



Servicio  
Meteorológico  
Nacional

## BOLETIN 2 - TEMPORADA DEL AGUJERO DE OZONO 2024

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

*1. Servicio Meteorológico Nacional, Argentina.*

*2. Red Solarimétrica del Instituto de Geofísica, UNAM, México.*

*3. Dirección Nacional del Antártico / Instituto Antártico Argentino.*

*4. Universidad Tecnológica Nacional FRBA. Argentina.*

*5. CONICET - Centro de Excelencia en Productos y Procesos de Córdoba, Argentina.*

*6. Facultad de Química e Ingeniería del Rosario, Pontificia Universidad Católica Argentina.*

*7. CEILAP, UNIDEF (CITEDEF-CONICET), Argentina.*

Septiembre, 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	13
3.1 Observaciones Satelitales.	13
3.2 Estaciones en superficie.	13
3.2.1 Estación VAG USHUAIA.	14
4. EL AGUJERO DE OZONO	16
4.1 El área del agujero de ozono.	16
5. CONCLUSIONES	17
6. AGRADECIMIENTOS	17
7. BIBLIOGRAFÍA	18

## RESUMEN.

El presente Boletín 2, tiene por objetivo establecer, la evolución del Agujero de Ozono hasta el momento sobre la Antártida para el año 2024. Las temperaturas mínimas muestran que hasta el momento oscilan al redor de su media, mientras que las temperaturas zonales, oscilan por arriba de su media, pero se espera que poco a poco se están estabilizando y llegando a su normalidad, después del SSW no significativos durante julio y agosto. Se observa que el SSW se produce por una gran cantidad de flujo de calor que es transportado desde la troposfera hacia la estratosfera durante el mes de julio, que incluso hace que la amplitud de la onda-2 haya roto récord de histórico desde que se tiene registro (1979 -2023). A partir del mes de agosto, el flujo de calor tiende hacia la calma, a través de un cambio abrupto muy parecido al del año 2022, esto tiene impacto en el vórtice polar que, tiende a la estabilidad por el bajo movimiento de las ondas atmosféricas. Las NEP Tipo I y II, en sus valores máximos, apenas superaron a sus medias históricas y actualmente se están destruyendo pero no formando, de tal manera que los procesos de destrucción de ozono están presentes. El tamaño del agujero de ozono, a la fecha de hoy apenas está por encima de su media con 19,81 Millones de kilómetros cuadrados el día 17 de septiembre. Mientras que las proyecciones a corto plazo no muestran un aumento significativo.

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

## ABSTRACT.

The purpose of this Bulletin 2 is to report on the evolution of the Ozone Hole over Antarctica for the year 2024. Minimum temperatures have been close to their average, while zonal temperatures have been above their average. However, it is expected that they will gradually stabilize and return to normal after the non-significant SSW (Sudden Stratospheric Warming) during July and August. The SSW was caused by a large amount of heat flow from the troposphere to the stratosphere in July, leading to a historical record-breaking amplitude of wave-2. From August onwards, the heat flow has been trending towards calm, similar to the pattern observed in 2022, due to the polar vortex tending towards stability. Type I and II NEPs (Northern Hemisphere Polar Vortices), at their peak values, have barely exceeded their historical averages and are currently being destroyed but not formed, indicating the presence of ozone depletion processes. As of September 17, the size of the ozone hole is barely above its average at 19.81 million square kilometers. Short-term projections do not show a significant increase in the size of the ozone hole.

**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.

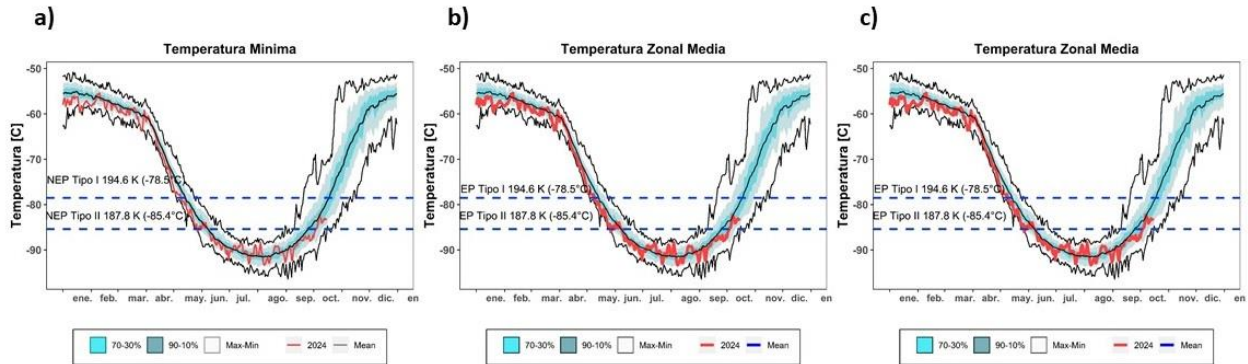
El objetivo del presente Boletín 2 del Agujero de Ozono en la Antártida es monitorear e informar la formación, evolución y finalización de la destrucción de ozono durante la primavera austral, a través de la evaluación de la Temperatura Estratosférica a nivel de 50 hPa y en latitudes polares, de 60° 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.

En la *figura 1* se realiza un análisis de la temperatura mínima en la estratosfera del Hemisferio Sur (HS) a una altura de 50 hPa (**a**) y las temperaturas zonales en latitudes polares (60° a 90°) a alturas de 50 (**b**) y 10 hPa (**c**), se observa que la estratosfera en términos generales, está por arriba de su media (caliente) debido al calentamiento súbito estratosférico (en inglés, SSW) que se presenta en el mes de junio. A la altura de los 50 hPa, el impacto del SSW provoca que las temperaturas mínimas del HS oscilen alrededor de la media, pero aún permanecen por debajo del umbral de formación de las NEP tipo I y II. Mientras que las temperaturas medias zonales, oscilan por arriba de la media, pero a partir del mes de agosto, estas ya se encuentran encima del umbral de producción de las NEP I y II, es decir ya hay poca formación de este tipo de nubes. Las temperaturas zonales a 10 hPa es donde se hace más notorio el calentamiento, que por definición este SSW es considerada “**Calentamiento Menor**”, aunque suficiente para retardar el inicio del agujero de ozono.

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 18 de septiembre. Las líneas externas negras, son media, máximos y mínimos del mismo periodo 1979 - 2023. Los sombreados 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 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).

En la **Figura 2** se puede observar que el área y volumen de las NEP Tipo I y Tipo II para lo que va del año (hasta el 17 de septiembre) y se encuentran en pleno decaimiento, debido que se acerca la primavera y la poca formación por el evento SWW que se menciona anteriormente. En las cuatro figuras se puede observar que por momentos oscilan por debajo de la media y recientemente por arriba de la media.

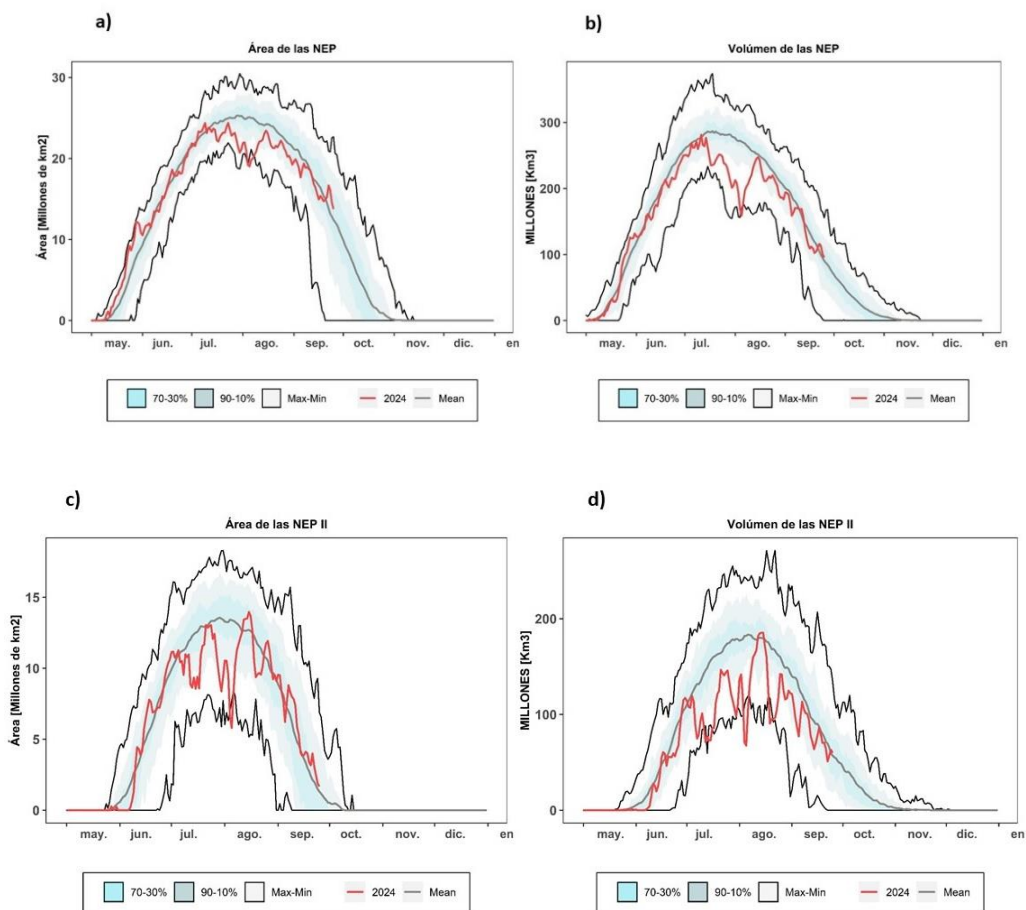
En la **Tabla 1**, se muestra los valores máximos para el tamaño y formación de las NEP Tipo I y Tipo II. Observamos que el área de las NEP Tipo I presenta 2 fechas en la cual, el máximo son aproximadamente igual, la diferencia es que el 9 de julio el valor del presente año es mayor que su media, mientras 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 el SWW que se presenta en el mes de julio, 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



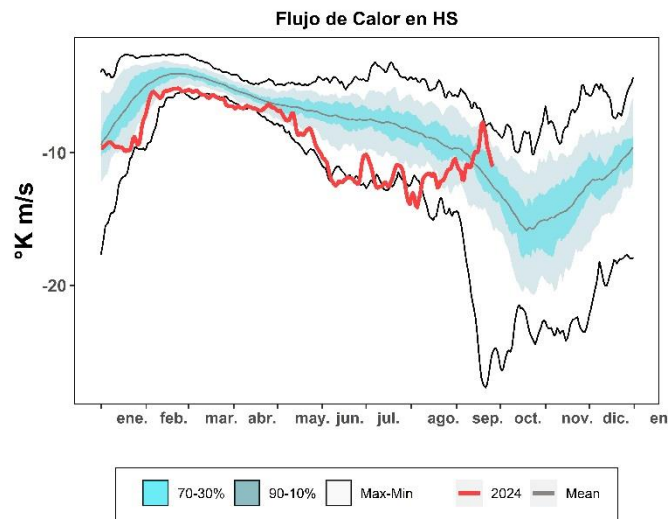
Fuente de datos: [https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/temp\\_2023\\_MERRA2\\_SH.html](https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/temp_2023_MERRA2_SH.html)

### 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, a inicios de 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.

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. 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, 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. Y para finales del mes de septiembre, ya se observa un vórtice que día a día continua inestable, además de que ya cubre el continente Antártico en su totalidad. (**a y b**).

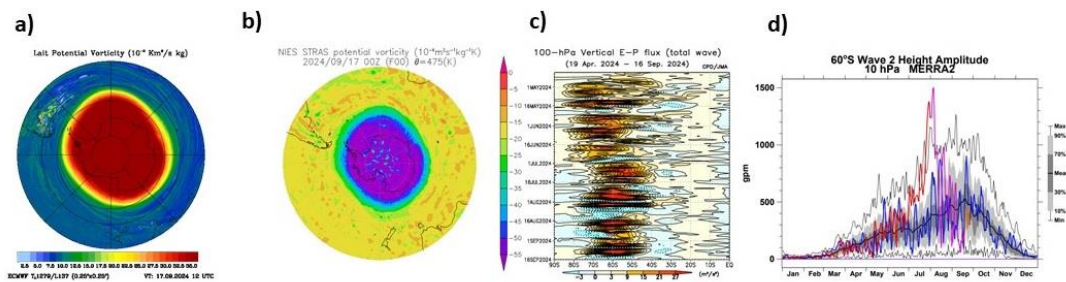
En el gráfico del flujo Eliassen – Palm (E-P) de la onda total (**c**) se observa que, la propagación es intensa y con cierta intermitencia. El punto mayor intensidad es la segunda semana de julio y después vuelve la segunda semana de agosto. Durante el mes de julio, este disturbio atmosférico es asociado al crecimiento poco común de la amplitud de la onda 2, incluso casi alcanza un valor de 1500 gpm (**d**). Esta situación produce una perturbación en el vórtice polar y lo deforma, haciendo que crezca en extensión y entre en fase negativa, provocando que el Mono Anular del Sur (SAM).

Fuente de datos:

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

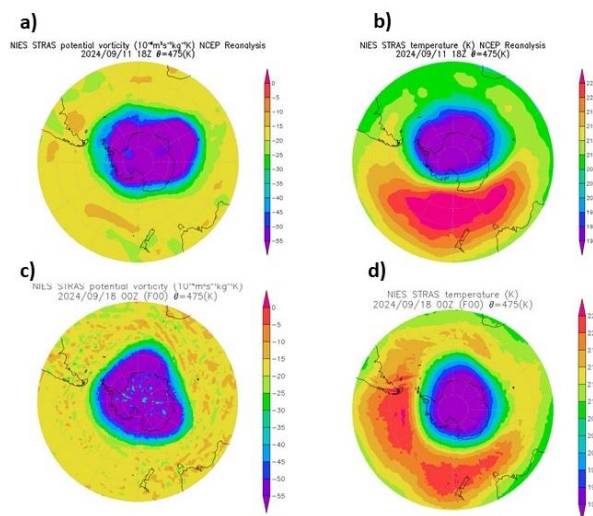
<https://db.cger.nies.go.jp/gem/stras/en/forecast.html?date=20220830&polar=s&k=475>

<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 1 de septiembre (a). Después, el siguiente mapa (b) se construye con datos del NCEP para el día 28 de agosto. El flujo Eliassen-Palm de onda total se construye en la agencia de meteorología Japonesa (c). Finalmente, el disturbio atmosférico se observa en la amplitud de la onda 2 (d).

En la **Figura 5** se observa el vórtice polar representado en unidades de PV para los días 11 y 18 de septiembre (a, c, respectivamente) donde se observa que esta poco deformado y con respecto a los días anteriores, éste se empieza a desplazar hacia la Antártida y se acerca a su normalidad. La temperatura para los mismos días (b, d) muestra que de la misma manera, se aproxima a su normalidad. Estos dos días son los mismos días que se realizaron ozonosondeos en la estación VAG-Ushuaia, donde muestran que para el sur de la Patagonia la estratosfera está más caliente y en particular para el día 18 de septiembre.

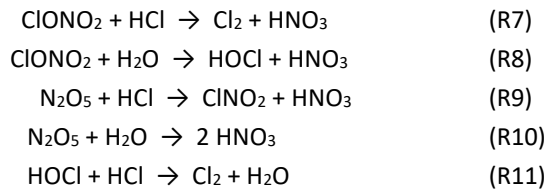


**Figura 5. a) y c) Campos de Potencial de Vorticidad. b y d) temperaturas en superficies isentrópicas a 475°K.**

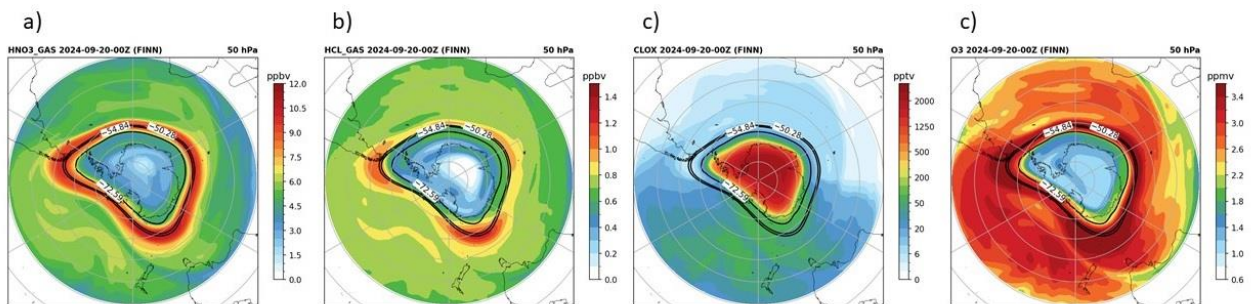
## 2.4 Activación química del Vórtice Polar

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 los procesos químicos que se están llevando a cabo dentro del vórtice polar. El ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) (**a**) y el ácido clorhídrico (HCl) (**b**) en estado gaseoso en su mayor concentración se encuentra a las orillas del vórtice. El HNO<sub>3</sub> es el precursor principal de las NEP Tipo I y por encima de la Antártida todavía se encuentra, aunque en muy bajas concentración y la tendencia es a ir disminuyendo con el paso del tiempo. El ácido clorhídrico (HCl) es otra sustancia que tiene la capacidad de atrapar al cloro activo en un reservorio, conjuntamente con el NOx y el Metano (CH<sub>4</sub>) durante el invierno polar, de tal manera que hay muy bajas concentraciones y conforme avanza el tiempo este ira aumentando su concentración, mientras atrapa el cloro libre en la estratosfera y hasta el vórtice finalice. El compuesto ClOx (**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 en una alta concentración dentro del vórtice polar, debido a que está iniciando la primavera. Finalmente el ozono (O<sub>3</sub>) (**d**), ya muestra baja concentración debido a que los procesos de destrucción se están llevando en esta fecha.



**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

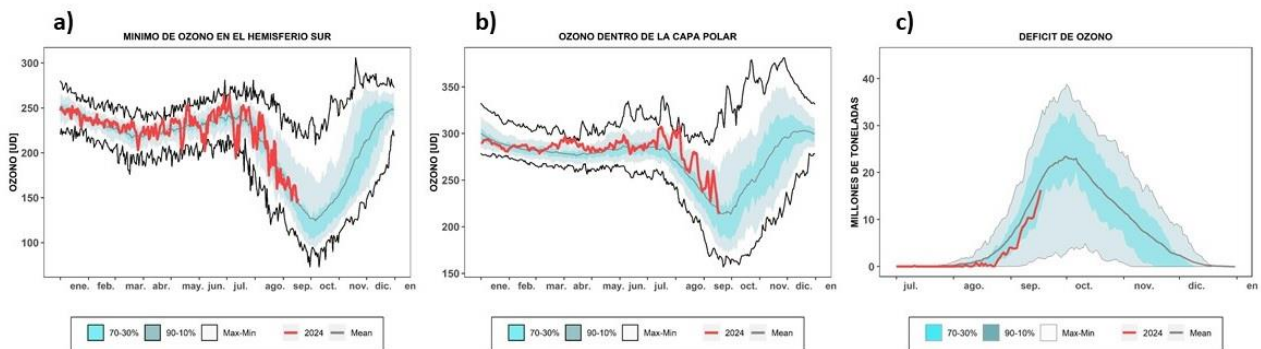
#### 3.1 Observaciones Satelitales

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 su normalidad, con una estratosfera dentro de la misma, que se enfría poco a poco, con respecto a su media histórica. 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 la temperatura se estabiliza el ozono mínimo también. El ozono dentro de la capa polar oscila por encima de la media, es decir poca destrucción de ozono. Esta situación es muy clara en el déficit de ozono (**c**) que representa la pérdida de ozono, es decir la columna de ozono que está por debajo del umbral de los 220 UD, y se encuentra muy por debajo de su media histórica.

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 19 de septiembre. 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 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) dependiente del Servicio

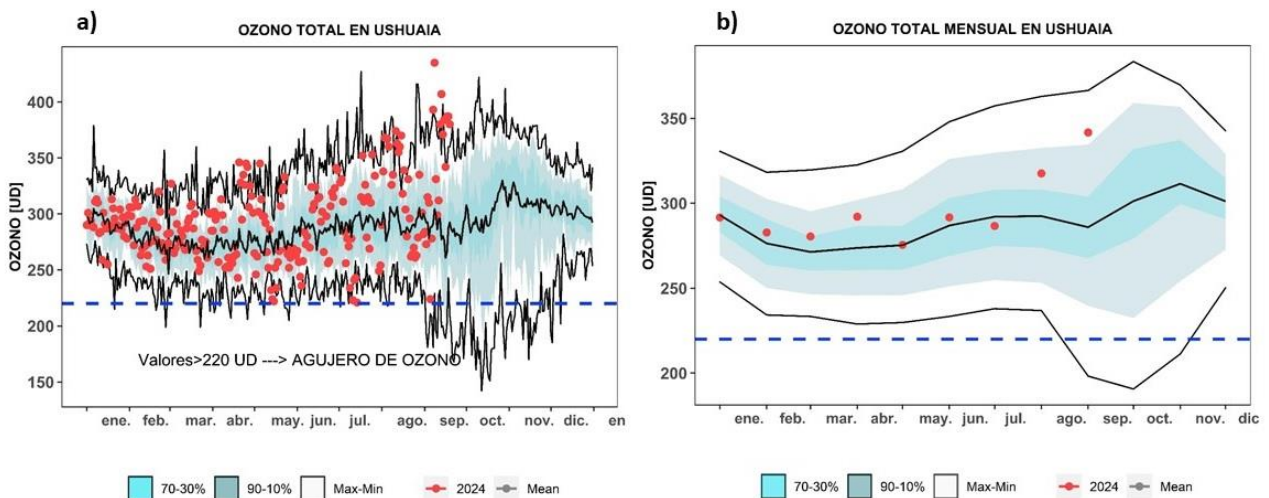
Meteorológico Nacional (SMN). Las estaciones Antárticas no están midiendo debido a las condiciones meteorológicas adversas y prevaletentes.

### 3.2.1. Estación VAG Ushuaia.

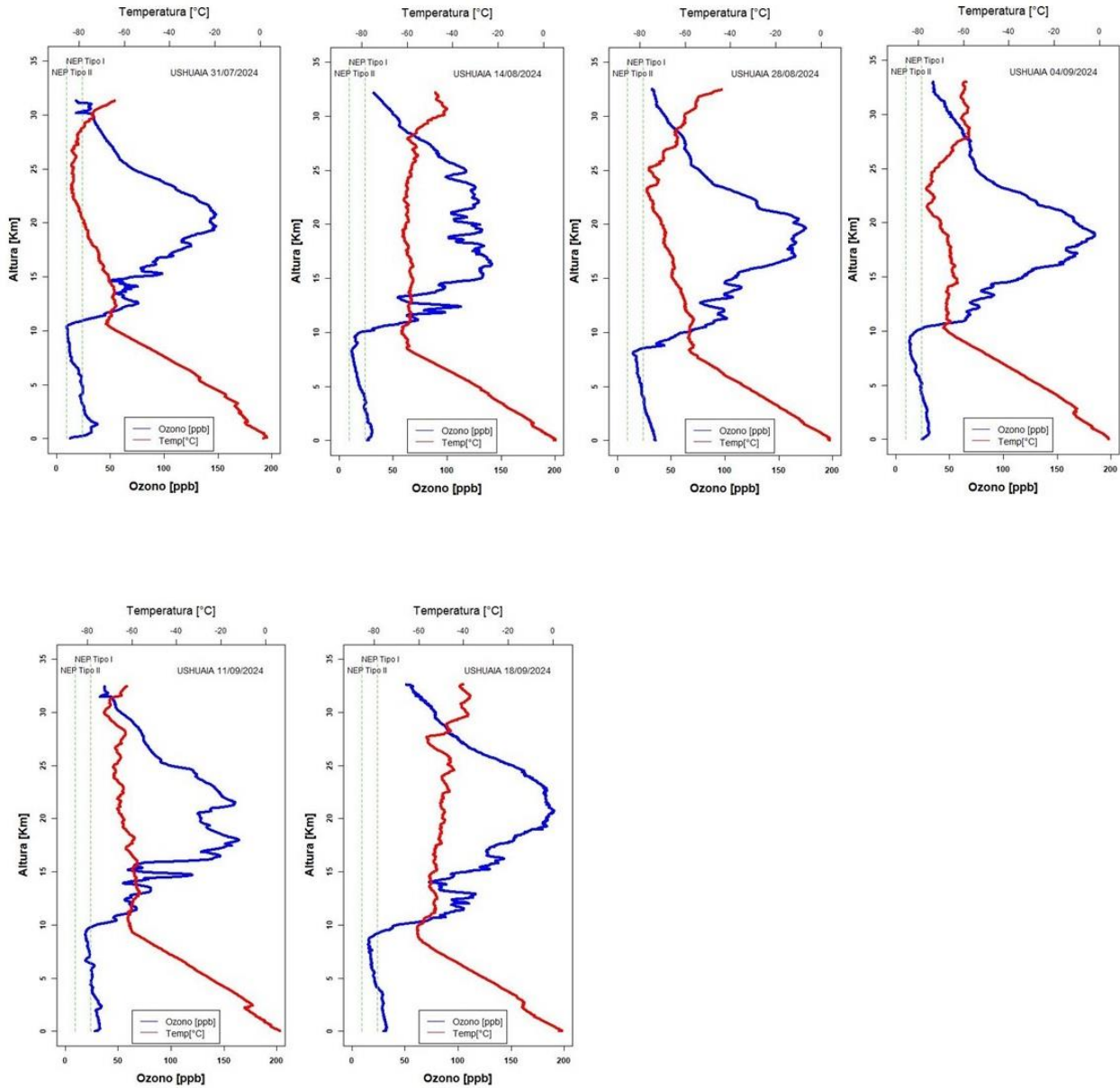


El espectrofotómetro Dobson (D131) mide todos los días y en la **Figura 8**, se muestra la evolución diaria (**a**) y mensual (**b**) de la columna total de ozono para el año 2024, comparado con su media histórica (1994-2023). Los datos diarios de ozono total, son muy acordes con los datos de ozono mínimo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

En la **Figura 9** se muestra los 5 perfiles de ozono y de temperatura, producidos por los ozonosondeos realizados el 31 de julio, 14 y 28 de agosto, y 4, 11 y 18 de septiembre. En los gráficos de muestra las temperaturas que están por arriba de la formación de la NEP, mientras que aún no se observa el paso del agujero de ozono, debido a que recién inicia su formación (tardíamente).



**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 período 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 atmósfera. 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 10** 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 17 de septiembre el consenso de los gráficos indica que están alrededor de los 19,81 millones de km<sup>2</sup>, apenas por encima de su media que es de 19,27 millones de km<sup>2</sup>.

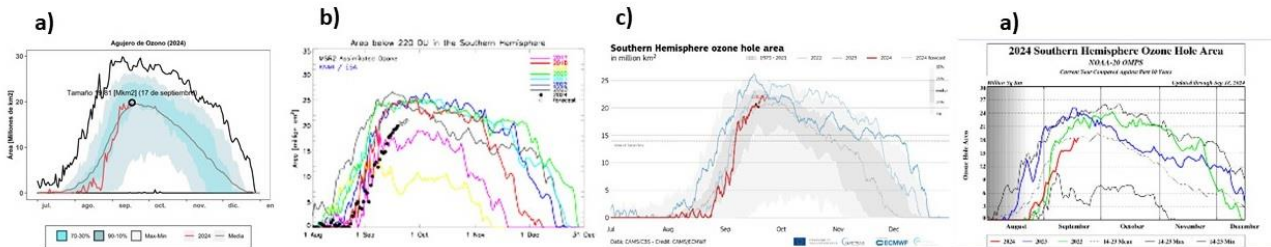
Fuente de datos:

[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>

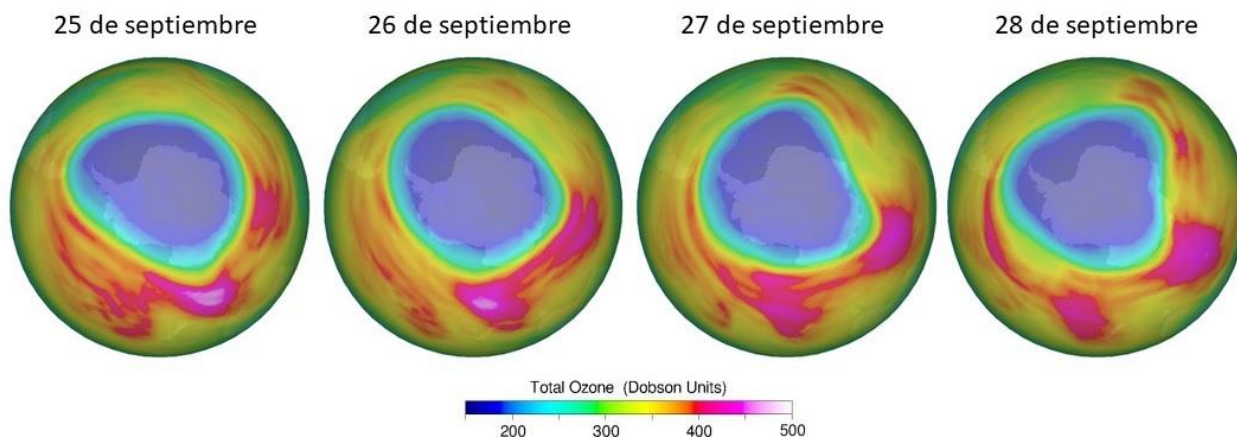
[https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar/gif\\_files/ozone\\_hole\\_plot\\_N20.png](https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar/gif_files/ozone_hole_plot_N20.png)



**Figura 10.** 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 la **Figura 11**, se observa los mapas proyectados para los próximos días, considerando una formación de NEP's poco habitual y un inicio de la formación del agujero de ozono tardío, debido que la estratosfera permanece caliente con respecto a su climatología. Todo lo anterior hace suponer que para este año 2024, el agujero de ozono será no muy grande, respecto a su normalidad y no tan profundo, es decir puede finalizar antes de la fecha en la que venía haciéndolo.





**Figura 11.** Proyecciones para los próximos 4 días a partir del día 25 hasta el 28 de septiembre y muestran la evolución y crecimiento del agujero de ozono.

## 6. CONCLUSION

El agujero de ozono se está actualmente desarrollando y la destrucción del ozono en la estratosfera Antártica ya está presente. A inicios del mes de julio se presenta una SSW que produce un disturbio importante en estratosfera Antártica. A estas fechas, las temperaturas en la estratosfera están volviendo a normalidad consecuencia de que el vórtice polar tiende a su estabilidad debido al poco movimiento de la onda 1, 2 y total. Pero ya poca producción de la NEP y ya se presenta una mayor destrucción de las mismas, en tal sentido solo hay liberación de cloro pero con moderada destrucción de ozono.

Se espera que el agujero de ozono continúe con su crecimiento, pero de una manera moderada a baja, así lo muestran las proyecciones a corto plazo.

## 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:

Se agradece a los observadores Antárticos de Belgrano II del Laboratorio LABEL;

## 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, e2020RG000708, 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.

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, e2020JD033271, 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.