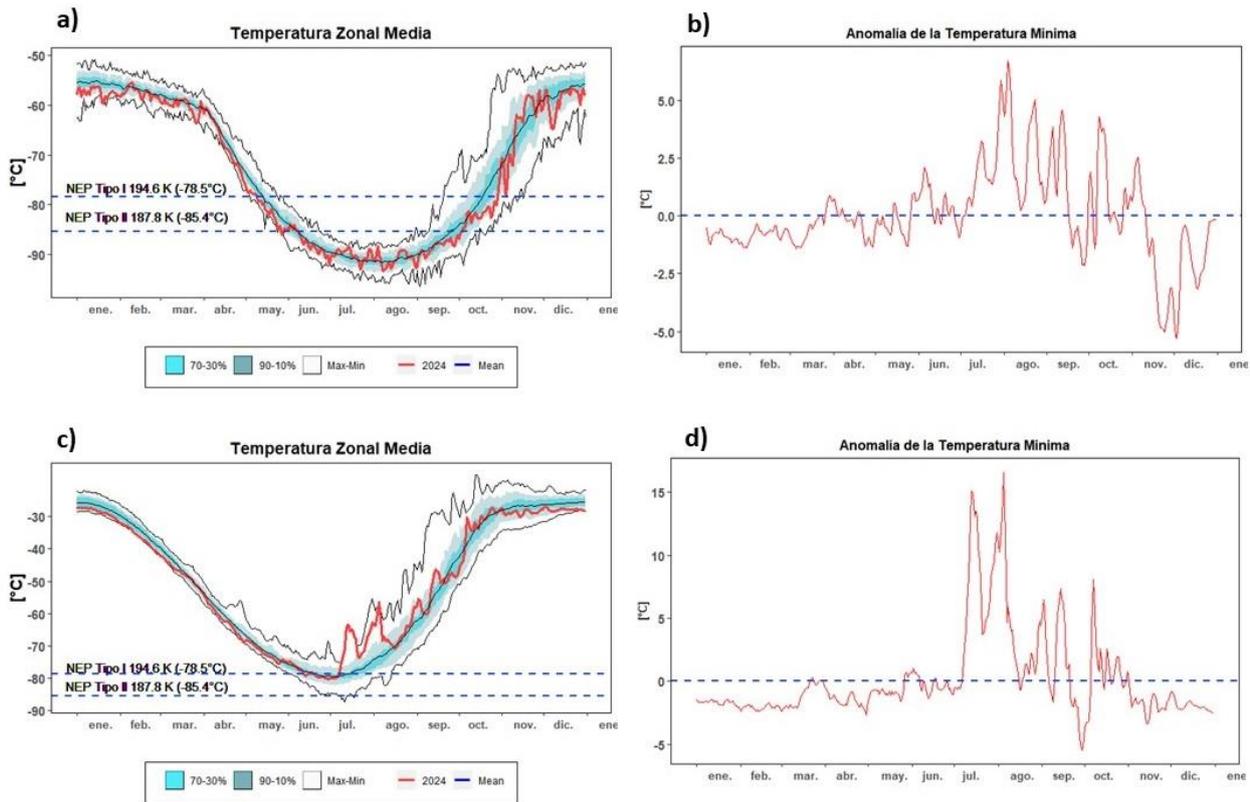
segunda semana de septiembre, en ambos casos repercutiendo, sobre todo en las NEP Tipo II donde se observa una pequeña caída. Finalmente, el cuarto SSW tiene lugar a inicios de octubre con un incremento de temperatura de aproximadamente 8°C mostrando un caída casi en su totalidad las NEP Tipo II.

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](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 2024, 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):** Anomalia de dicha Temperatura a lo largo del año 2024 (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 2024, 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 2023. En ambas (Izquierda): **b) y d)** Es la anomalia de las temperaturas a lo largo del año 2024 (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** se puede observar que el área y volumen de las NEP Tipo I (a,b) y Tipo II (c,d) ya finalizado su ciclo debido a que las temperaturas están por encima de los umbrales de formación. Las NEP tipo II, se diluyen a finales de septiembre. Mientras que, las NEP Tipo I de la misma manera, pero a finales de octubre.

En la **Tabla 1**, se muestra los valores máximos para el tamaño y formación de las NEP Tipo I y Tipo II. Observamos que el área de las NEP Tipo I presenta 2 fechas en la cual, el máximo son

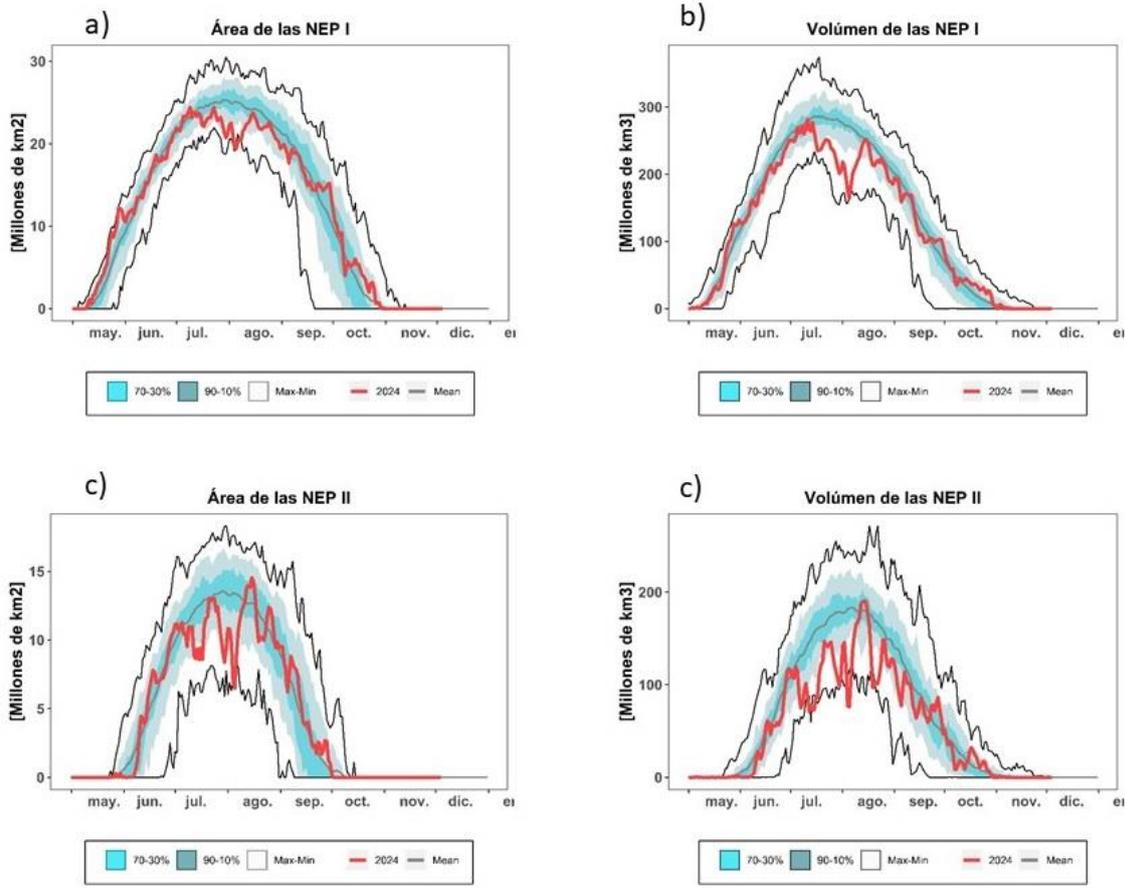
aproximadamente igual, la diferencia es que el 9 de julio el valor del presente año es mayor que su media, mientras que el 23 de julio es menor con respecto a su media para la misma fecha. En el mismo sentido, las NEP Tipo II se observa que el máximo del volumen se presenta en dos fechas, el 14 y 15 de agosto, días consecutivos, es decir que el máximo persiste y en ambos casos los valores son mayores con respecto a sus medias para esos mismos días. En términos generales, los valores de las NEP Tipo I y II de este invierno polar, superan a sus medias, pero las diferencias son pequeñas, salvo el día 23 de julio que el área es menor que su media.

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.

**Tabla 1.** Las unidades son: Área [Millones de km<sup>2</sup>] y Volumen [Millones de km<sup>3</sup>]. 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, 2024	NEP TIPO I			
	Área [Millones de km <sup>2</sup> ]	Área Media 1979 - 2023	Volumen [Millones de km <sup>3</sup> ]	Volumen Medio 1979 - 2023
09 – Julio	24,3	23,2	---	---
23 – julio	24,3	24,9	---	---
11 - julio			281,4	278,1
FECHA, 2024	NEP TIPO II			
	Área [Millones de km <sup>2</sup> ]	Área Media 1979 - 2023	Volumen [Millones de km <sup>3</sup> ]	Volumen Medio 1979 - 2023
15 – agosto	13,9	12,7		
14 – agosto	---	---	185,4	179,9
15 – agosto	---	---	185,4	179,4

Fuente de datos: [https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/temp\\_2023\\_MERRA2\\_SH.html](https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/temp_2023_MERRA2_SH.html)



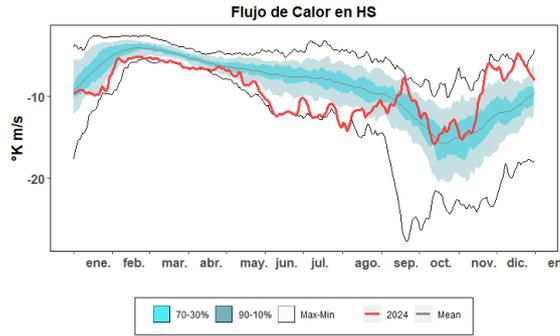
**Figuras 3.** Área (a,c) y Volumen (b,d) de las nubes estratosféricas polares (NEP) Tipo I (arriba) y Tipo II (abajo), sobre la región Antártica. La línea color roja, representa la el año 2024. Las líneas externas y central negras, son los valores medias, máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2023. Las líneas sombreadas en azul-verde de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90% para el mismo periodo.

### 2.3 ESTABILIDAD DEL VÓRTICE

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 4** se muestra el desarrollo del flujo de calor. Lea el subtítulo para mayores detalles de cómo interpretar el gráfico.

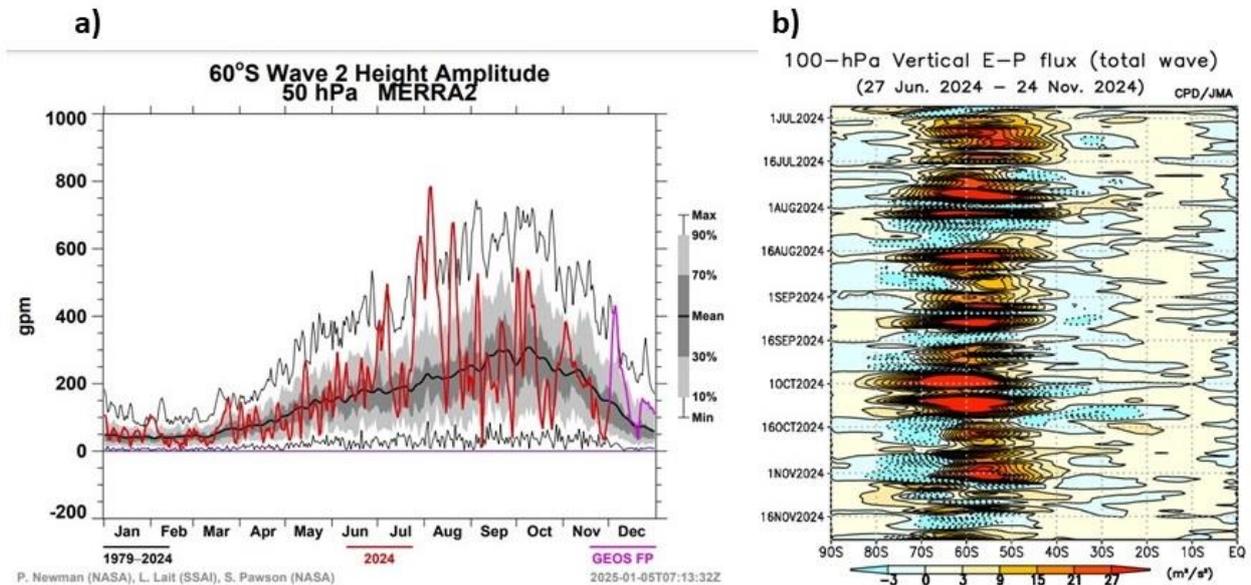
Se puede observar que, durante el mes mayo, junio julio y agosto, hay un movimiento grande en cuanto al flujo de calor, que perturba el vórtice polar, alcanzando a valores históricos. En el mes de octubre una nueva perturbación pero dentro de la normalidad para la estación del año.

Fuente de datos: [https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/flux\\_2023\\_MERRA2\\_SH.html](https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/flux_2023_MERRA2_SH.html)



**Figura 4.** Serie de tiempo del flujo de calor meridional promediado sobre la región entre 45-75°S. La curva roja muestra los datos para 2024. 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 – 2023. Las líneas sombreadas en azul-verde de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90% para el mismo periodo.

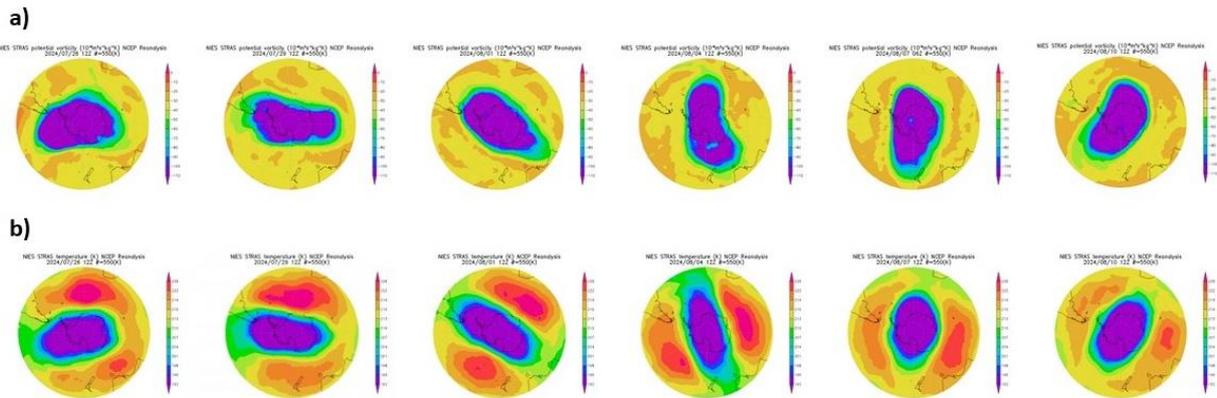
En la **Figura 5 (a)** se observa la actividad de la onda 2, donde su amplitud supera ampliamente los máximos históricos desde que se tiene registro, durante finales de julio e inicios de agosto, produciendo un SSW que estabiliza el vórtice polar y lo deforma. Esta situación, también produce que la inhibición destrucción de las NEP I y II anticipada a la estrada de radiación solar a la Antártida debido a que aún está en invierno austral. **(b)** Muestra el flujo vertical Eliassen – Palm (Onda total) donde se observa la fuerte actividad a que coincidente con aumentos de temperatura.



**Figura 5.** Actividad de las ondas atmosféricas que afectan el vórtice polar. **a)** Es la altura de la amplitud de la onda 2 a 50 hPa. **(b)** El flujo vertical Eliassen-Palm de onda total que se construye en la agencia de meteorología Japonesa.

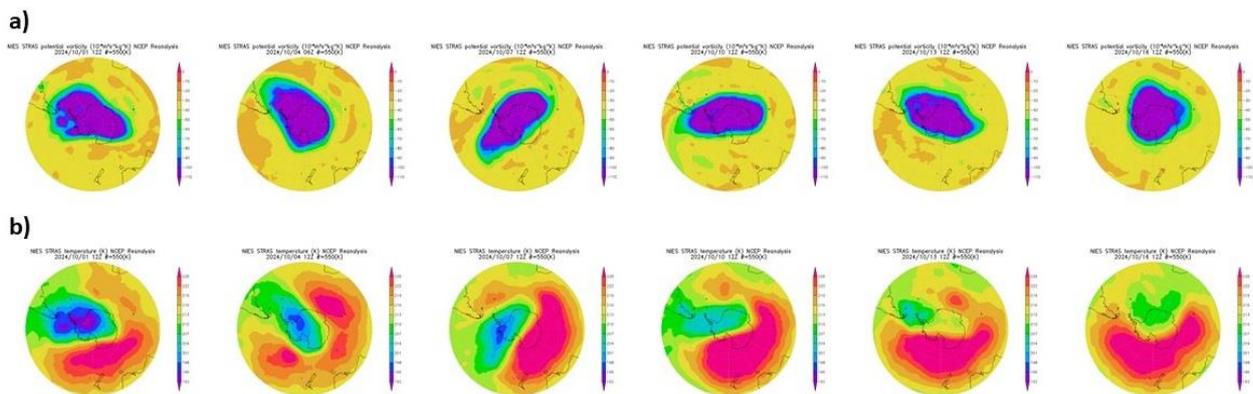
En la **figura 6 (a)** se observa la deformación y elongación del vórtice polar (PV) debido a la interacción con la intensidad de las ondas de Rossby, generando el SSW. A modo de ejemplo se muestra el día 26 de julio al 10 de agosto (~15 días de actividad). **(b)** Se muestra que en los

laterales y por fuera de la elongación del vórtice polar, se forman zonas de temperatura alta, que se van disipando cuando la intensidad de las ondas Rossby van disminuyendo.



**Figura 6.** 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 26 de julio y finalizando el día 10 de agosto del 2024.

En la **figura 7** nuevamente se presenta actividad de onda Rossby se presenta aproximadamente el 1 de octubre y finaliza el 16 de octubre (16 días) aunque de intensidad mucho más baja que la primera, ya cuando los procesos químicos de la destrucción de ozono ya están presentes, de tal manera que el impacto no es tan importante que la primera. Otra característica es el impacto en la temperatura, que al inicio del evento se forma un centro con menor temperatura, situación que se diluye y aumenta la temperatura dentro del vórtice, lo que hace es que diluye tanto el área como el volumen de las NEP I que prevalecen en ese momento.



**Figura 7.** 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](https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/Data_services/met/ann_data.html)

### 3. OBSERVACIONES DE OZONO

#### 3.1 Observaciones Satelitales

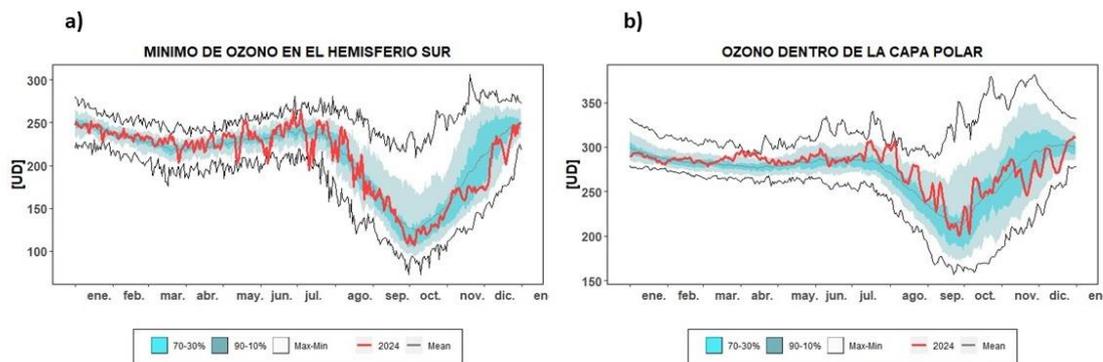
Al inicio de la primavera austral, el sol empieza a retornar a la Antártida, ya que finaliza la noche polar. Tanto los datos satelitales, los datos de superficie y sondeos con globos muestran que el agujero de ozono, ya inició su formación. A la fecha de hoy, ya se observa la destrucción de ozono en la estratosfera a través de los compuestos destructores de ozono (ODS) albergados en las NEP.

La **Figura 8 (a)** se muestra la columna de ozono mínimo en Hemisferio Sur (HS) y **(b)** el Ozono dentro de la capa polar, ambos para el año 2024, tal como han sido medidas por el TOMS, OMI y OMPS, en comparación con su media del periodo 1979 a 2023.

El grafico del mínimo de ozono **(a)** muestra que la primera parte de año oscila alrededor de la media, hasta inicios de mayo (noche polar) después se observa una gran amplitud entre la perdida y ganancia de ozono, situación que se mantiene a inicios del mes de agosto cuando se tiene el evento de SSW.

El ozono, dentro de la capa polar **(b)** durante gran parte del año se observan valores por encima de su media histórica denotando que ha habido poca pérdida de ozono dentro del vórtice polar.

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



**Figura 8. (a)**, mínimo diario de la columna total de ozono en el hemisferio sur. **(b)**, es la columna total de ozono dentro de la capa polar. En ambos casos, la línea roja muestra el año 2024, la línea gris representa la media del periodo 1979 a 2022. 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.

#### 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),

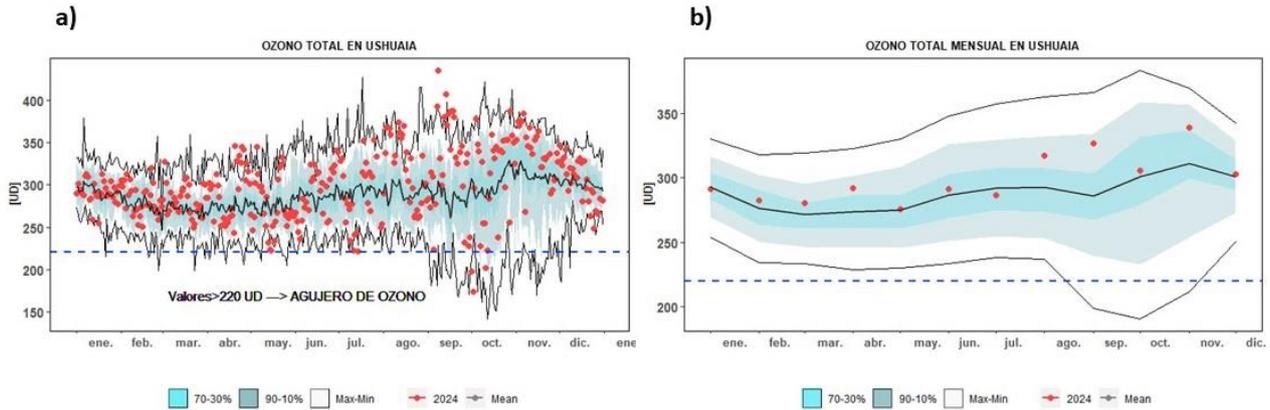
dependientes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Ozonosondeos y mediciones del espectrofotómetro Brewer de la Estación Antártica Belgrano II (77°52'28"S 34°37'37"O), medidas con Espectrofotómetro Brewer de la Estación Antártica San Martín (68°07'48" S, 67°06' 08" O), ambos laboratorios bajo la dependencia de la Dirección Nacional del Antártico/Instituto Antártico Argentino (DNA/IAA).

### 3.2.1. Estación VAG Ushuaia.

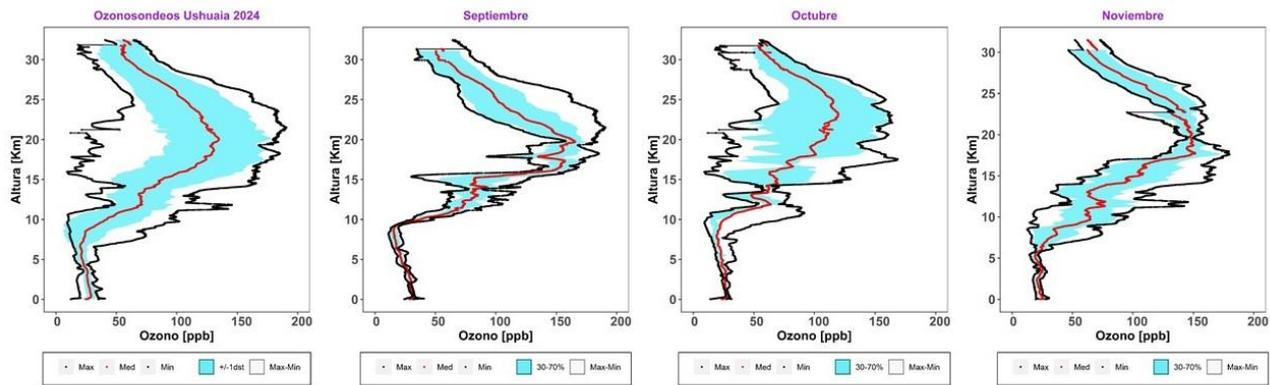


El espectrofotómetro Dobson (D131) mide todos los días y en la **Figura 9**, se muestra la evolución diaria (**a**) y mensual (**b**) de la columna total de ozono hasta el 26 de noviembre del año 2024, comparado con su media histórica (1994-2023). Los datos diarios de ozono total, son muy acordes con los datos de ozono mínimo y están asociados a la temperatura en la estratosfera. Después del SWW los datos en su mayoría están por arriba de su media debido a que el vórtice polar funciona como una barrera donde no permite intercambio, de tal manera que la parte fuera del vórtice es más caliente que dentro del mismo. La amplitud en cuanto a los valores es notorio, son 3 veces que al agujero de ozono está por encima del sur de la Patagonia, mientras que valores máximos que rebasan 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 la **Figura 10** se muestra los perfiles de ozono para el año 2024 (17 sondeos), después por mes. 4 ozonosondeos durante **septiembre**, el cual es de poca variabilidad, debido a que el agujero de ozono no pasa por la ciudad, durante los lanzamientos, además de estabilidad fuera del vórtice polar, acumulando las parcelas ópticamente ricas en ozono sobre la estación. En el mes de **octubre**, son 6 lanzamientos y en los cuales el día 11 de octubre pasa el agujero de ozono, a eso se debe la gran variabilidad de ozono en la estratosfera, posteriormente la masa de aire enriquecida con ozono continua por encima de Ushuaia. Finalmente, **noviembre** se caracteriza por muy poca variabilidad de ozono, debido a que el agujero de ozono se ha reducido más que lo normal y no alcanza a pasar por el sur de la Patagonia.



**Figura 9.** 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 2024. La línea negra central corresponde la media del periodo 1979 a 2023 y las líneas exteriores son los máximos y mínimos para el mismo periodo.



**Figura 10.** 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 atmosfera. Y la curva roja es el perfil de la temperatura en [°C].

### 3.2.2 Estación Antártica MARAMBIO.



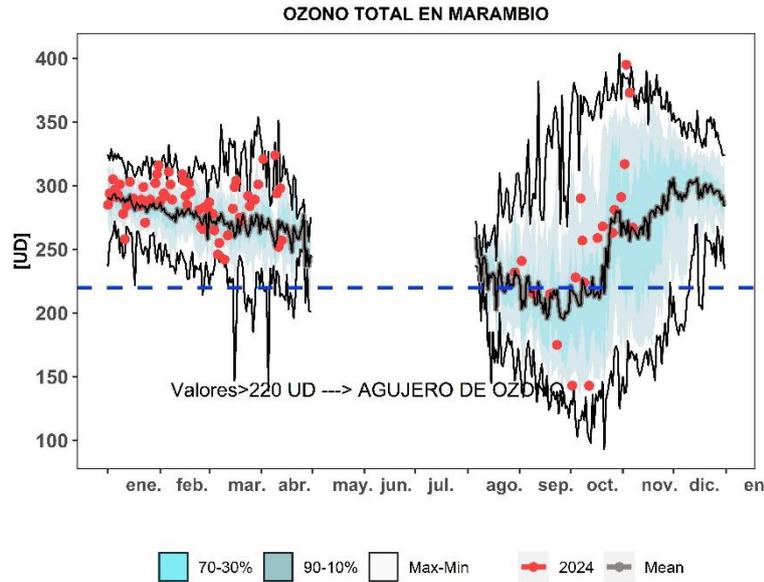
La estación Antártica Marambio se encuentra en la península Antártica y forma parte de la red de

medición de ozono total de programa VAG de la OMM. El espectrofotómetro Dobson (#D099) 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, caída de Nieve, etc. Este año inicia tarde las mediciones debido a las inclemencias del tiempo, pero actualmente ya están regularizadas dichas mediciones.



**Foto:** Técnicos Matías Ignacio Martorano y Evelyn de los Ángeles Lucero.

A mediados del mes de agosto, reinician las mediciones diarias y se observa que en el gráfico diario de la **Figura 11**, que la primera parte del año, hasta el mes de abril, los valores del año oscilan alrededor de la media del periodo 1986 a 2023 y en tres casos se supera los valores máximos históricos en el mes de marzo. La segunda parte del año, cuando la noche polar termina, se retoman las mediciones y se observa que, el agujero de ozono, ya se encuentra en la Península Antártica. Después del calentamiento súbito estratosférico que deforma al vórtice polar y al agujero de ozono, éste deja de estar sobre la Estación Marambio y se observa valores con una variabilidad alta, es decir cantidades por debajo y por arriba por del umbral de 220 UD, esta situación se puede explicar debido a la inestabilidad del vórtice durante septiembre que, se deforma y en ocasiones pasa por la parte norte de la Península Antártica y otras no, específicamente en la estación. Posteriormente, en octubre y lo que va noviembre valores muy altos, e incluso uno que supera el máximo histórico (3 de noviembre). Esta situación es debido a que el agujero de ozono es más pequeño de lo normal y que la mayor parte del tiempo se encuentra desplazado hacia el océano Índico y no pase por la Península Antártica.



**Figura 11.** Medición de ozono total diario con el espectrofotómetro Dobson (#099) en la estación Antártica Marambio. Los puntos rojos representan las mediciones de ozono total para el año 2024. La línea negra central corresponde a la media del periodo 1986 a 2023 y las líneas exteriores son los máximos y mínimos para el mismo periodo.

### 3.3.3. Estación Antártica San Martín.



La estación Antártica San Martín se encuentra en la península Antártica San Martín (68°07'48" S, 67°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 **EUBREUNET**. El Espectrofotómetro Brewer se encuentra bajo un convenio entre el **Instituto Antártico Argentino (IAA)** y el ex **Comando Antártico de Ejército**.

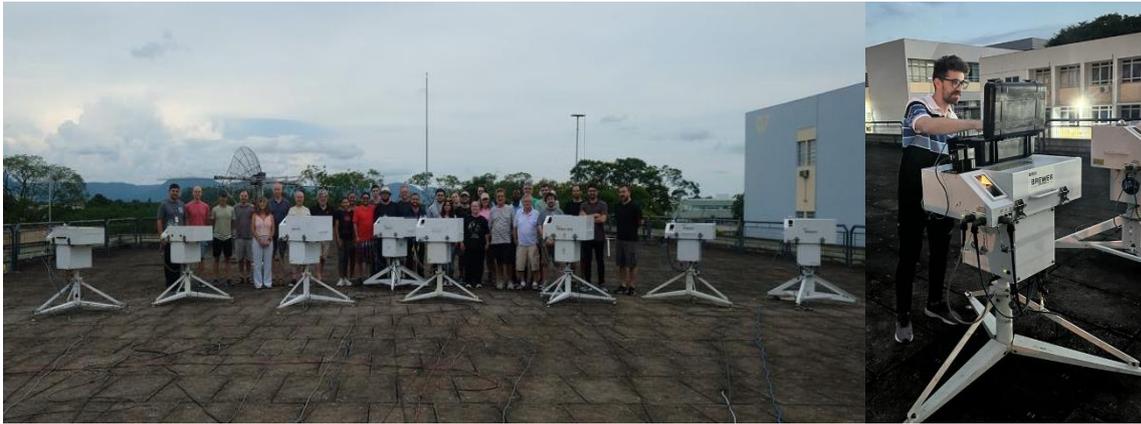
El espectrofotómetro Brewer mide todos los días, excepto durante el invierno polar (abril a septiembre) o debido a situaciones complicadas que impidan la medición, como vientos fuertes, lluvia, etc. Actualmente se no ha iniciado las mediciones para el monitoreo del agujero de ozono.

El espectrofotómetro Brewer #162 participó este año de la intercomparación realizada desde el 19 de febrero al 8 de marzo en Santa María, Rio Grande do Sur (RS, Brasil). Esta fue la primera campaña Iberoamericana de calibración e intercomparación de instrumentos Brewer para la medida de ozono total y radiación solar ultravioleta. La misma fue organizada por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, España) y la Universidad Federal de Santa María (UFSM,

Brasil), con el apoyo de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

El Brewer #162 fue retirado en marzo de 2023 de base San Martín, participó de la Intercomparación y volvió a la base antártica San Martín durante el mes de abril de 2024. El mismo fue calibrado por el Dr. Alberto Redondas y el Téc. Nazareno Tintes quién lo operó durante la visita a Brasil.

En las imágenes siguientes podemos ver el despliegue de Brewers en las instalaciones de la UFSM.



*Test de lámpara y mantenimiento diario del espectrofotómetro Brewer de Base San Martín por el personal técnico del IAA Ezequiel Peschiera y Nahuel Solís Etchegoin (2020).*



ín.

*Montaje del espectrofotómetro Brewerr #162 y despliegue auroral en Base San Martín. El personal técnico del IAA Ing. Federico Daniele y Téc. Rodrigo De Iulis (2024).*

### 3.3.4 Estación Antártica Belgrano II.



*Operación de Espectrofotómetro Brewer, preparación y lanzamiento de ozonosonda en Base Belgrano II por los Técnicos del IAA, Rodrigo Fornerón, Agustín Coto y Lautaro Odellii (2024).*

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 12** se muestran los resultados del monitoreo a lo largo del año 2024. La primera parte del año, más bajos que la media histórica del periodo 1992-2023, correspondiente a una estratosfera fría y muy acorde con la pérdida de ozono dentro de la capa polar en la **figura 4 (b)**. Al reiniciar las mediciones en el mes de septiembre, cuando inicia la primavera austral y hasta finales de octubre los valores están por debajo de los 220 UD, es decir el agujero de ozono está presente por encima de la estación. A finales de octubre, los valores aumentan y el agujero de ozono se debilita debido a un segundo SSW en octubre, presentando valores muy cercanos a los máximos históricos (1992 - 2024). Los valores mensuales **(b)** muestran principalmente que después del verano son bajos pero muy cercanos a su media histórica.

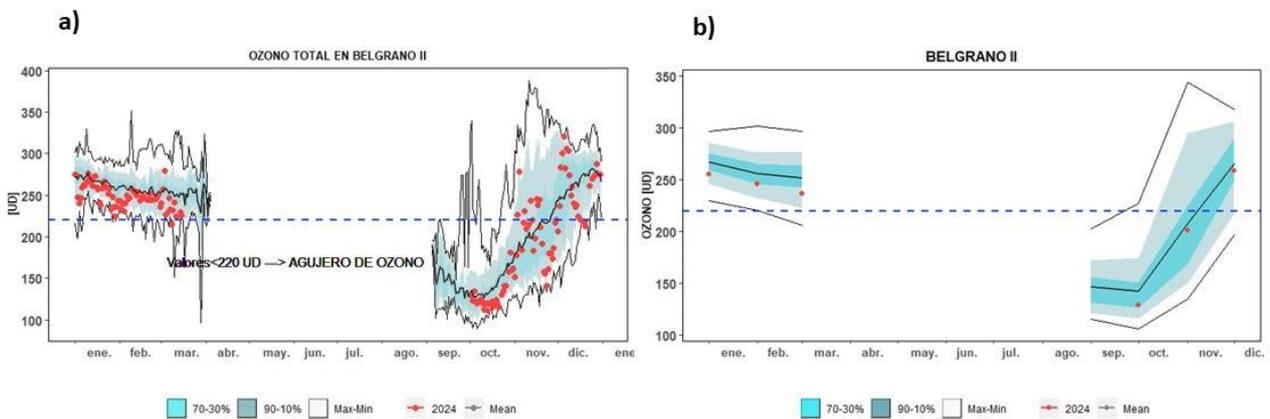
Los ozonosondeos que se hacen en esta base, son realizados a través del convenio de Colaboración Científica entre la Dirección Nacional del Antártico - **Instituto Antártico Argentino** (IAA) y el instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial (INTA) de España desde 1994, donde se inicia la colaboración con el monitoreo de la capa de ozono y el NO<sub>2</sub> 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.

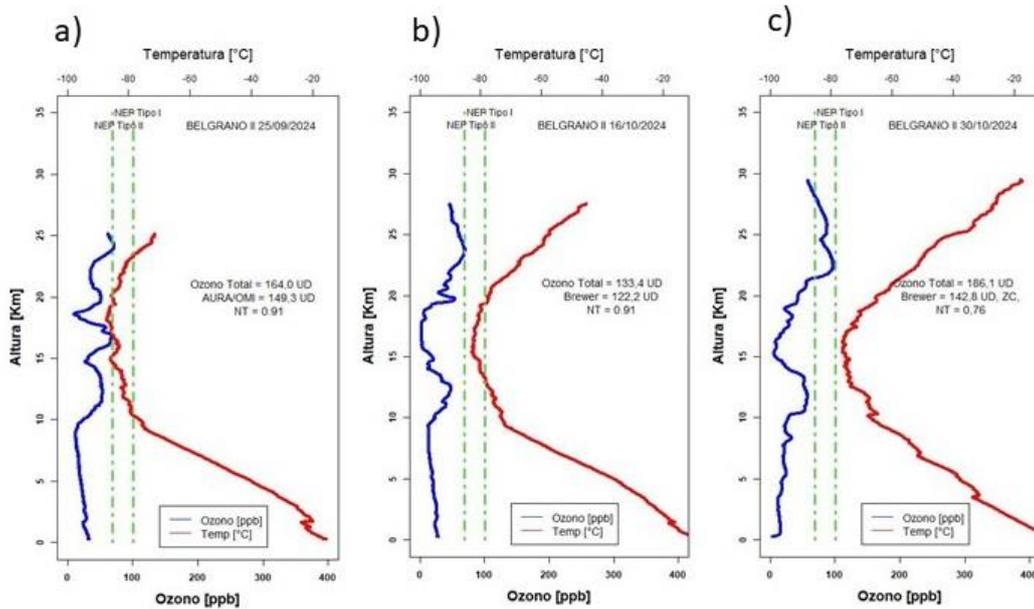


*Operación de Espectrofotómetro Brewer, preparación y lanzamiento de ozonsonda en Base Belgrano II por los Técnicos del IAA, Guillermo Maidana, Ezequiel Molina y Pablo Signorelli (2020).*

En la **Figura 13** la evolución del agujero de ozono se muestra a través de los ozonondeos, en estos se muestra el perfil de ozono y de la temperatura. El día 25 de septiembre (a), 16 (b) y 30 (c) de octubre, es notorio que el agujero de ozono está presente por arriba de la estación, aun cuando el día 25 no llega el globo hasta una altura óptima, si alcanza la altura por arriba de la capa de ozono. Los perfiles de temperatura muestran claramente el calentamiento de la estratosfera, en (a) está por debajo del umbral de la formación de NEP tipo II, mientras que en (b) las temperaturas alcanzan solo para la formación de NEP Tipo I. para (c) ya no habría formación de NEP debido a que las temperaturas llegan a estar por arriba del umbral.



**Figura 12.** 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 2024. La línea negra central corresponde la media del periodo 1992 a 2023 y las líneas exteriores son los máximos y mínimos para el mismo periodo.



**Figura 13.** 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 atmósfera. Y la curva roja es el perfil de la temperatura en [°C]. El Valor NT se relaciona con el Factor de Normalización (NT).

## 4. El Agujero de ozono

### 4.1 El área del agujero de ozono

En la **figura 14** 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. Cuatro son 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 COPERNICUS tiene un máximo de 21,9 millones de km<sup>2</sup> (KAMS/C3S), en tanto que la NASA reporta un máximo de 22,4 millones de km<sup>2</sup> (TOMS + OMI + OMPS). El portal TEMIS reporta aproximadamente 22,1 millones de km<sup>2</sup> (MSR2) y finalmente, la NOAA muestra un agujero de ozono que pasa los 20,9 millones de Km<sup>2</sup> (NOAA-20 OMPS).

Fuente de datos:

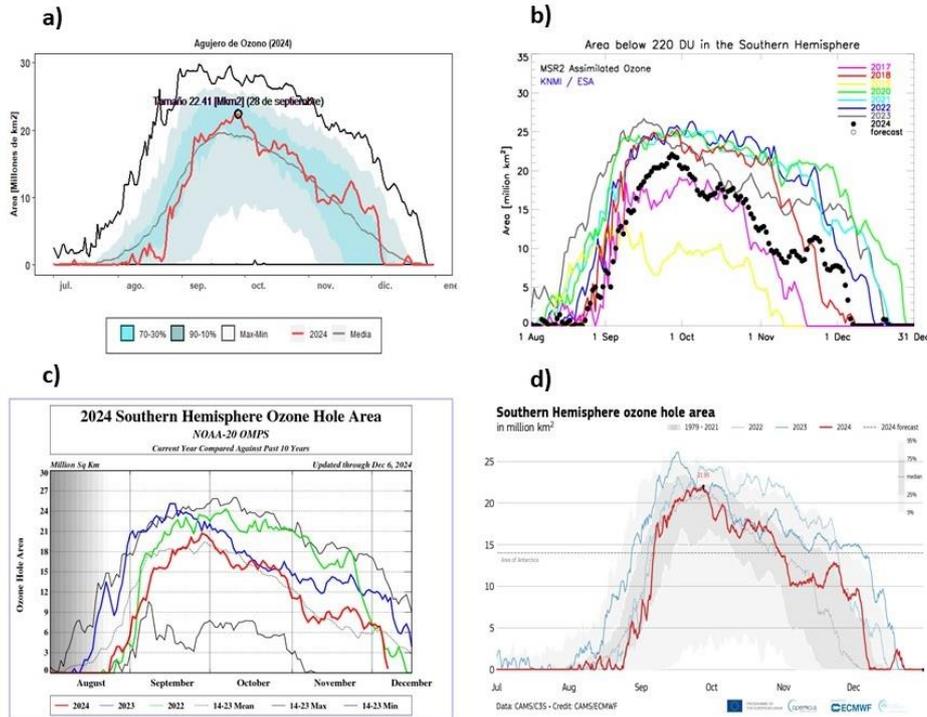
[https://www.temis.nl/protocols/o3hole/o3\\_size.php?date=20230922&lang=0](https://www.temis.nl/protocols/o3hole/o3_size.php?date=20230922&lang=0)

<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/monthly/SR.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](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar/gif_files/ozone_hole_plot_N20.png)

Después de 2 calentamientos súbitos estratosféricos menores que ayudo a que éste no creciera demasiado el agujero de ozono. En la **figura 15** 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 30°** de 45 años de medición, considerando de menor a mayor, más pequeño que los últimos 5 años. b) Mientras que el área promedio, ocupa el lugar del **Rankin 16°**, de menor a mayor, siendo este promedio menor al de los últimos 5 años.



**Figura 14. Área del Agujero de Ozono (millones de km<sup>2</sup>). 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.**

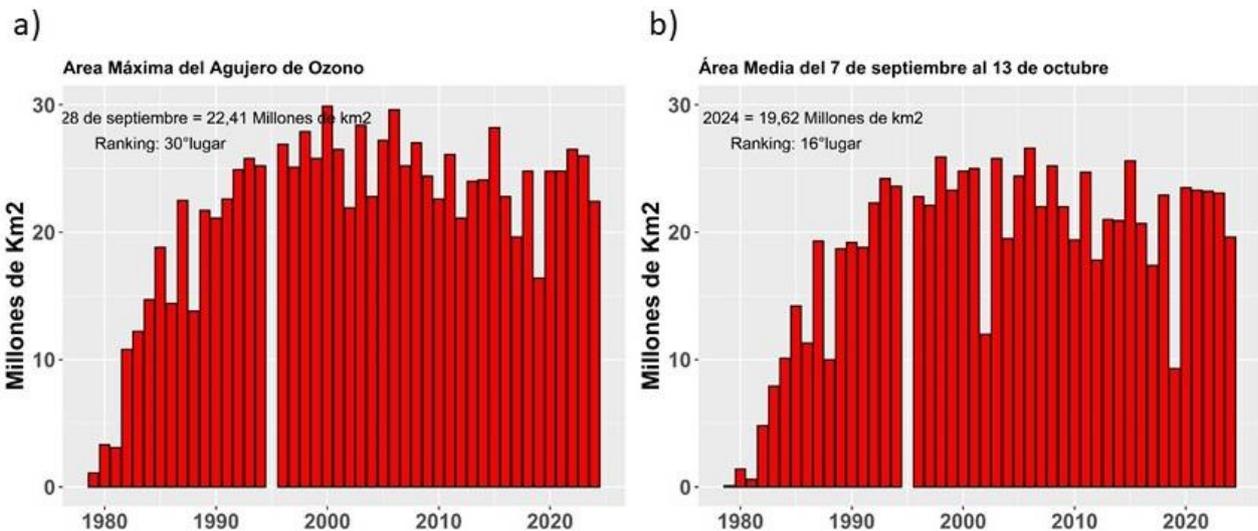
La **figura 15**, muestra año con año la evolución del agujero de ozono desde 1979 al 2024. Para el caso de los máximos absolutos (a) se observan:

- 1) Una tendencia definida a aumento del tamaño del agujero de ozono desde 1979 hasta alrededor del 2000. Esta tendencia a aumentar ha sido de 1,217 millones de km<sup>2</sup> por año.
- 2) Una tendencia hacia la recuperación del ozono y reducción del agujero de ozono para los años de 2006 al 2019 de 0,5031 millones km<sup>2</sup> por año.
- 3) Desde el año 2006 que se presenta uno de los agujeros de ozono más grandes hasta el 2024, se observa una recuperación de 0,151 Millones de Km<sup>2</sup>, con una reducción del ~ -16% para este periodo.

- 4) Desde el año 2020 hasta el 2023 los cuatro agujeros de ozono han sido muy similares y no se observa una tendencia definida, pero el año 2024 sufre una reducción de 3,45 millones de  $\text{Km}^2$  (~-15%) Esto indica una pequeña recuperación del ozono sobre la Antártida.
- 5) El año 2024 se presenta el máximo absoluto el día 21 de septiembre con aproximadamente 26 millones de  $\text{km}^2$ , ocupando el 30° lugar en el ranking de mayor a menor.

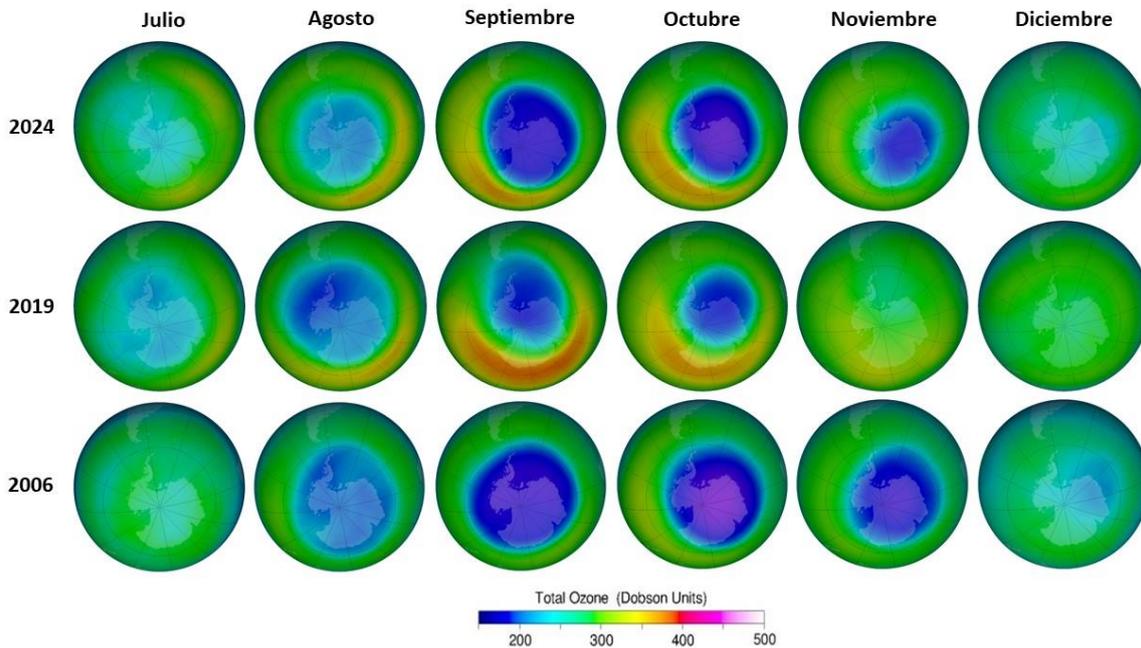
Para el caso de las medias del agujero de ozono **(b)** se observa:

- 1) Para el periodo de 1979 al 2006, la tendencia aumenta más lenta que los valores máximos absolutos, es decir 0,8844 millones de  $\text{km}^2$ .
- 2) Para el periodo de 2006 al 2019, se observaba una recuperación de ozono y reducción del agujero de ozono de 0,5967 millones de  $\text{km}^2$  por año, muy similar a los máximos absolutos.
- 3) Para el periodo 2006 al 2024, nuevamente una pequeña reducción del agujero de ozono de 0,164 Millones de  $\text{km}^2$ .
- 4) Los 4 años (2020 al 2023) han sido muy parecidos y con muy poca variación, pero en 2024 se observa una reducción respecto al promedio de esos cuatro años de 3 ,667 Millones de  $\text{km}^2$  (~-15%).
- 5) Para el año 2024, el tamaño del agujero de ozono presenta una área media de 19,6 Millones de  $\text{km}^2$ , ocupando el lugar del ranking 16, de mayor a menor.



**Figura 15.** Evolución del Área del Agujero de Ozono (millones de  $\text{km}^2$ ) desde 1979 a 2024. (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 16**, 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 2024, 2019 y 2006. Comparando el 2024 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 decaer en el mes de noviembre, aunque en el año 2006 persiste en tamaño y profundidad. Poca destrucción de ozono en diciembre a comparación del 2006 que aún prevalece dicha destrucción de ozono.



*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 2024:

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

## 5. CONCLUSION

Las condiciones meteorológicas de la estratosfera y el vórtice, ponen las condiciones físicas para su desarrollo, modulando su crecimiento, mientras que las condiciones químicas, a través de las NEP, inician con la destrucción del ozono total antártico. Para este año 2024 se presenta un agujero de ozono más pequeño que los anteriores 4 años, que se modula principalmente por 4 SSW. Esta temporada se caracteriza principalmente por:

- a) La actividad de destrucción de ozono es tardía, es decir el agujero de ozono tiene un retraso en su formación asociado al primer SSW.
- b) 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  $8^{\circ}\text{C}$  mostrando un caída casi en su totalidad las NEP Tipo II.
- c) Estos SSW que se observan, son principalmente debido a una gran actividad de ondas Rossby que impactan y deforman al vórtice polar que circunda la Antártida. Incluso, la amplitud de la onda 2, presenta valores tan altos que no tiene precedentes, por lo menos desde el inicio del monitoreo del agujero de ozono.
- d) El año 2024 se presenta el máximo absoluto el día 21 de septiembre con aproximadamente 26 millones de  $\text{km}^2$ , ocupando el 30° lugar en el ranking de mayor a menor. Mientras que el área media es de 19,6 Millones de  $\text{km}^2$ , ocupando el lugar del ranking 16, de mayor a menor.
- e) El agujero de ozono, se cierra según el monitoreo y las mediciones satelitales, el día 19 de diciembre, cuando la media historia mara que el cierre es el 20 de diciembre.

## 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 **Prof. Juan Daniel Agüero y Osvaldo Blanco**, por el aporte y control de los datos históricos de la Estación Antártica Marambio.

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

Se agradece a los observadores Antárticos del Pabellón Científico de Marambio; **Sr. Daniel Ríos y Gabriel Agustín Arias y Gustavo Copes.**

Se agradece a los observadores Antárticos de San Martín del Laboratorio LASAN: **Ing. Rodrigo Azpilcueta**

y al Ing. Alvaro Martín Errasquin.

Se agradece a los observadores Antárticos de Belgrano II del Laboratorio LABEL; Ing. **Heraldo Ivan Vilca**,  
Téc. **Sebastian Firpo** y al Téc. **Santiago Kyanka**.

## 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.
- 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.
-