



Servicio  
Meteorológico  
Nacional

# BOLETIN 4 - TEMPORADA DEL AGUJERO DE OZONO 2024

***Gerardo Carbajal Benítez<sup>1</sup>, Héctor Ochoa<sup>2,3</sup>, Eduardo Luccini<sup>4,5</sup>,  
Facundo Orte<sup>6</sup>, Héctor Estévez Pérez<sup>7</sup>, y Elián Wolfram<sup>1,6</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. Red Solarimétrica del Instituto de Geofísica, UNAM, México.*

Octubre, 2024



Ministerio de Defensa  
Presidencia de la Nación

### *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	8
2.3 Estabilidad del vórtice.	10
2.4 Activación química del vórtice	12
3. OBSERVACIONES DE OZONO	14
3.1 Observaciones Satelitales.	14
3.2 Estaciones en superficie.	13
3.2.1 Estación VAG USHUAIA.	15
3.2.2 Estación Antártica Marambio	17
3.2.3 Estación Antártica San Martín	18
3.2.4 Estación Antártica Belgrano	20
4. EL AGUJERO DE OZONO	22
4.1 El área del agujero de ozono.	22
5. CONCLUSIONES	24
6. AGRADECIMIENTOS	24
7. BIBLIOGRAFÍA	24

## RESUMEN.

El presente Boletín 4, tiene por objetivo establecer, la evolución del Agujero de Ozono hasta el momento sobre la Antártida para el año 2024. El vórtice polar se fortalece y entra en fase positiva, lo que genera un aumento en las temperaturas mínimas y zonales, pero estas ya no alcanzan el umbral para producir Nubes Estratosféricas Polares, de tal manera que solo hay remanente de Cloro en la estratosfera, que continua destruyendo al ozono. La dinámica del vórtice polar se debe al poco flujo de calor desde la troposfera hacia la estratosfera, consecuencia de la baja actividad de ondas planetarias 1, 2 y 3. A esta fecha se puede ya establecer la magnitud del agujero de ozono que alcanza un máximo de 22,41 millones de  $\text{km}^2$ , en tanto que el área media del periodo 7 de septiembre al 13 de octubre es de 19,62 millones  $\text{km}^2$ , ocupando en el Rankin de 45 años los lugares 31° y 27°, respectivamente, siendo menor que los últimos 4 años.

**Palabras Claves:** Ozono, Estratosfera, Antártida, Destrucción, Calentamiento Súbito Estratosférico Química y Meteorología.

## ABSTRACT.

The current Bulletin 4 aims to document the evolution of the Ozone Hole over Antarctica for the year 2024. The polar vortex has strengthened and entered a positive phase, leading to an increase in minimum and zonal temperatures. However, these temperatures have not reached the threshold necessary to produce Polar Stratospheric Clouds. As a result, only a remnant of Chlorine remains in the stratosphere, which continues to degrade the ozone layer. The dynamics of the polar vortex are influenced by the low heat transfer from the troposphere to the stratosphere, a consequence of diminished activity from planetary waves 1, 2, and 3. As of now, the magnitude of the ozone hole has reached a maximum of 22.41 million  $\text{km}^2$ , with an average area of 19.62 million  $\text{km}^2$  for the period from September 7 to October 13. This places the ozone hole at 31st and 27th positions, respectively, in the 45-year ranking, and it is smaller than the holes recorded in the last four years.

**Key Words:** Ozone, Stratosphere, Antarctica, Destruction, Sudden Stratospheric Warming, 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. 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, 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, debido al aumento de la radiación ultravioleta y algunos otros daños en la ecología. Por lo tanto, los encargados de la formulación de políticas internacionales concluyeron que se necesitaba una estrategia cautelosa de protección del ozono y 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 CFC. El informe de Farman y sus colegas sobre la pérdida de un tercio de la capa de ozono primaveral 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 CFC's 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 CFC's 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

El ozono desempeña el papel más importante en el acoplamiento entre la química, la radiación y los procesos dinámicos. Por lo tanto, las fluctuaciones dinámicas y las reacciones químicas del ozono estratosférico Antártico, están sujetas a ambos eventos (Lubis et al., 2017; Oehrlein et al., 2020; Friedel et al., 2022). Un efecto relacionado e inesperado, 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 y recientemente es notable el corrimiento de 2° de latitud de la corriente en chorro hacia el polo. Esta situación produce 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 (Banerjee, et al., 2022).

La estratosfera polar durante el invierno, se caracteriza por un fuerte vórtice polar frío con vientos proveniente del oeste. Debido a la diferente distribución de los continentes y el mar en los hemisferios norte y sur, se generan en la troposfera ondas a gran escala con longitudes de onda de varios cientos de kilómetros. Estas ondas se propagan hacia arriba, alcanzando la estratosfera, perturbando o debilitando el vórtice polar, que afecta la dinámica y concretamente a la formación del agujero de ozono.

La ocurrencia de algunos eventos, de calentamiento súbito estratosféricos (en inglés, SSW) a mediados del invierno, se atribuye principalmente al impacto del vórtice polar estratosférico por medio de las ondas planetarias que se propagan desde la troposfera hacia la estratosfera (Holton, 1980; Qin et al., 2021; Baldwin et al., 2021). Un SSW es un fenómeno que se caracteriza por un rápido aumento de las temperaturas en la estratosfera de los polos. Dicha temperatura aumenta más de algunas docenas de grados en unos pocos días, durante el invierno, este fenómeno es muy común en el Hemisferio Norte y poco común en el Hemisferio Sur, aunque la frecuencia se está intensificando.

En algunos casos, el chorro polar nocturno se debilita e incluso se invierten los vientos del oeste y aparecen vientos del este durante el calentamiento. El calentamiento se denomina "calentamiento menor" cuando la temperatura polar aumenta más de 25 grados, en un período de una semana o menos, en cualquier nivel de la estratosfera. Un "calentamiento mayor" se considera si, la temperatura media zonal aumenta hacia los polos desde los 60 grados de latitud y los vientos medios zonales promediados a 60 grados de latitud se vuelven del oeste al este a una altura de 10 hPa ( ~32 km)

Varios estudios de caso de eventos SSW, que utilizan una combinación de modelos químico-climáticos y datos de reanálisis, enfatizan las anomalías del ozono estratosférico, que están influenciadas por la posición y la fuerza del vórtice polar y el procesamiento químico a diferentes condiciones dinámicas. Salby y Callaghan (2007) utilizaron un modelo tridimensional de dinámica y fotoquímica para investigar el ozono polar enriquecido durante la primavera a través de la mezcla isoentrópica por ondas planetarias y eliminaron gran parte del aparente agotamiento del ozono. Thiéblemont et al., (2019) confirmaron el momento de FSW afectado por el ozono y los gases de efecto invernadero a través de modelos acoplados de química y clima de WACCM. Lawrence et al. (2020) utilizaron MERRA-2 y el reanálisis de 55 años de la Agencia Meteorológica Japonesa (JRA-55) para mostrar el agotamiento del ozono y las cantidades de TCO en el casquete polar del hemisferio norte disminuyendo hasta el nivel más bajo jamás observado en primavera. Hong y Reichler (2021) investigan la pérdida persistente de ozono ártico durante las intensificaciones de los vórtices, que se compensa drásticamente con aumentos repentinos similares al calentamiento después del calentamiento final de 55 años. Friedel et al., (2022) contrastaron los resultados de los modelos de química y clima con y sin química interactiva del ozono.

El objetivo del presente Boletín 2 del Agujero de Ozono en la Antártida es monitorear e informar 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 activación química del vórtice y el tamaño del Agujero de ozono.

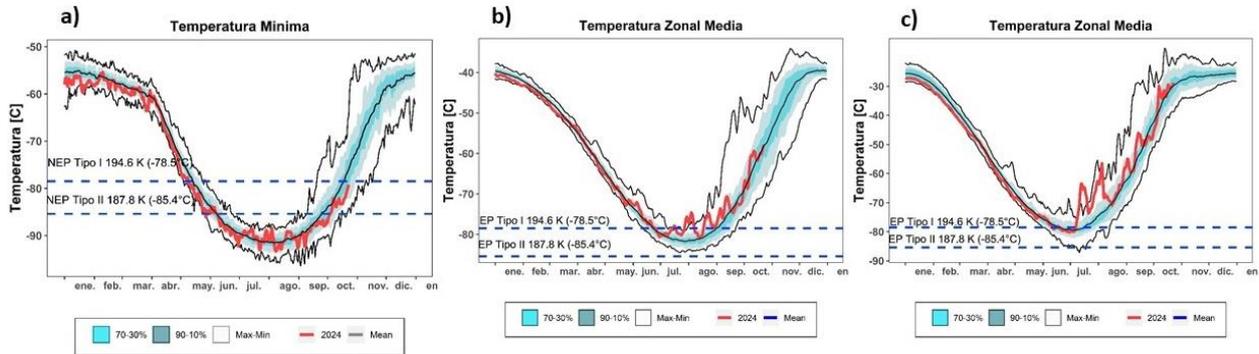
## 2. CONDICIONES METEOROLÓGICAS PREVALECIENTES.

### 2.1. Temperaturas.

Las temperaturas en la estratosfera Antártica son un buen indicador para saber cómo evolucionará y se desarrollará el agujero de ozono en la estratosfera a corto plazo, por lo que también puede ser un predictor dinámico para desarrollar pronósticos a largo plazo, ya que la formación de nuevas estratosféricas polares va a depender de la temperatura mínima (Carbajal et al., 2024; Vargin et al., 2024).

En la **figura 1** se realiza el análisis de la temperatura mínima en la estratosfera del Hemisferio Sur (HS) a una altura de 50 hPa **(a)** muestra que la temperaturas mínimas en estratosfera en los próximos días ya dejará de producir nubes estratosféricas polares, aunque su tendencia es por debajo de la media, es decir es frío. Las temperaturas zonales en latitudes polares (60° a 90°) a alturas de 50 **(b)** y 10 hPa **(c)**, muestra que, debido al calentamiento súbito estratosférico (en inglés, SSW) que se presenta en el mes de junio y agosto (SSW menores), la mayor parte del tiempo de éstas permanecieron por arriba de la media y actualmente así continúan.

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 en el HS a 50hPa. b) Temperatura zonal Media a 50 hPa. c) Las temperaturas zonales Media a 10 hPa, sobre la región de 60° a 90° S. La línea color roja, representa la evolución de las temperaturas para el año 2024 hasta el 21 de octubre. Las líneas externas negras, son media, máximos y mínimos del mismo periodo 1979 - 2023. Los sombreadas en azul-verde de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90% para el mismo periodo.

## 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).

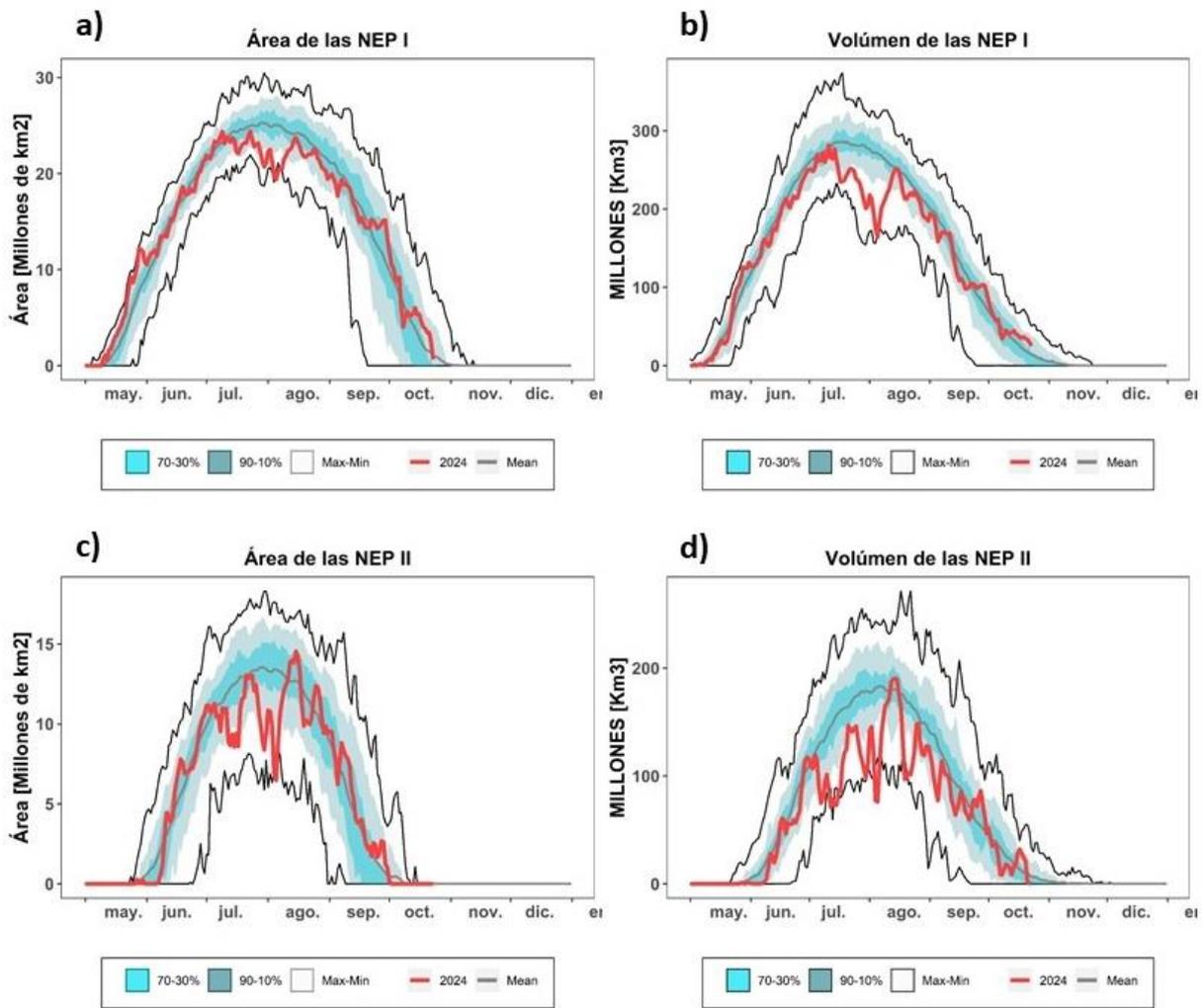
En la **Figura 2** se puede observar que el área y volumen de las NEP Tipo I (a,b) y Tipo II (c,d) para lo que va del año (hasta el 21 de octubre). Las NEP tipo II, ya no se observa formación, ni crecimiento, es decir ha finalizado su ciclo de la temporada. Mientras que, las NEP Tipo I de la misma manera están acercándose a finalizar su ciclo y se encuentra en niveles medios.

En el **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 el SWW que se presenta en el mes de julio y agosto, 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.

**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	Área Media 1979 - 2023	Volumen	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	Área Media 1979 - 2023	Volumen	Volumen Medio 1979 - 2023
15 – agosto	13,9	12,7		
14 – agosto	---	---	185,4	179,9
15 – agosto	---	---	185,4	179,4



**Figuras 2.** 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 hasta el día 21 de octubre. 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.

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)

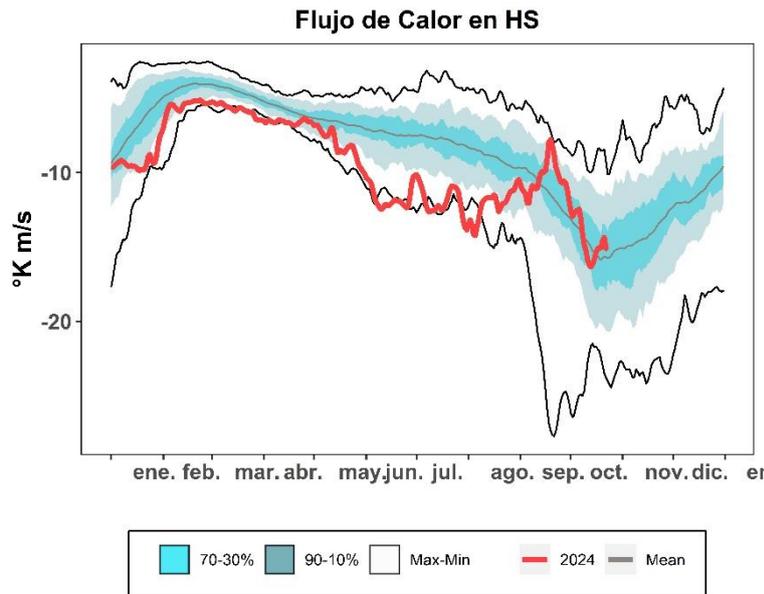
### 2.3 ESTABILIDAD DEL VÓRTICE

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

Se puede observar que, después del SSW en agosto, la tendencia del flujo de calor es a ir desacelerando y poco a poco hacia la calma, aunque ya en el mes de septiembre hay nuevamente un pequeño movimiento y transporte de calor desde la troposfera que se transporta hacia la estratosfera. Durante el mes de septiembre y al inicio de octubre,

el flujo de calor se incrementa bruscamente, pero tiende a la normalidad. Hasta el 19 de octubre, se ha observado una tendencia hacia la calma y en tal sentido se estabiliza el vórtice polar y tiende hacia una fase positiva.

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 3.** Serie de tiempo del flujo de calor meridional promediado sobre la región entre 45-75°S. La curva roja muestra los datos para 2024 hasta el 21 de octubre. 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 medios, 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 4** se observa el vórtice polar y su estabilidad que actualmente se observa, a través del Potencial de Vorticidad (PV), en una superficie isoentrópica de Temperatura Potencial a 475°K, correspondiente a la baja estratosfera, donde la destrucción de ozono se lleva a cabo. Los valores entre más negativos, implican mayor estabilidad del vórtice polar.

Para estas fechas, el vórtice se observa estable y entrando a una fase positiva, con un ligero desplazamiento hacia el océano Índico y Atlántico, al sur de Sudáfrica. (**a y b**).

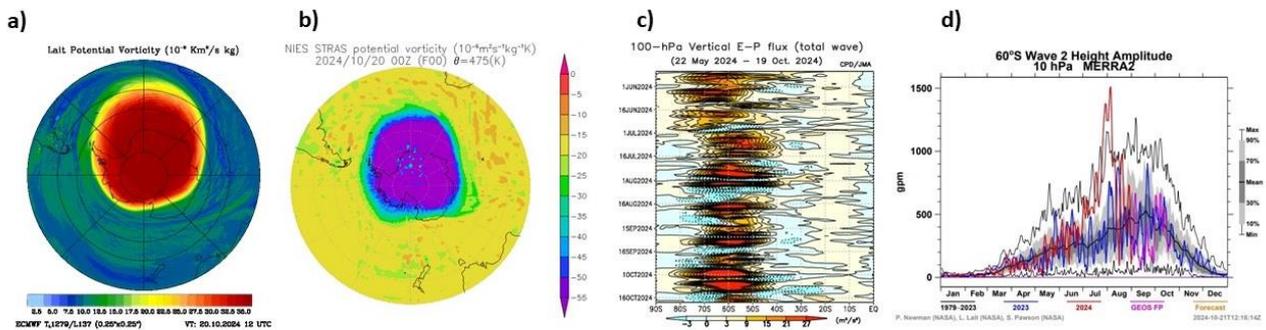
En el gráfico del flujo Eliassen – Palm (E-P) de la onda total (**c**) se observa que, la propagación en los últimos días ha sido poco intenso y desplazado hacia los 60° de latitud. Finalmente la onda 2 (**d**), después del máximo histórico en el mes de julio, los últimos días se estabiliza la actividad y tiende a ser menor, hacia la estabilidad.

Fuente de datos:

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

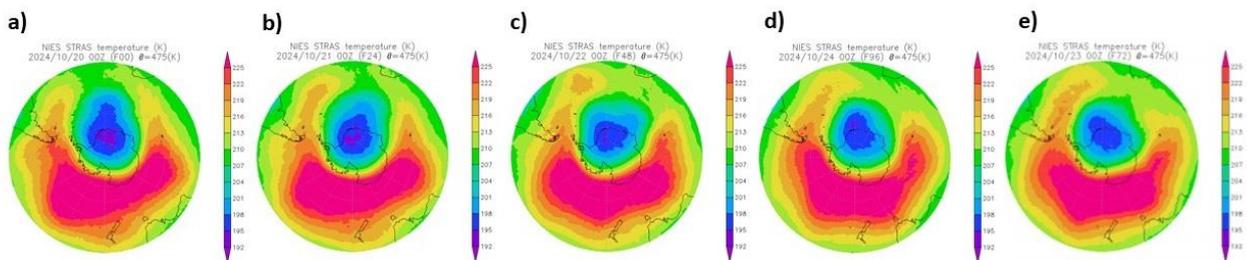
<https://db.cger.nies.go.jp/gem/stras/en/forecast.html?date=20220830&polar=s&k=475>

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



**Figura 4.** Mapas de Vorticidad Potencial (PV) a una altura isentrópica de 550°K. El mapa se construye con datos del ECMWF para el día 21 de octubre (a). Después, el siguiente mapa (b) se construye con datos del NCEP para el día 21 de octubre. El flujo Eliassen-Palm de onda total se construye en la agencia de meteorología Japonesa (c), Finalmente, la actividad de la onda 2 (d).

En la **Figura 5** se observa la temperatura dentro del vórtice polar para los días 21, 22, 23, 24 y 25 de octubre donde se observa que la temperatura poco a poco tiende a aumentar la temperatura consecuencia de la primavera ya establecida en la Antártida, dentro de un vórtice estable y entrando a fase positiva.

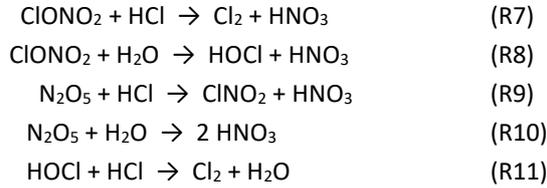


**Figura 5.** Campos de Temperatura isoentrópica a 475°K dentro del Vórtice Antártico. a) 21, b) 22, c) 23, d) 24 y e) 25 de octubre 2024.

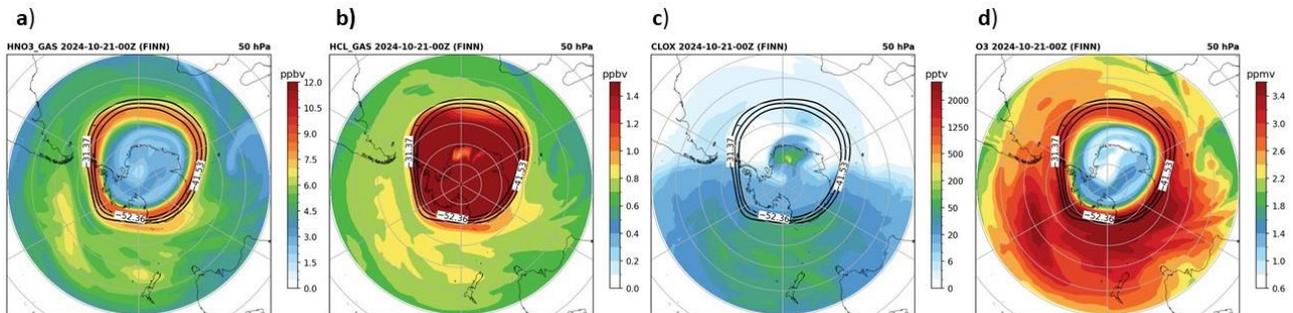
## 2.4 Activación química del Vórtice Polar

Las reacciones heterogéneas son procesos que involucran distintas fases como gases, sólidas y líquidas, estas son extremadamente significativas en la estratosfera Antártica, debido que promueven la formación de compuestos clorados que se encuentran como reservorio en las NEP. La importancia de tales reacciones, es la liberación de cloro y son removidos por especies de nitrógeno (NOx) que en su forma más estable está como ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) A través de varios mecanismos de las reacciones, los NOx atrapan cloro activo y lo transforman en reservorios Y posteriormente con la radiación UV, liberan cloro e inicia la destrucción del ozono, a través de ciclos catalíticos:

Las cinco reacciones básicas de la química heterogénea, las cuales son de mayor importancia para el la química de ozono son:



En la **Figura 6** se observa hasta el momento (21 de octubre) los procesos químicos que se están llevando a cabo dentro del vórtice polar. El ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) (**a**) y el ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) (**b**) en estado gaseoso en su mayor concentración se encuentra a las orillas del vórtice. El  $\text{HNO}_3$  es el precursor principal de las NEP Tipo I y por encima de la Antártida se encuentra ya en muy bajas concentración y la tendencia es a ir desapareciendo con el paso del tiempo. El ácido clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) es otra sustancia que tiene la capacidad de atrapar al cloro activo en un reservorio, conjuntamente con el  $\text{NO}_x$  y el Metano ( $\text{CH}_4$ ) durante el invierno polar, de tal manera que se observan altas concentraciones que confirman que el cloro es atrapado con esta sustancia y conforme avanza el tiempo este va aumentando su concentración, hasta el vórtice finalice. El compuesto de óxido de cloro  $\text{ClO}_x$  (**c**) es el principal responsable de la destrucción catalítica de ozono, debido a su capacidad de liberar al cloro a través de la radiación ultravioleta y en este se encuentra, relativamente, ya en bajas concentraciones y poco a poco tiende a extinguirse, ya que no se producirán NEP. Finalmente el ozono ( $\text{O}_3$ ) (**d**), muestra baja concentración debido a que los procesos de destrucción se están llevando en esta fecha, aunque va en aumento.



**Figura 6.** Activación química dentro del vórtice polar a) ácido nítrico [ppbv], ácido clorhídrico [ppbv], C) Oxido de cloro [pptv] y Ozono [ppmv], todos a una altura de 50hPa, donde aproximadamente se encuentra en la mayor concentración el ozono.

### 3. OBSERVACIONES DE OZONO

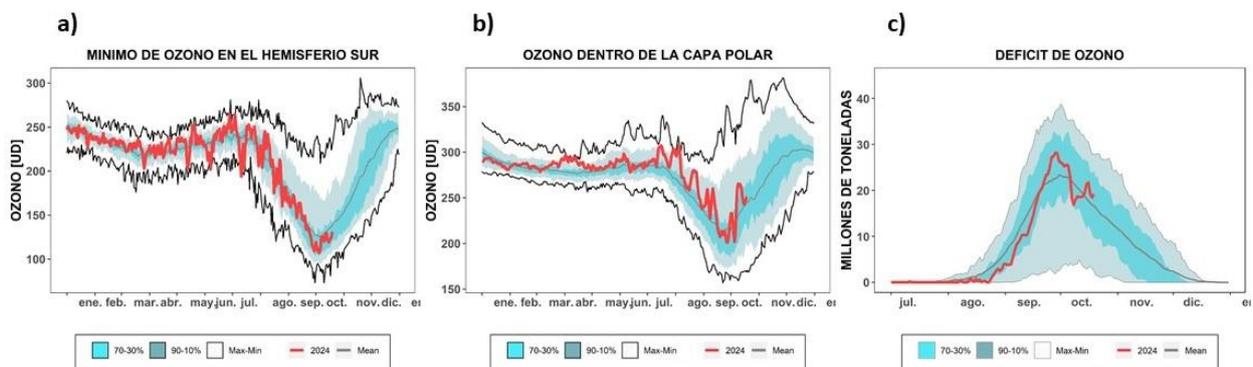
#### 3.1 Observaciones Satelitales

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 7** se muestra la columna de ozono mínimo en Hemisferio Sur (**a**) y el Ozono dentro de la capa polar (**b**) y el déficit de ozono, es decir la pérdida de éste gas en el agujero de ozono (**c**) del 2024, tal como han sido medidas por el TOMS, OMI y OMPS, en comparación con su media del periodo 1979 a 2023.

Tal como se observó anteriormente, el vórtice tiende a ser estable y entra en fase positiva, con una estratosfera dentro de la misma, que se calienta de manera estacional. El ozono mínimo en el HS (a) oscila con poca amplitud alrededor de su media y se observa que es muy sensible a los cambios de temperatura, es decir a inicios de julio, cuando se presenta el SSW el ozono aumenta, mientras que ahora el ozono mínimo de observa destrucción por debajo de su media, pero no significativamente. El ozono dentro de la capa polar oscila por alrededor de su media histórica, inclusive en los últimos días se observa poca destrucción de ozono. Esta situación es muy clara en el déficit de ozono (c) aunque en los últimos días el déficit de ozono ha permanecido en una constante.

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



**Figura 7. 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. **C)** Es el Déficit de ozono. En los tres casos, la línea roja muestra el año 2024 hasta el 21 de octubre. Las líneas media y externas negras, son los valores medios, máximos y mínimos, respectivamente, 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%.

### 3.2 Estaciones en superficie

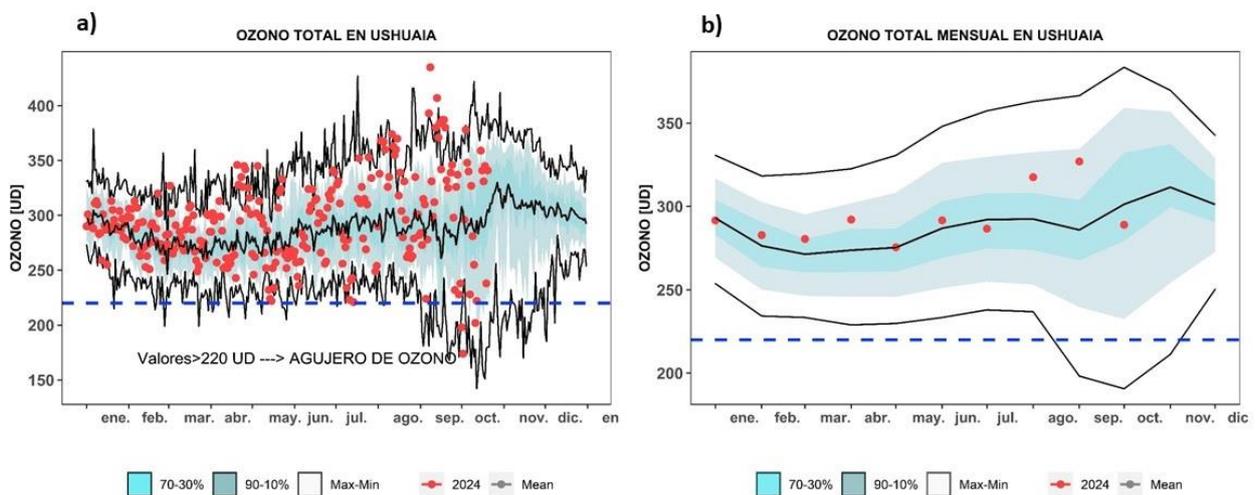
Por ahora, solo se usan mediciones en superficie obtenidos mediante el Espectrofotómetro Dobson y ozonosondeos de la Estación GAW Ushuaia (54° 50' 54.46''S, 68° 18' 37.52'' O) Y mediciones con Espectrofotómetro Dobson de la Estación Antártica Marambio (61° 14' 33.68'' S, 56° 37' 36.98'' O), dependientes 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.

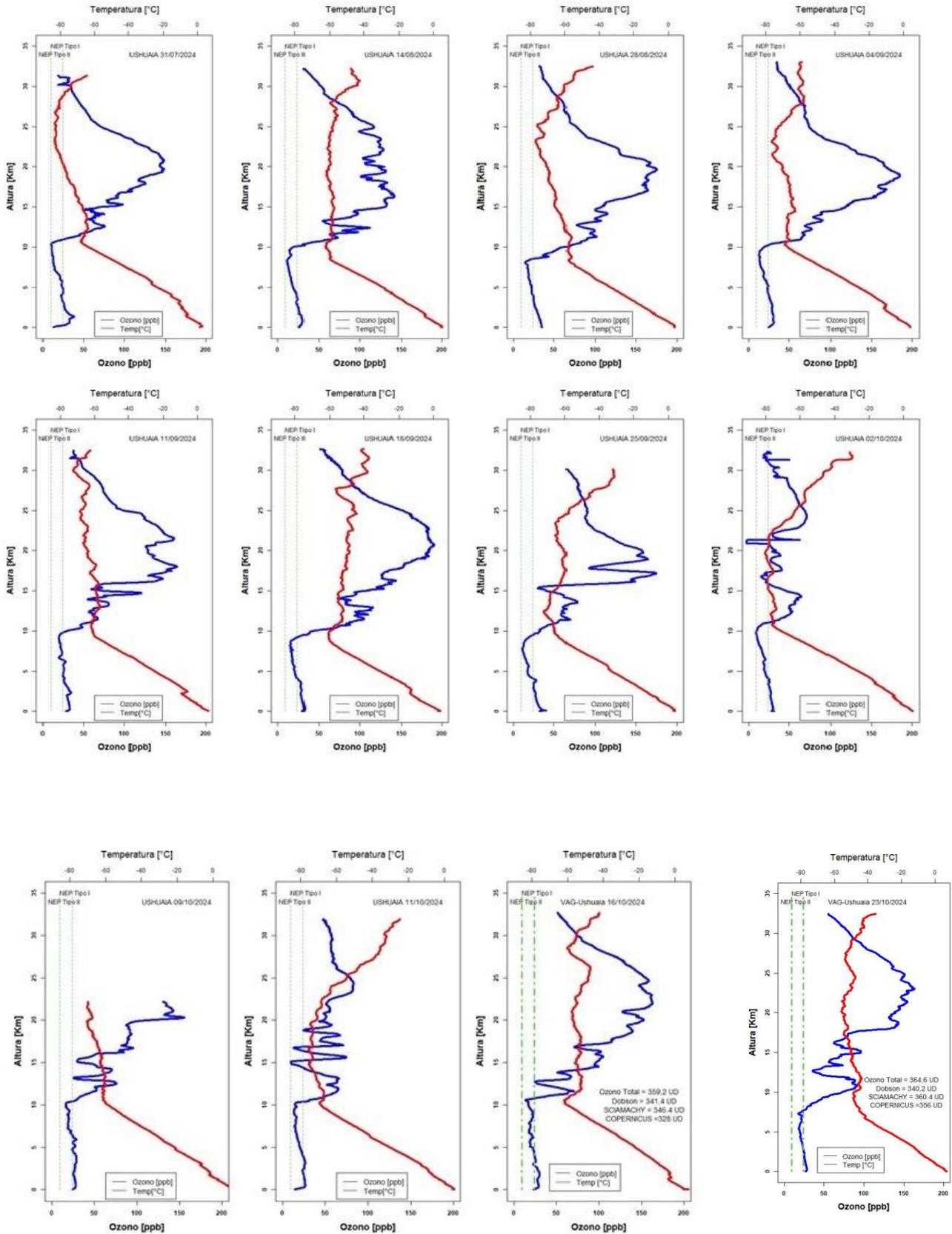


El espectrofotómetro Dobson (D131) mide todos los días y en la **Figura 8**, se muestra la evolución diaria (**a**) y mensual (**b**) de la columna total de ozono hasta el 21 de octubre del año 2024, comparado con su media histórica (1994-2023). Los datos diarios de ozono total, son muy acordes con los 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.

En la **Figura 9** se muestra los 7 perfiles de ozono y de temperatura, producidos por los ozonosondeos realizados el 31 de julio, 14 y 28 de agosto, 4, 11, 18 y 25 de septiembre, y 2, 9, 11, 16 y 23 de octubre. En los gráficos de muestra las temperaturas que están por arriba de la formación de la NEP, salvo los días 7 de julio y 2 de octubre, esta fecha ultima el agujero de ozono pasa por el sur de la Patagonia en Sudamérica. Cabe destacar que el día 11 de octubre se capta el paso del agujero de ozono sobre la estación.



**Figura 8.** Datos de la columna Total de Ozono [UD] con el Espectrofotómetro Dobson en la estación VAG Ushuaia. Los puntos rojos son los datos del año 2024. Las líneas negras son la media, máximos y mínimos, en tanto los colores sombreados es la media del periodo 1994 a 2023. Las líneas sombreadas en azul-verde de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%.

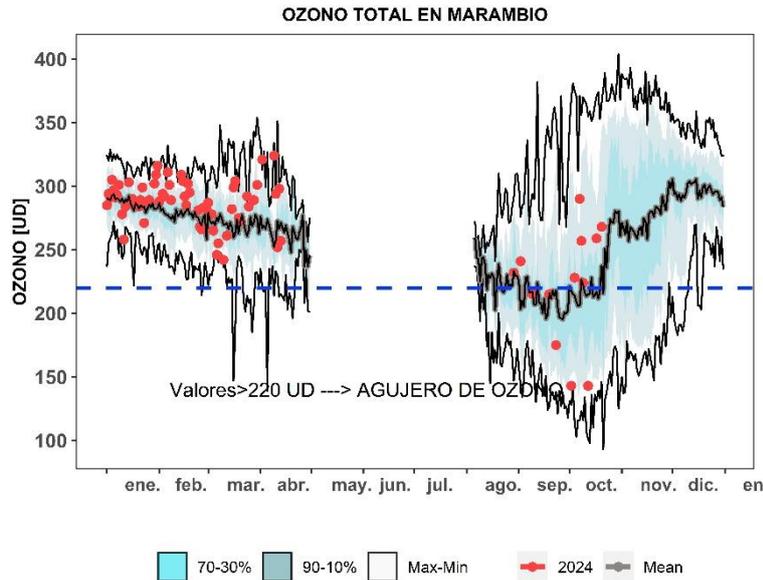


**Figura 9.** Ozonosondeos realizados en la Estación VAG de Ushuaia. En los dos gráficos, la línea azul es la relación de mezcla del ozono expresado en unidades partes por billón [ppb] en cada nivel de la atmosfera. Y la curva roja es el perfil de la temperatura en [°C].

### 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. A mediados del mes de agosto, reinician las mediciones diarias y se observa que en el gráfico diario de la **Figura 10**, 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 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, y 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 que se deforma y en ocasiones pasa por la parte norte de la Península Antártica y otras no, específicamente en Marambio. Además se observa una amplitud, aunque no importante, incluidos valores por debajo de los 220 UD.



*Figura 10. Medición de ozono total diario en la estación Antártica Marambio.*

### 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. 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.



*Despliegue de espectrofotómetros Brewers en la Universidad Federal de Santa María, Brasil. El Téc. Nazareno Tintes realizando un test de lámparas UV. (Fotos, Dr. Alberto redondas)*

En la **Figura 11** se observa las primeras mediciones del Espectrofotómetro Brewer durante septiembre y lo que vamos de octubre (21 de octubre) y se observa que en la mayoría de los casos se encuentran por debajo del umbral de los 200 UD, es decir que el agujero de ozono para esas fecha está por encima de la estación Antártica San Martín.



*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).*

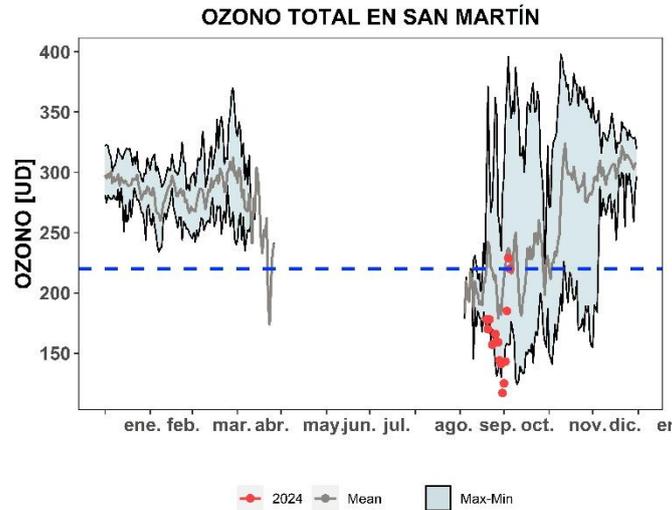


Figura 11. Medición de ozono total diario en la estación Antártica San Martín.

### 3.3.4 Estación Antártica Belgrano II.



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).

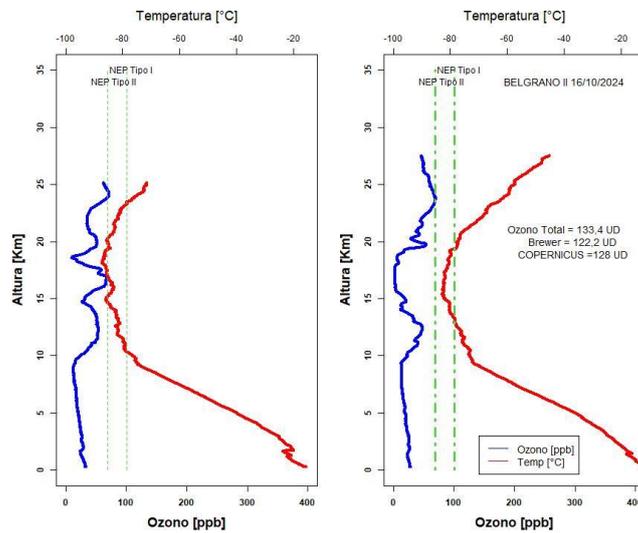
En la **Figura 12** se muestran los resultados de los ozonosondeos que, se realizan en esta base. Estos son llevados a cabo, a través del convenio de Colaboración Científica entre la Dirección Nacional del Antártico - **Instituto Antártico Argentino** (IAA) y el instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial (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 el espectrómetro NEVA II que utilizan la técnica Max DOAS. Ambos espectrómetros fueron desarrollados por el INTA de España.

La base 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>



*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).*

En la **Figura 12** la evolución del agujero de ozono se muestra a través de los ozonosondeos, en estos se muestra el perfil de ozono y de la temperatura. El día 25 de septiembre y 16 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 optima, si alcanza el máximo de la capa mide ozono.



**Figura 12.** 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 13** 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 el comportamiento es muy similar y cuantitativamente difieren muy poco entre ellos. Hasta el 19 de octubre el consenso de los gráficos indica que están alrededor de los 17,64 millones de km<sup>2</sup>, apenas por debajo de su media que es de 15,91 millones de km<sup>2</sup>, pero con el tiempo está poco a poco estará decayendo.

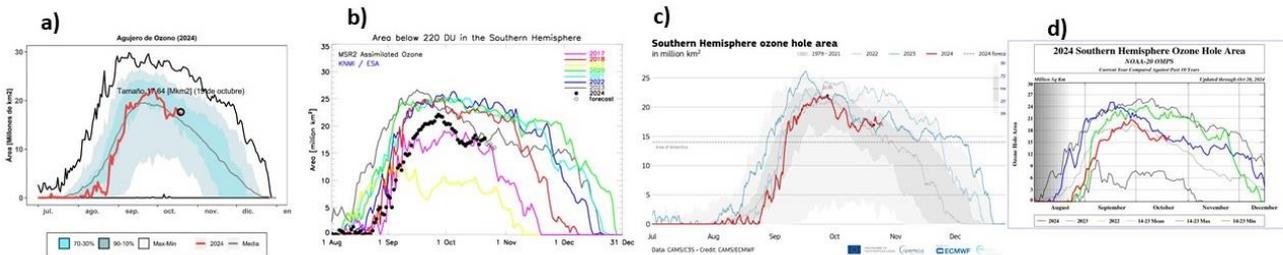
Fuente de datos:

[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/SH.html> y <https://www.temis.nl/index.php>

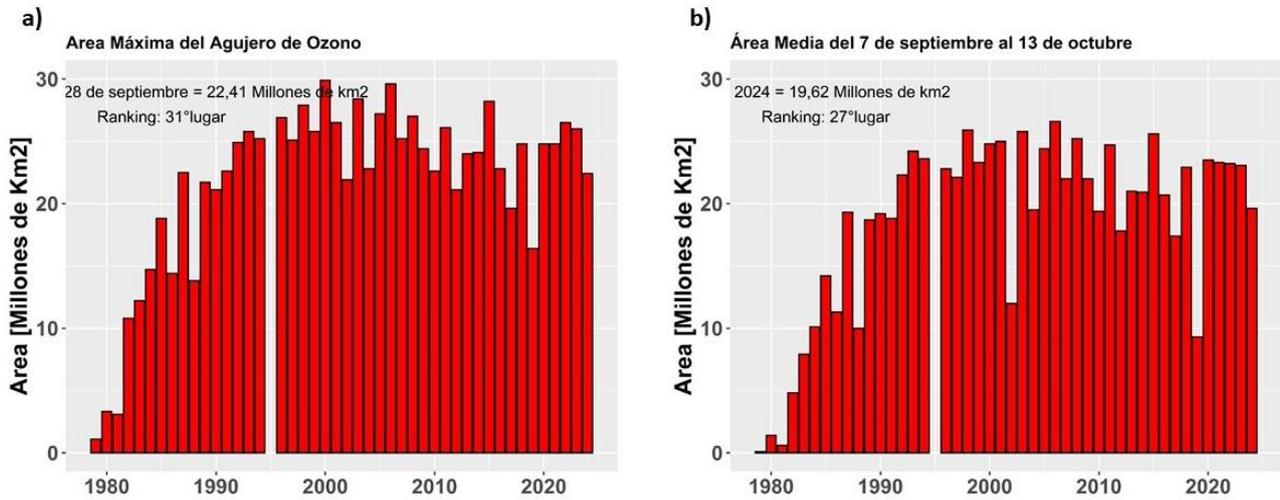
<https://atmosphere.copernicus.eu/monitoring-ozone-layer>

[https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar/gif\\_files/ozone\\_hole\\_plot\\_N20.png](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar/gif_files/ozone_hole_plot_N20.png)



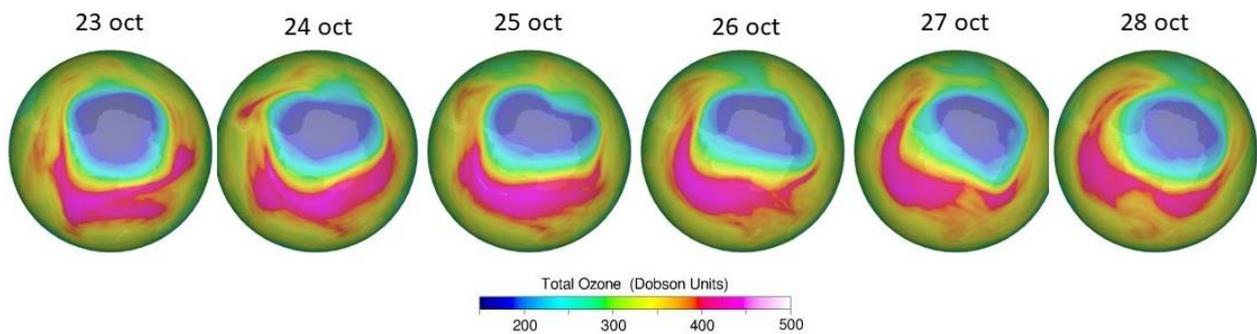
**Figura 13.** Área del Agujero de Ozono (millones de km<sup>2</sup>). a), Es el consenso de satélites de la NASA, EEUU (TOMS+OMI+OMPS). b); son datos del TEMIS, Datos de la ESA (Agencia Espacial Europea). c) El monitoreo del COPERNICUS ATMOSPHERE MONITORING SERVICE (CAMS) del Centro Europeo ECMWF. d) El gráfico de la NOAA, solo del equipo OMPS.

En lo que va del año, ya se puede establecer la magnitud del agujero de ozono, después de 2 calentamientos súbitos estratosféricos menores que ayudo a que éste no creciera demasiado. En la **Figura 14** 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 31° de 45 años de medición, más pequeño que los últimos 4 años. b) Mientras que el área promedio, ocupa el lugar del Rankin 27°, siendo este promedio menor al de los últimos 4 años.



**Figura 14.** Serie de tiempo del Área del Agujero de Ozono (millones de km<sup>2</sup>). a) Área Máxima absoluta y b) área promedio del periodo del 7 de septiembre al 13 de octubre de cada año.

En la **Figura 15**, se observa los mapas proyectados para los próximos días, a partir del 23 de octubre. En estos se observa que el agujero de ozono durante los 6 días, estaría de manera cuasi-estacionaria sobre la Antártida y los Océanos Índico y Atlántico.



**Figura 15.** Proyecciones para los próximos 5 días a partir del día 11 hasta el 15 de octubre, muestran la evolución y desarrollo del agujero de ozono.

## 5. CONCLUSION

El vórtice polar se estabiliza y entra en fase positiva, lo que produce en enfriamiento en la estratosfera dentro del mismo, pero se observa que, estas ya no alcanzan a producir NEP y la activación química empieza a decaer.

El agujero de ozono se desarrolla y la destrucción de ozono continua, aunque en menor grado que los últimos 4 años, tal como se observa el análisis de área máxima del agujero de ozono y en el área media del periodo del 7 de septiembre al 13 de octubre, ocupando el Rankin 27° y 31° de mayor a menor de los 45 años de medición. Aunque es menor que el de los últimos 4 años.

Se espera que el agujero de ozono continúe con su disminución, según las proyecciones y no se descarta un cierre temprano de dicho agujero de ozono.

## 7. 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 ozonsondas 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;

Se agradece a los observadores Antárticos de San Martín del Laboratorio LASAN: **Ing. Federico Daniele y Téc. Rodrigo De Iulis.**

Se agradece a los profesionales Antárticos de Belgrano II del Laboratorio LABEL; **Téc. Rodrigo Fornerón, Téc. Agustín Coto y Téc. Lautaro Odellii.**

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Baldwin, M. P., Ayarzagüena, B., Birner, T., Butchart, N., Butler, A. H., Charlton-Perez, A. J., Domeisen, D. I., Garfinkel, C. I., Garny, H., Gerber, E. P., et al.: Sudden stratospheric warmings, *Reviews of Geophysics*, 59, e2020RG000 708, 2021.

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, 2022.

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.

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, 2014.

Carabajal Benítez Gerardo, Facundo Orte, Elian Wolfram, Eduardo Luccini y Fernando Nollas. Boletines 1, 2, 3, 4 e Informe Final del Agujero de Ozono 2019.

Carabajal Benitez, G., H. Ochoa y H. Estevez Perez, 2024: Nubes Estratosféricas Polares y su seguimiento a través de modelos y ozonosondeos en Ushuaia y Belgrano II. Nota Técnica SMN 2024-169, 2024.

Eskes H. J., Van der A R. J., Brinksma E. J., Veefkind J. P., de Haan J. F., 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.

Friedel, M., Chiodo, G., Stenke, A., Domeisen, D. I. V., 465 and Peter, T.: Effects of Arctic ozone on the stratospheric spring onset and its surface impact, Atmospheric Chemistry and Physics, 22, 13 997–14 017, <https://doi.org/10.5194/acp-22-13997-2022>, 2022.

Geir Braathen, "Boletín de Ozono Antártico", Editado por la WMO.

Holton, J. R.: The dynamics of sudden stratospheric warmings, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 8, 169–190, 1980.

Henk Eskes, Peter van Velthoven, Pieter Valks and Hennie Kelder, Assimilation of GOME total ozone satellite observations in a three-dimensional tracer transport model, Q.J.R.Meteorol.Soc. 129, 1663-1681, 2003. doi: 10.1256/qj.02.14.

Newman (NASA), E. Nash (SSAI), R. McPeters (NASA), S. Pawson (NASA) National Aeronautics and Space Administration - Goddard Space Flight Center - NASA Ozone Watch.

Hong, H. J., and Reichler, T.: Local and remote response of ozone to Arctic stratospheric circulation extremes, Atmospheric Chemistry and Physics, 21, 1159–1171, <https://doi.org/10.5194/acp-21-1159-2021>, 2021.

Karpechko, A., Y. (2020). Jet stream stops shifting as ozone layer recovers, Nature, Vol 579, 544-501.

Lawrence, Z. D., Perlwitz, J., Butler, A. H., Manney, G. L., Newman, P. A., Lee, S. H., and Nash, E. R.: The remarkably strong Arctic stratospheric polar vortex of winter 2020: Links to record-breaking Arctic oscillation and ozone loss, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125, e2020JD033 271, 2020.

Lubis, S.W., Silverman, V., Matthes, K., Harnik, N., Omrani, N.-E., and Wahl, S.: How does downward planetary wave coupling affect polar stratospheric ozone in the Arctic winter stratosphere? Atmospheric Chemistry and Physics, 17, 2437–2458, 2017.

Manuel Gil Ojeda "El ozono estratosférico" Tethys, 3, 47–58, 2006. DOI:10.3369/tethys.2006.3.06.

Oehrlein, J., Chiodo, G., and Polvani, L. M.: The effect of interactive ozone chemistry on weak and strong stratospheric polar vortex events, Atmospheric Chemistry and Physics, 20, 10 531–10 544, 2020.

Qin, Y., Gu, S.-Y., Dou, X., Teng, C.-K.-M., and Li, H.: On the westward quasi-8-day planetary waves in the middle atmosphere during arctic sudden stratospheric warmings, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126, e2021JD035 071, 2021.

Salby, M. L. and Callaghan, P. F.: Influence of planetary wave activity on the stratospheric final warming and spring ozone, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112, 2007.

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.

Thieblemont, R., Ayarzagüena, B., Matthes, K., Bekki, S., Abalichin, J., and Langematz, U.: Drivers and surface signal of interannual variability of boreal stratospheric final warmings, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 5400–5417, 2019.

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.

Van der A, R. J., Allaart, M. A. F., and Eskes, H. J., Extended and refined multi sensor reanalysis of total ozone for the period 1970-2012, *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 3021-3035, 2015. doi: 10.5194/amt-8-3021-2015.

Van der A, R. J., Allaart, M. A. F., and Eskes, H. J., Multi-Sensor Reanalysis (MSR) of total ozone, version 2. Dataset. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), 2015. doi: 10.21944/temis-ozone-msr2.

Vargin, P.; Kostykin, S.; Koval, A.; Rozanov, E.; Egorova, T.; Smyshlyaev, S.; Tsvetkova, N. Cambios en la estratosfera del Ártico en el siglo 21 en el modelo del sistema de la Tierra SOCOLv4. *Frente. Tierra Sci.* **2023**, 111214418.

Vargin, P.; Koval, A.; Guryanov, V.; Volodin, E.; Rozanov, E. Variations of Planetary Wave Activity in the Lower Stratosphere in February as a Predictor of Ozone Depletion in the Arctic in March. *Atmosphere* 2024, 15, 1237. <https://doi.org/10.3390/atmos15101237>.