



Servicio
Meteorológico
Nacional

BOLETIN 1 - TEMPORADA DEL AGUJERO DE OZONO 2024

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

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.

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. | 8 |
| 3. OBSERVACIONES DE OZONO | 11 |
| 3.1 Observaciones Satelitales. | 11 |
| 3.2 Estaciones en superficie. | 12 |
| 3.2.1 Estación VAG USHUAIA. | 12 |
| 3.2.2 Estación Antártica MARAMBIO. | 14 |
| 4. EL AGUJERO DE OZONO | 15 |
| 4.1 El área del agujero de ozono. | 15 |
| 5. CONCLUSIONES | 16 |
| 6. AGRADECIMIENTOS | 16 |
| 7. BIBLIOGRAFÍA | 17 |

RESUMEN.

El presente Boletín 1, 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) se encuentran altas, debido a un calentamiento súbito estratosférico, por lo que se producen menos Nueves Estratosféricas Polares. En este sentido, el agujero de ozono tiene una formación tardía, debido a la poca disponibilidad de compuestos destructores de ozono contenidos en sus reservorios. El calentamiento súbito estratosférico es producido por una gran actividad de onda que transporta gran cantidad de calor desde la troposfera. Los sistemas de medición son acorde con los valores de ozono mínimo en la estratosfera y las ozonsondas representan el calentamiento estratosférico sobre la estación VAG-Ushuaia e incluso un enfriamiento cuando la elongación del vórtice polar pasa por encima del sur de la Patagonia. Al tener una temperatura alta en la estratosfera hace que el vórtice polar, ente en fase negativa y se vuelva muy inestable. Esta situación es muy favorable para el tamaño del agujero de ozono que, actualmente es de 12,73 millones de km², con un contexto desfavorable para su desarrollo y poca profundidad, hasta el momento.

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

ABSTRACT.

The purpose of this bulletin is to provide an update on the evolution of the Ozone Hole over Antarctica for the year 2024. The minimum and zonal stratospheric temperatures (50 – 90°S) are high due to a sudden stratospheric warming, resulting in fewer Polar Stratospheric Clouds being produced and a late formation of the ozone hole. This is because there are low levels of ozone-destroying compounds in its reservoirs. The sudden stratospheric warming is caused by a significant wave activity that transports a large amount of heat from the troposphere. The measurement systems confirm the minimum ozone values in the stratosphere and the ozonesondes show the stratospheric warming over the VAG-Ushuaia station, even indicating cooling when the elongation of the polar vortex passes over southern Patagonia. The high stratospheric temperature leads to the polar vortex entering a negative phase and becoming very unstable. This situation is very favorable for the size of the ozone hole, which currently measures 12.73 million km². The unfavorable context and shallow depth so far indicate a limited development 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 CFC5. 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

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 polo. 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 el polo. 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 lo suficientemente fuerte 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 los efectos del 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 Boletín del Agujero de Ozono en la Antártida 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 activación química 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.

Haciendo un análisis de la temperatura mínima en la estratosfera del Hemisferio Sur (HS) a 50 hPa y las temperaturas zonales en latitudes polares (60° a 90°) a 50 y 10 hPa, se observa que la estratosfera en términos generales, está por arriba de su media (caliente) debido al calentamiento súbito estratosférico (en inglés, SWW) que se presenta en el mes de junio, incluso por arriba de la temperatura de formación de las Nubes Estratosféricas Polares (NEP Tipo I) (Ver [Figura 1](#)).

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

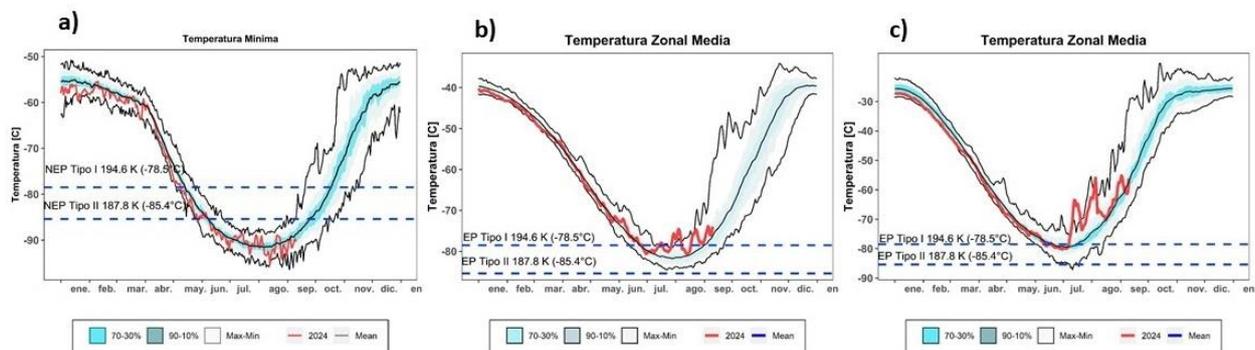


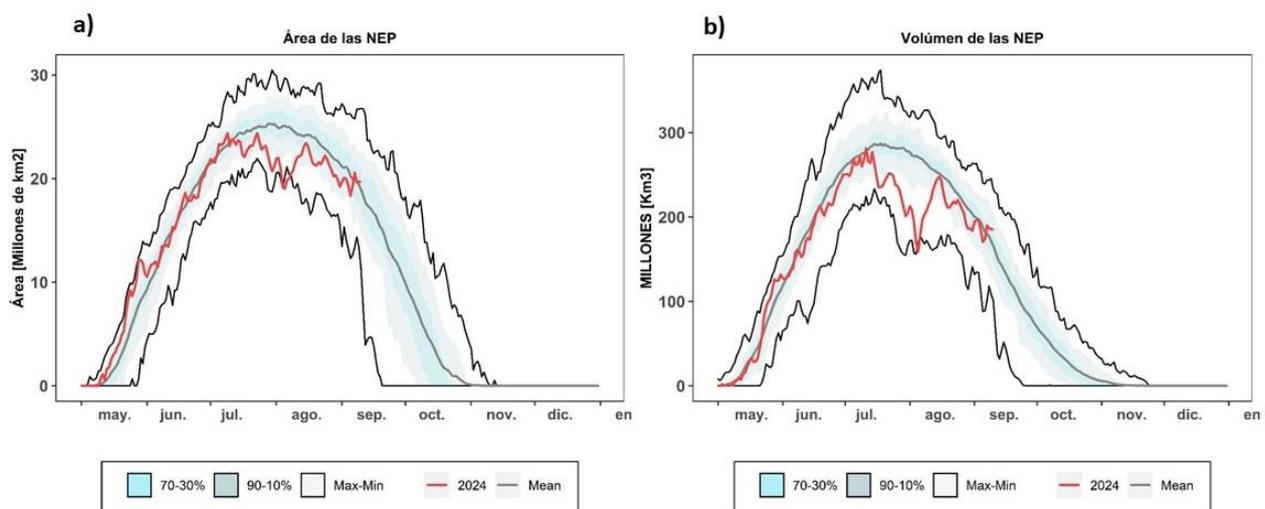
Figura 1. a) Temperatura mínima promedio en el HS a 50 hPa. **b)** Temperatura zonal Media a 50 hPa. **c)** Las temperaturas zonales Media a 10 hPa, sobre la región de 60° a 90° S. La línea color roja, representa la evolución de las temperaturas para el año 2024 hasta el 2 de septiembre. Las líneas externas 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 isentrópico 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.

En la **Figura 2** se puede observar que el área de las NEP para este año y hasta el momento (2 de septiembre), donde las NEP decaen, debido al SWW que se menciona anteriormente. Es decir, al no tener las temperaturas óptimas de formación, tanto julio y agosto, las NEP se encuentran en un nivel bajo y en algunos momentos tocando en ambas figuras, los mínimos históricos. Estas NEP son reservas los compuestos que destruyen la capa de ozono en la Antártida, por lo que hay poca disposición de ellos para reaccionar con el ozono.

Fuente de datos: https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/temp_2023_MERRA2_SH.html



Figuras 2. Área (a) y Volumen (b) de las nubes estratosféricas polares (NEP), sobre la región Antártica. La línea color roja, representa la el año 2024 hasta el día 2 de septiembre. 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 3** se muestra el desarrollo del flujo de calor. Lea el subtítulo para mayores detalles de cómo interpretar el gráfico.

Se puede observar que, desde mediados de enero, la estratosfera ya se encontraba con gran actividad, incluso los

valores de este año, están cercanos y en ocasiones rebasan los históricos.

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

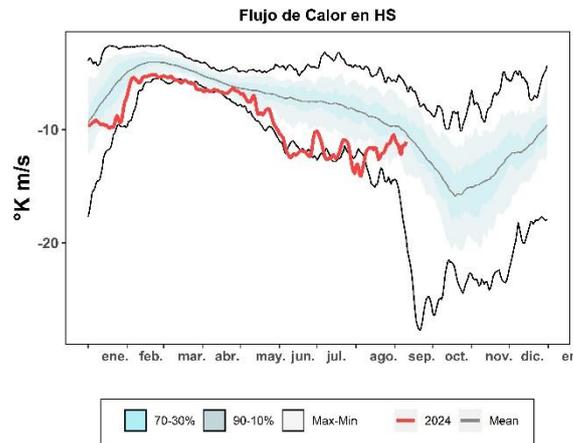


Figura 3. Serie de tiempo del flujo de calor meridional promediado sobre la región entre 45-75°S. La curva roja muestra los datos para 2024. Note que un gran número negativo significa un gran flujo de calor. Los valores cercanos a cero significan un flujo de calor pequeño. Las líneas externas y central 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 550°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 se estabiliza, además de que ya cubre el continente en su totalidad al continente Antártico (**a** y **b**).

En el gráfico del flujo Eliassen – Palm (E-P) de la onda total y se observa 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 (**c**). 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/>

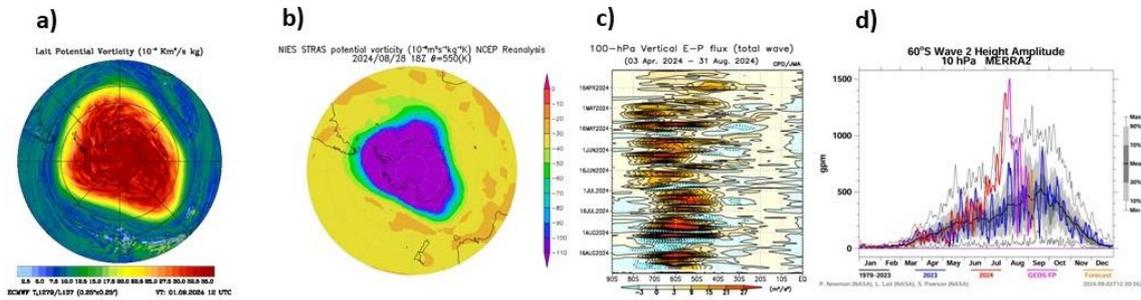


Figura 4. Mapas de Vorticidad Potencial (PV) a una altura isentrópica de 550°K. El mapa se construye con datos del ECMWF para el día 1 de septiembre (a). Después, el siguiente mapa (b) se construye con datos del NCEP para el día 28 de agosto. El flujo Eliassen-Palm de onda total se construye en la agencia de meteorología Japonesa (c). Finalmente, el disturbio atmosférico se observa en la amplitud de la onda 2 (d).

En la **Figura 5** se observa como el calentamiento hace desplazar al vórtice hacia el este y parte se introduce al sur de la Patagonia. Es muy probable que este efecto, junto con otros sistemas meteorológicos en la estratosfera, se asocie con las grandes nevadas que has sucedido en esas fechas de manera muy similar con las que ocurren en el Hemisferio Norte. Las temperaturas en la estratosfera continúan siendo altas e incluso por arriba de las temperaturas necesarias para la formación de las NEP y un nuevo sistema se conforma, que es una elongación del vórtice polar, que nuevamente toca a la sur de la Patagonia, lo que es confirmado por los ozonosondeos en Ushuaia.

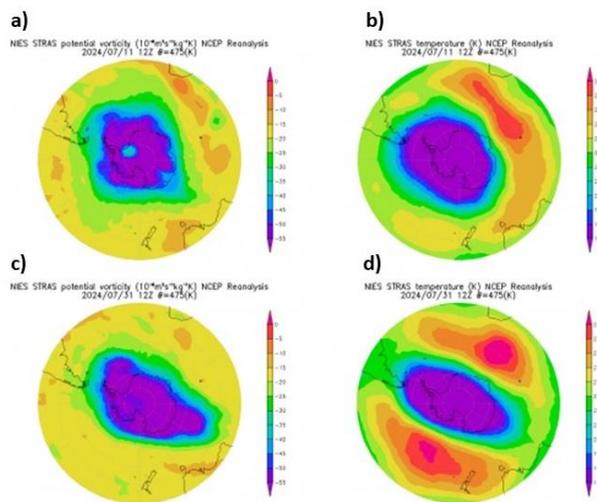


Figura 5. a), Campos de Potencial de Vorticidad y temperaturas en superficies isentrópicas a 475°K, para los días 11 (a y b) y 31 (c y d) respectivamente.

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 6** se muestra la columna de ozono mínimo en Hemisferio Sur (**a**) y el Ozono dentro de la capa polar (**b**) 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, un vórtice inestable, con una estratosfera por arriba de la media (caliente) y con bastante disturbio, es decir con alto flujo de calor, producen NEP muy por debajo de la media, debido al SSW a mediados del mes de julio. En este contexto se observa que, antes del SSW había bastante destrucción de ozono, un vez dado el evento de calentamiento en la estratosfera, el ozono se recupera y oscila alrededor de la media, en todo el hemisferio sur (**a**). Mientras que dentro de la capa polar, la destrucción de ozono estaba dentro de lo normal, después del SSW hay una clara recuperación de ozono e incluso hasta el momento se mantiene por encima de la media, incluso en algunos momentos por arriba del máximo histórico. Es decir, un evento de SSW es muy favorable para la poca formación de las NEP y por la tanto, hay pocas sustancias destructoras de ozono, se nota un crecimiento de ozono en la estratosfera.

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

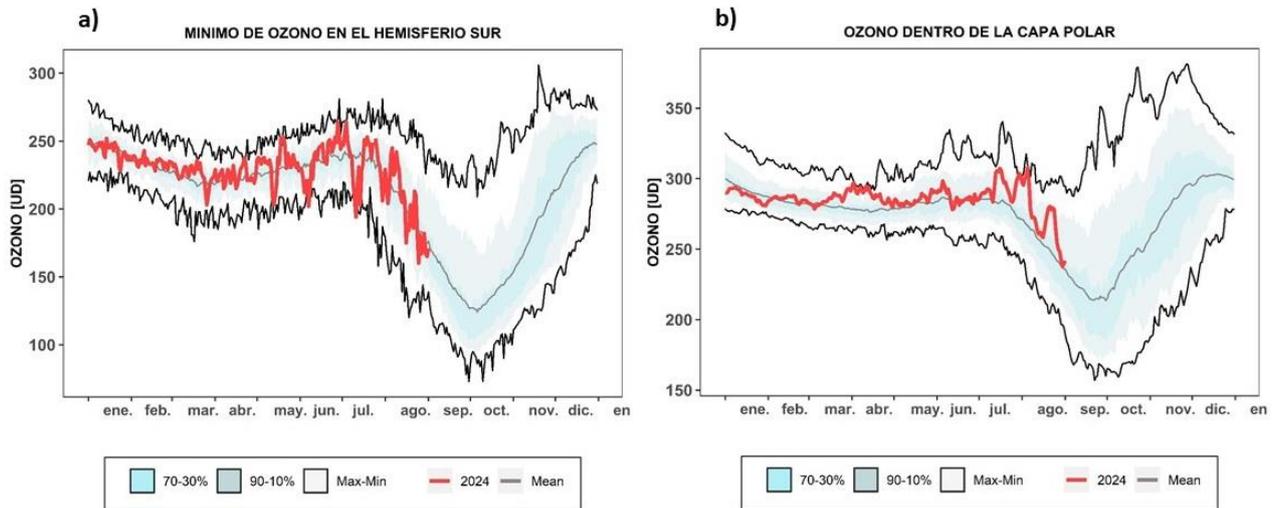


Figura 6. a), mínimo diario de la columna total de ozono en el hemisferio sur. **b),** es la columna total de ozono dentro de la capa polar. En ambos casos, la línea roja muestra el año 2024 hasta el 2 de septiembre. Las líneas media y externas negras, son los valores medios, máximos y mínimos, respectivamente, 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 ($54^{\circ} 50' 54.46''S$, $68^{\circ} 18' 37.52'' O$) Y mediciones con Espectrofotómetro Dobson de la Estación Antártica Marambio ($61^{\circ} 14' 33.68'' S$, $56^{\circ} 37' 36.98'' O$), dependientes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).

3.2.1. Estación VAG Ushuaia.



El espectrofotómetro Dobson (D131) mide todos los días y en la **Figura 7**, se muestra la evolución diaria de la columna total de ozono y las medias mensuales para el año en curso, comparado con su media histórica (1994-2023). Los datos diarios de ozono total, son muy acordes con los datos de ozono mínimo. Después del SWW los datos en su mayoría están por arriba de su media y algunos son valores menores, debido al paso del vórtice en fase negativa.

En la **Figura 8** se muestra los primeros 4 perfiles de ozono y de temperatura, producidos por los ozonosondeos realizados el 31 de julio, 14 y 28 de agosto, y 4 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).

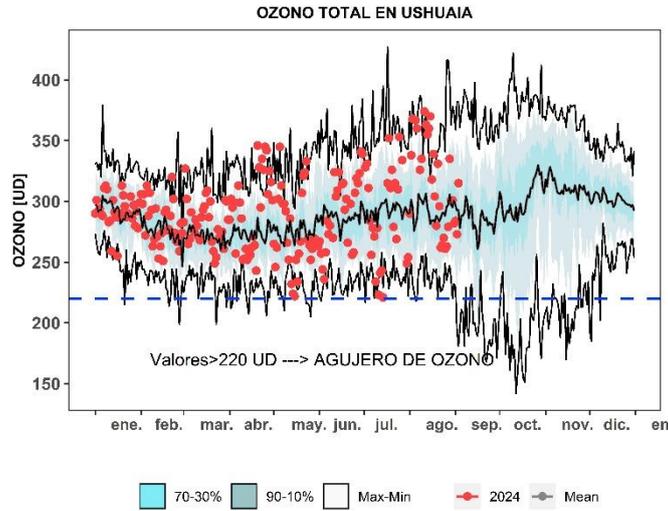


Figura 7. Datos de la columna Total de Ozono [UD] con el Espectrofotómetro Dobson en la estación VAG Ushuaia. Los puntos rojos son los datos del año 2024. Las líneas negras son la media, máximos y mínimos, en tanto los colores sombreados es la media del período 1994 a 2023. Las líneas sombreadas en azul-verde de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%.

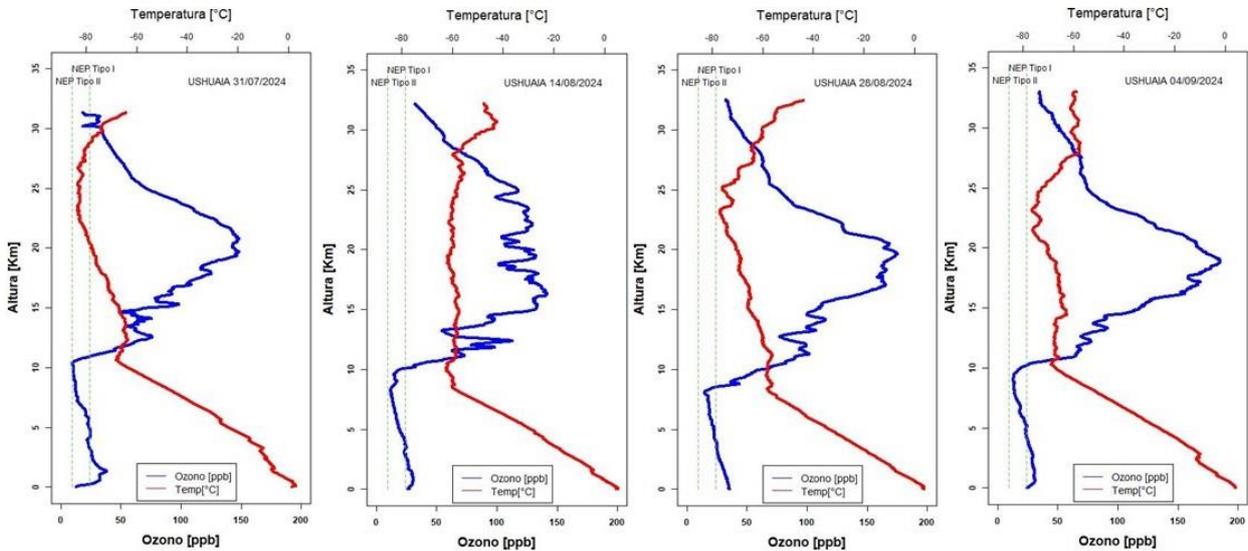


Figura 8. Ozonosondeos realizados en la Estación VAG de Ushuaia. En los dos gráficos, la línea azul es la relación de mezcla del ozono expresado en unidades partes por billón [ppb] en cada nivel de la atmósfera. Y la curva roja es el perfil de la temperatura en [°C].

3.2.1 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 ozono total se mide con espectrofotómetro Dobson, pero sus datos aún no están disponibles.

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 9**, que las medidas oscilan alrededor de la media del periodo 1979 a 2021 durante el primer periodo del año, mientras que en el mes de agosto, las pocas mediciones que se han podido hacer, se encuentran por encima de la media, indicativo que el agujero de ozono, aún está en desarrollo y no alcanza por completo la Península Antártica.

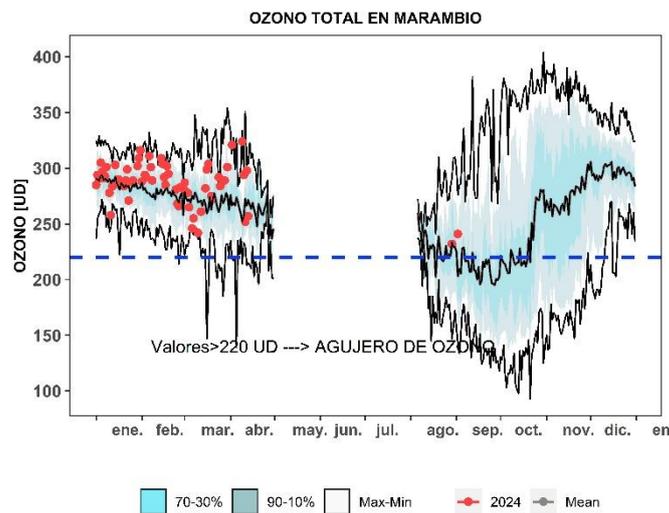


Figura 9. Medición de ozono total en la estación Antártica Marambio. Los puntos rojos son los datos del año 2024. Las líneas negras son la media, máximos y mínimos, en tanto los colores sombreados es la media del período 1994 a 2023. Las líneas sombreadas en azul-verde de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%.

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 reportan que, cualitativamente el comportamiento es muy similar y cuantitativamente difieren muy poco entre ellos. Hasta el 1 de septiembre el consenso de los gráficos indica que están alrededor de los 12 millones de km², por debajo de su media y dentro del percentil de los 75%.

Fuente de datos:

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

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

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

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

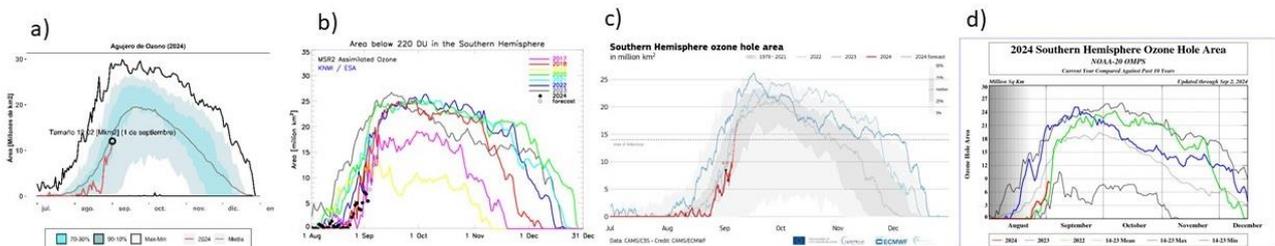


Figura 10. Área del Agujero de Ozono (millones de km²). **a)** Es el consenso de satélites de la NASA, EEUU (TOMS+OMI+OMPS). **b)** son datos del TEMIS, Datos de la ESA (Agencia Espacial Europea). **c)** El monitoreo del COPERNICUS ATMOSPHERE MONITORING SERVICE (CAM5) del Centro Europeo ECMWF. **d)** 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.

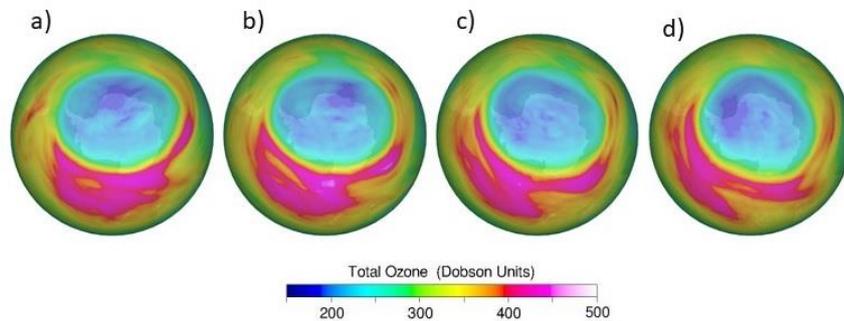


Figura 11. Proyecciones para los próximos 4 días a partir del día 10 hasta el 13 de septiembre y muestran la evolución y crecimiento del agujero de ozono.

6. CONCLUSION

El agujero de ozono se está actualmente desarrollando. 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.

Las temperaturas mínimas y zonales, muestran un calentamiento en la estratosfera antártica, por debajo de la media. Las NEP no se han formado como habitualmente lo hacen, debido a que se presenta un SSW a inicios del mes de Julio. El SSW genera una perturbación del vórtice polar lo cual hace que entre en fase negativa (se expande) y por algunos momentos, este sistema entra al sur de la Patagonia, lo cual es detectado por los ozonosondeos que se realizan en la estación VAG-Ushuaia. Los datos de ozono total de las estaciones VAG-Ushuaia y Marambio, son acordes a los valores mínimos que se presentan por los satelitales.

Se observa que el SSW se produce por una gran cantidad de flujo de calor que es transportado desde la troposfera hacia la estratosfera, que incluso hace que la amplitud de la onda-2 haya roto record de histórico desde que se tiene registro (1979 -2024). Se sabe que las ondas atmosféricas se producen por las diferencias de presión generados por el gradiente de temperatura de los océanos y el hielo en la Antártida, pero no se ha entendido este mecanismo del todo, por lo que es necesario continuar con las investigaciones para conocer su naturaleza.

Finalmente, la poca formación de las NEP que, son reservas de sustancias destructoras de ozono, esta temporada sea de agujero de ozono, no tan grande ni profundo, salvo que suceda una situación que pueda revertir esta situación, como un abrupto enfriamiento de la estratosfera.

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 ozonosondas 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

- 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.
-
- Geir Braathen, “Boletín de Ozono Antártico”, Editado por la WMO.
- Newman (NASA), E. Nash (SSAI), R. McPeters (NASA), S. Pawson (NASA) National Aeronautics and Space Administration - Goddard Space Flight Center - NASA Ozone Watch.
- 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.
- H. J. Eskes, R. J. van der A, E. J. Brinksma, J. P. Veefkind, J. F. de Haan, and P. J. M. Valks, Retrieval and validation of ozone columns derived from measurements of SCIAMACHY on Envisat, *Atmos. Chem. Phys. Discuss*, 5, 4429-4475, 2005.
- 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.
- E. Botek, S. Chabrillat, Y. Christophe (BIRA-IASB) “Report on 2014 Antarctic ozone hole studies” MACC-III project (Monitoring Atmospheric Composition and Climate - III) 2014.
- Scientific Assessment of Ozone Depletion 2018 – Executive Summary – WMO UNO environment, NOAA, NASA, European Commission.
- Manuel Gil Ojeda “El ozono estratosférico” *Tethys*, 3, 47–58, 2006. DOI:10.3369/tethys.2006.3.06.

- Carbajal Benítez Gerardo, Facundo Orte, Elian Wolfram, Eduardo Luccini y Fernando Nollas. Boletines 1, 2, 3, 4 e Informe Final del Agujero de Ozono 2019.
- Karpechko, A., Y. (2020). Jet stream stops shifting as ozone layer recovers, Nature, Vol 579, 544-501.
- Solomon, S. (2019). The discovery of the Antarctic ozone hole, Nature, Vol 575, 46-47.
- 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