



Servicio
Meteorológico
Nacional

BOLETIN 1 - TEMPORADA DEL AGUJERO DE OZONO 2022

Gerardo Carbajal Benítez¹, Héctor Ochoa^{2,3}, María Elena Barlasina¹, Eduardo Luccini^{4,5}, Facundo Orte⁶, Elian Wolfram^{1,6} y Héctor Estévez Pérez⁷.

1. Servicio Meteorológico Nacional, Argentina.

2. Dirección Nacional del Antártico / Instituto Antártico Argentino.

3. Universidad Tecnológica Nacional FRBA, Argentina.

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

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

6. CEILAP, UNIDEF (CITEDEF-CONICET), Argentina.

7. Instituto de Geofísica, UNAM, México.

Septiembre, 2022



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.	9
3. OBSERVACIONES DE OZONO	10
3.1 Observaciones Satelitales.	10
3.2 Estaciones en superficie.	11
3.2.1 Estación VAG USHUAIA.	12
3.2.2 Estación Antártica MARAMBIO.	13
3.2.3 Estación Antártica San Martin	14
3.2.4 Estación Antártica Belgrano II	15
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 1, tiene por objetivo, establecer la evolución del Agujero de Ozono sobre la Antártida para el año 2022. La temperatura de la estratosfera mínima y zonal (50 – 90°S) se vio afectada a mediados del mes de enero (17 y 18 de enero) de tal manera que enfrió la estratosfera y esta permaneció por debajo de la media y muy cercano a los mínimos del periodo 1979 al 2020. Un evento de calentamiento se observó a inicios del mes de agosto, debido a que se intensificó el flujo de calor que viene desde el trópico, a través de ondas atmosféricas. Posteriormente, la intensidad del flujo de calor disminuye y la estratósfera nuevamente se enfría. Las Nubes Estratosféricas Polares (NEP) se forman durante inicios del invierno Antártico y superan la media del periodo 1979 a 2021, pero debido a la intensidad del flujo de calor, estas disminuyen abruptamente en su área y volumen, pero no alcanzan la media del periodo 1979 a 2021 y oscilan muy cercano al año pasado 2021. Las NEP han alcanzado su máxima extensión en área (27,79 km²) y volumen (287,80 millones de km²) para el día 14 y 13 de agosto, respectivamente. Pero aún permanecen las Tipo I y Tipo II en la Estratosfera Antártica. La destrucción de ozono ya se encuentra presente debido a la liberación poco a poco de las sustancias agotadoras de ozono (Destrucción de las NEP), como el óxido de cloro (ClO). Si analizamos el ozono en la estratosfera de la Antártida, muestran que hay más destrucción que la media del periodo 1979 a 2021, producto muy probable de la erupción del volcán Tonga que origino el enfriamiento estratosférico, alta formación de las NEP y poco flujo de calor. El área Agujero de Ozono, hasta el 27 de agosto es de 10,87 millones de km², por encima de su media hasta ese día que es 10,4 millones de km², Aún es muy temprano para establecer la tendencia y desarrollo del agujero de ozono hasta el final de la temporada.

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

ABSTRACT.

The objective of this Bulletin 1th is to establish the evolution of the Ozone Hole over Antarctica for the year 2022. The temperature of the minimum and zonal stratosphere (50 – 90°S) was affected in mid-January (17 and January 18) in such a way that it cooled the stratosphere and it remained below the average and very close to the minimum of the period 1979 to 2021. A warming event was observed at the beginning of August, because it intensified the flow of heat that comes from the tropics, through atmospheric waves. Subsequently, the intensity of the heat flux decreases, and the stratosphere cools again. The Polar Stratospheric Clouds (PSCs) form during the beginning of the Antarctic winter and exceed the average for the period 1979 to 2021, but due to the intensity of the heat flux, they abruptly decrease in area and volume, but do not reach the average for the period 1979 to 2021 and oscillate very close to the last year 2021. The NEP reached its maximum extension in area (27.79 km²) and volume (287.80 million km²) on August 14 and 13, respectively. But Type I and Type II remain in the Antarctic Stratosphere. Ozone destruction is already present due to the gradual release of ozone-depleting substances (NEP Destruction), such as chlorine oxide (ClO). If we analyze the ozone in the Antarctic stratosphere, they show that there is more destruction than the average for the period 1979 to 2021, a very likely product of the eruption of the Tonga volcano that caused stratospheric cooling, high formation of NEP, and little heat flux. . The Ozone Hole area, until August 27, is 10.87 million km², above its average until that day, which is 10.4 million km². It is still too early to establish the trend and development of the ozone hole.

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

ANTECEDENTES.

El descubrimiento de un agujero de la capa de ozono durante la primavera en la Antártida a mediados de la década de 1980, reveló la amenaza que representan las sustancias que agotan la capa de ozono producidas por el hombre. El daño causado por estos compuestos expone a las personas y los ecosistemas de la Tierra a la dañina radiación ultravioleta. Dentro de los 10 artículos más relevantes de la revista **nature**, se encuentra “El Descubrimiento del Agujero de Ozono en la Antártida” que cambió la perspectiva de las ciencias de la atmósfera y arrojó una de las políticas ambientales más exitosas de la historia, a nivel mundial, como lo es el **Protocolo de Montreal**. En 1985 Joe Farman, Brian Gardiner y Jonathan Shanklin reportan con 20 años de datos de ozono total de las Estaciones Antárticas Haley y Faraday, que los niveles de ozono comenzaron a descender (Agujero de Ozono) en los meses de primavera austral hacia fines de la década de 1970. Ellos sugieren y atribuyen a que esa disminución de ozono se debe a compuestos de origen antropogénico llamados Clorofluorocarbonos (CFC's) los cuales provienen del uso de aerosoles y accesorios para refrigerar. 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 Antártica a 50 hPa., las temperaturas zonales en latitudes polares (60° a 90°) a 50, encontramos que la temperatura en la estratosfera a lo largo de lo que va del año han sido bajas, seguramente debido a la erupción del volcán Tonga a finales del mes de enero. Posteriormente se observa un calentamiento estratosférico abrupto a inicios del mes de agosto, pero no se mantiene y la estratosfera se vuelve a enfriar y continua así hasta la fecha (*Figura 1*).

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

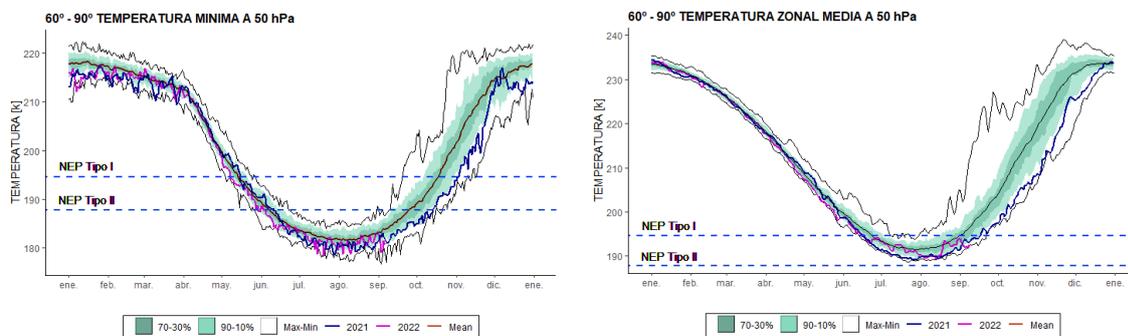


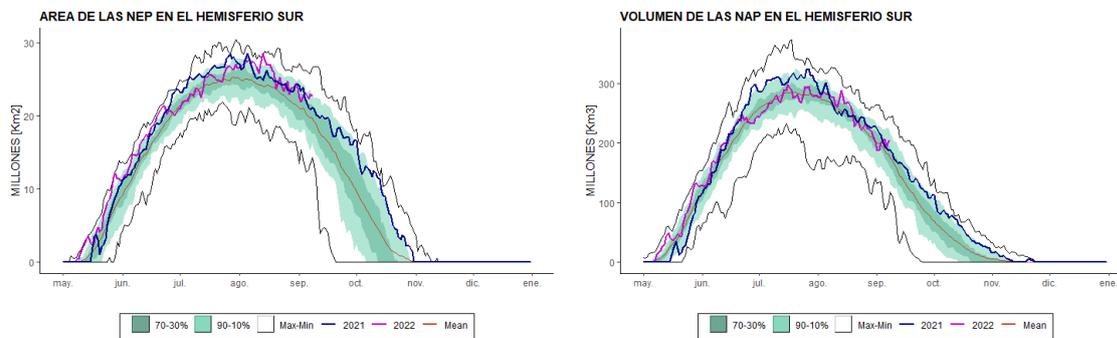
Figura 1. *Izquierda:* Temperatura mínima promedio a 50hPa. *Derecha:* Temperatura zonal a 50 hPa. Las temperaturas zonales sobre la región de 50° a 90° S. La línea color marrón y azul, representa la evolución de las temperaturas para el año 2022 hasta el 30 de agosto. La línea roja representa la media del periodo, 1979 a 2021. Las líneas externas negras, son los máximos y 1 mínimos del mismo periodo. Los sombreadas en azul-verde de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%. Las líneas rectas punteada representan las nubes NEP tipo I 194,6 K (arriba) y NEP tipo II 187,8 (abajo)

2.2 Área y Volumen de las NEP.

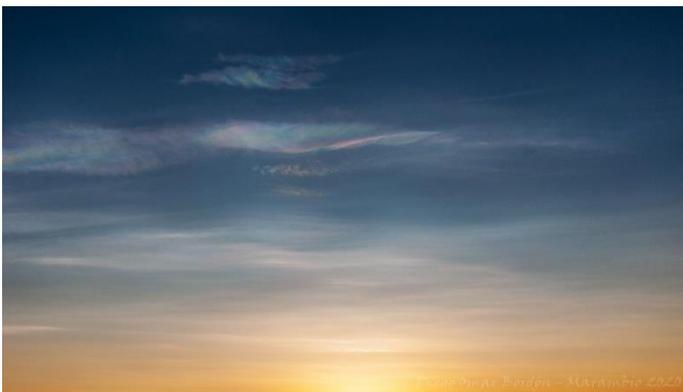
Las Nubes Estratosféricas Polares (NEP) se forman a través de las bajas temperaturas en la estratosfera; se considera Tipo I (ácido nítrico trihidratado) las que se forman a partir de una temperatura mínima inferior a 194,6 K (-78,5°C) a nivel isentrópico de 460 K y las Tipo II por debajo de los 187,7 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 (30 de agosto), donde las NEP han alcanzado su máxima extensión en área (27,79 km²) y volumen (287,80 millones de km³) para el día 14 y 13 de agosto. Mientras que a mediados de agosto, la curva para este año oscila al redor de la media y es muy similar al del año 2021.

Fuente de datos: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar/polar.shtml>



Figuras 2. Área de las nubes estratosféricas polares (NEP), sobre la región Antártica. La línea color marron, representa la evolución del tamaño de las NEP para el año 2022 hasta el día 30 de octubre. La línea roja representa la media del periodo 1979 a 2021, la línea azul es el año 2021. Las líneas externas negras, son los valores máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2019. Las líneas sombreadas en azul-verde de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%.



Nubes Estratosféricas Polares (NEP). Fotos: Sr. Diego Bordón, Pabellón Científico de la Estación Antártica Marambio, SMN 2020.

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 en la **Figura 3** que después de la segunda quincena de agosto, un aumento del flujo de calor que dura aproximadamente 8 días, producto de una intensa actividad de ondas atmosféricas (Ver en la figura 4).

que poco flujo las dos últimas semanas de agosto, por arriba de su media, pero siguiendo la curva del año 2021.

Fuente de datos: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/polar/polar.shtml>

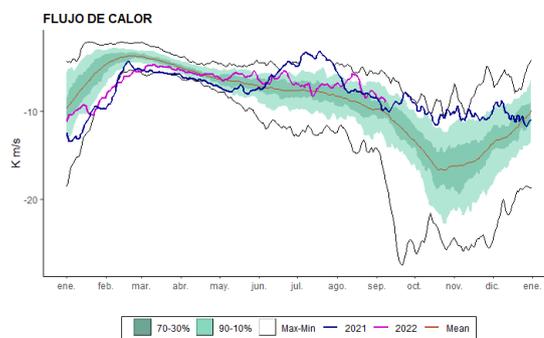


Figura 3. Serie de tiempo del flujo de calor. La curva marrón muestra los datos para 2022 (hasta el 30 de agosto), la línea azul corresponde al año 2021 y las líneas externas negras, son los valores máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2019. Las líneas sombreadas en azul-verde de adentro hacia fuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%. Note que un gran número negativo significa un gran flujo de calor. Los valores cercanos a cero significan un flujo de calor pequeño o calma

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 475K, 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 Antártico.

En el gráfico del flujo Eliassen – Palm (E-P) se observa que después de la primera quincena de agosto, la actividad de onda se intensifica y produce una perturbación dentro del vórtice, que tiene como consecuencia que, aumente la temperatura en la estratosfera polar y se destruya las NEP. Este evento solo duro aproximadamente 6 días.

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/>

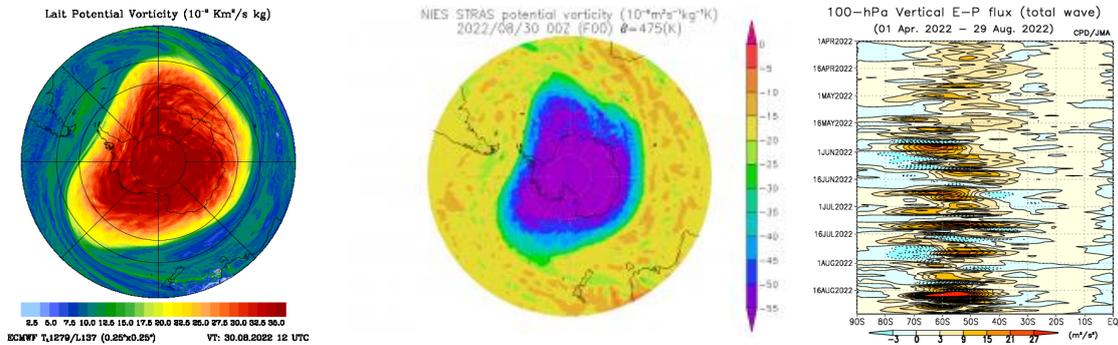


Figura 4. Mapas de Vorticidad Potencial (PV) a una altura isentrópica de 475 K. Para el día 30 de agosto. **Izquierda,** el mapa se construye con datos del ECMWF. **Centro,** el mapa se construye con datos del NCEP. **Derecha,** es la actividad de onda atmosférica desde abril de este año.

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. 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 5** se muestra la columna de ozono mínimo en Hemisferio Sur (HS) y el Ozono dentro de la capa polar del 2022, tal como han sido medidas por el TOMS, OMI y OMPS, en comparación con su media del periodo 1979 a 2021.

Tal como se observó anteriormente, un vórtice estable, con una estratosfera fría y en calma, es decir con muy poco flujo de calor, producen NEP por arriba de la media y muy cercano a los máximos, generan los ingredientes propicios para una mayor destrucción de ozono. El ozono mínimo en HS se encuentra oscilando alrededor de la media, al igual que el año 2021. El ozono, dentro de la capa polar, se observa una recuperación después de mediados de agosto, producto del calentamiento de la estratosfera y posteriormente oscila en la media y muy parecido al año 2021.

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

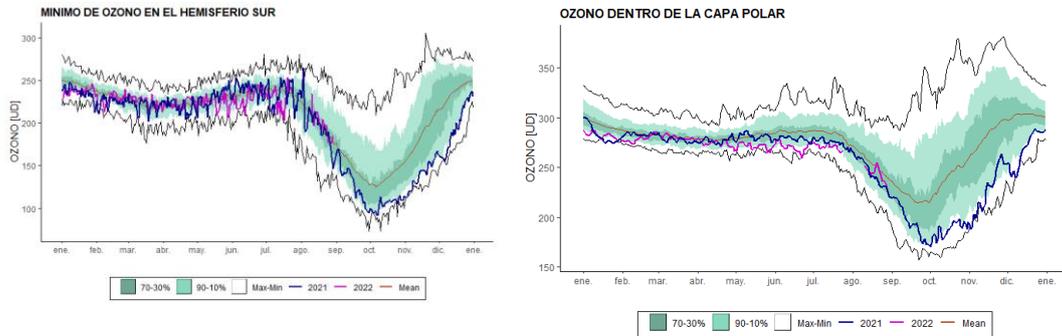


Figura 5. Izquierda, mínimo diario de la columna total de ozono en el hemisferio sur. **Derecha,** es la columna total de ozono dentro de la capa polar. En ambos casos, la línea violeta muestra el año 2022 hasta el 30 de agosto, la línea azul representa al año 2021. La línea roja es la media del periodo 1979 a 2021. Las líneas externas negras, son los valores máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2019. 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) 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' o8'' 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 6**, 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 (1994-2021). Los datos diarios oscilan como todos los años, con gran amplitud y alrededor de la media, en algunos casos los valores están por debajo del umbral de los 220 UD, tal es el caso de los días 21 y 28 de agosto (215 y 211 UD, respectivamente)

En la **Figura 7** se muestra los primeros 3 perfiles de ozono y de temperatura, producidos por los ozonosondeos realizados el 27 de julio, 10 y 24 de agosto. El día 27 de julio muestra una temperatura inferior a los $-78,5^{\circ}\text{C}$ y muy cercano a los -85°C , en tal sentido se observaron en el sur de la Patagonia (Tierra del Fuego y Punta Arenas) Nubes Estratosféricas Polares, muy inusual su formación en estas latitudes, derivando en varias notas periodísticas.

<https://www.meteored.cl/noticias/actualidad/julio-2022-inusuales-nubes-nacaradas-estratosfericas-polares-se-dejaron-ver-en-la-patagonia.html>.

<https://www.elpais.com.uy/informacion/sociedad/nubes-estratosfericas-polares-aparecieron-argentina-son-son-peligrosas.html#>.

<https://www.elobservador.com.uy/nota/las-nubes-de-colores-que-asombran-en-el-sur-de-argentina-por-que-son-peligrosas--202281203212>.

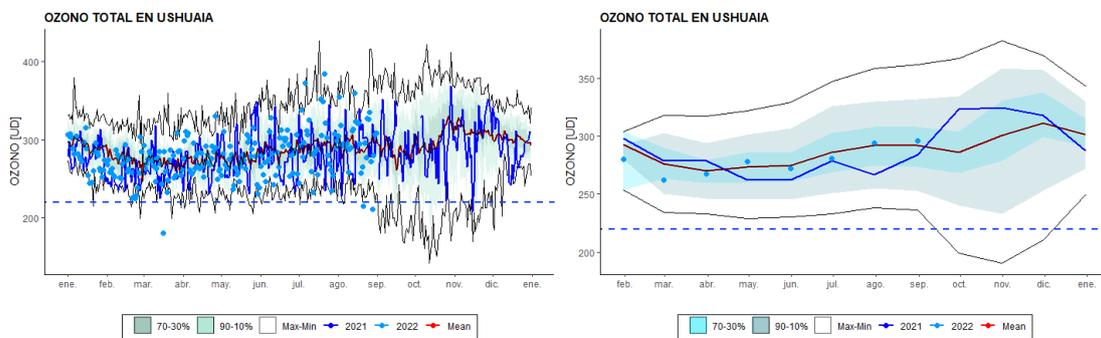


Figura 6. Datos de la columna Total de Ozono [UD] con el Espectrofotómetro Dobson en la estación VAG Ushuaia. En ambos gráficos los puntos rojos son los datos del año 2021. La línea naranja corresponde al año 2020, la línea negra la media del período 1994 a 2020.

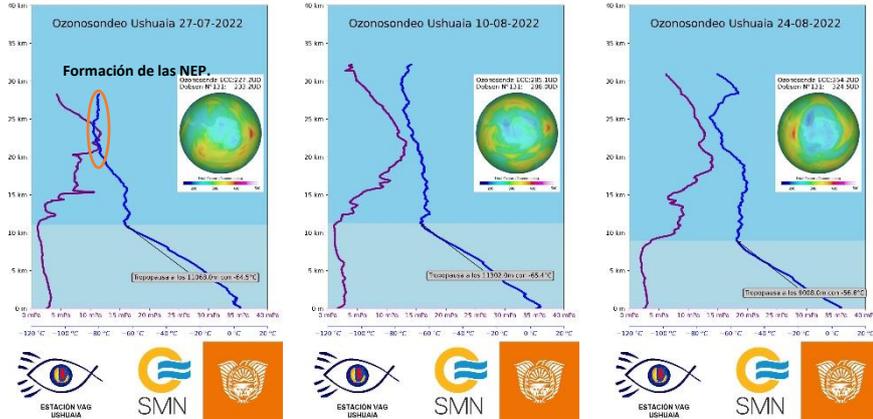


Figura 7. Ozonosondeos realizados en la Estación VAG de Ushuaia. En los dos gráficos, la línea morada es la relación de mezcla del ozono expresado en unidades partes por billón [ppb] en cada nivel de la atmósfera. Y la curva roja es el perfil de la temperatura en [°C].

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 8**, 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.

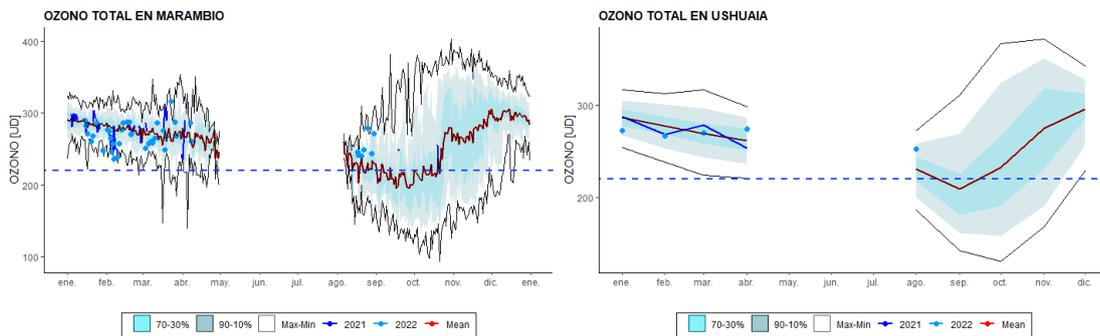


Figura 8.

Medición de ozono total en la estación Antártica Marambio Derecha, valores diarios. Izquierda, Promedios mensuales.

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.



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

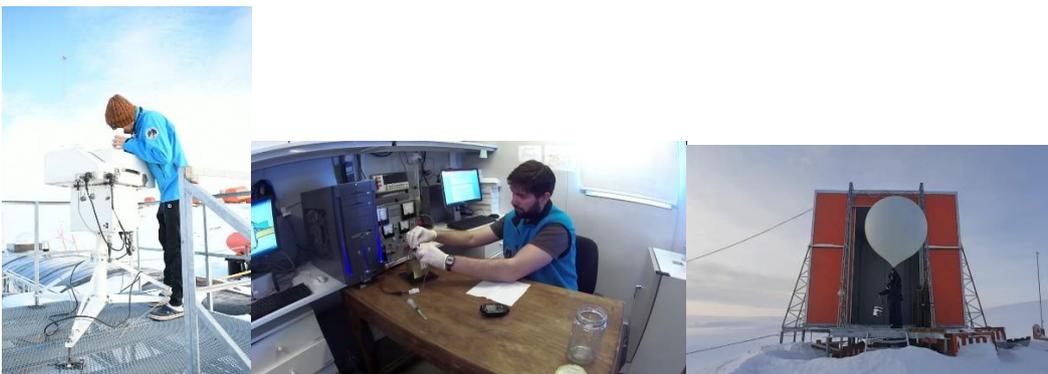
3.3.4 Estación Antártica Belgrano II.



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).

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

Belgrano salió de la noche polar a mediados de agosto y los instrumentos como el Brewer, no pueden operar por tener aún un ángulo solar muy alto. Por eso, al igual que Marambio y San Martín, se espera que el programa de medición inicie, según las condiciones meteorológicas lo permitan.



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

4. El Agujero de ozono

4.1 El área del agujero de ozono

En la **Figura 9** se muestra el área de la región en la que el ozono total es menor a las 220 UD (Definido por la comunidad científica como Agujero de Ozono). Actualmente, hasta el 30 de agosto es de 13,8 millones de km², por encima de su media hasta ese día que es 12,3 millones de km².

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

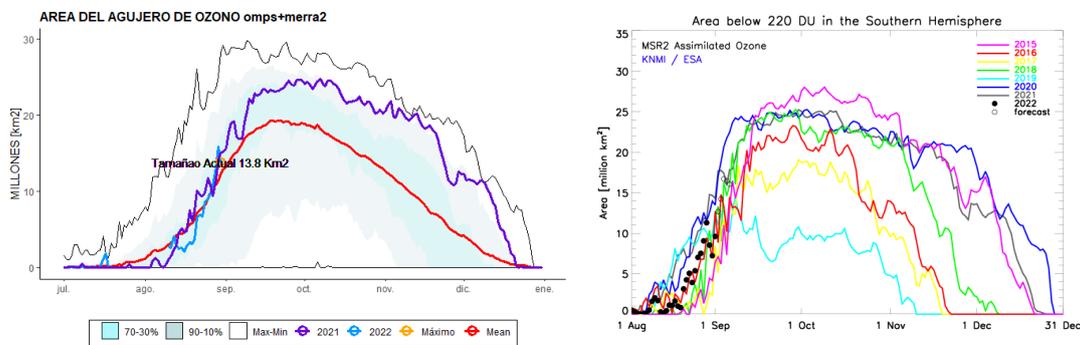


Figura 9. Área (millones de km²) donde la columna total de ozono es menos de 220 unidades Dobson, hasta el 4 de septiembre. Izquierda; Satélites de la NASA, EEUU (TOMS+OMI+OMPS). Derecha, Datos de la ESA (Agencia Espacial Europea).

En la figura 10, se observa de manera global, el crecimiento del agujero de ozono durante los próximos 5 días (del 6 al 9 de septiembre).

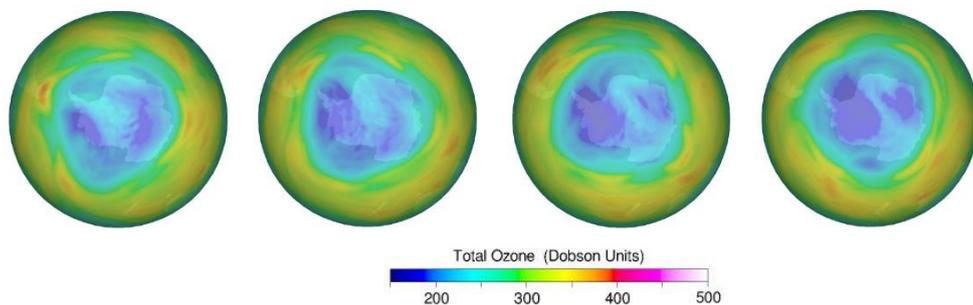


Figura 10. Proyecciones para los próximos 4 días a partir del día 6 de septiembre y muestran la evolución y crecimiento del agujero de ozono.

Animación de la evolución del agujero de ozono, sede 1 de Julio hasta a fecha:

https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/ozone_maps/movies/OZONE_D2022-07-01%25P1D_G%5e1280X720.IOMPS_PNPP_V21_MMERRA2_LSH.mp4

6. CONCLUSION

La destrucción de ozono en la estratosfera antártica ya ha comenzado. 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, para formar el agujero de ozono antártico.

Las temperaturas mínimas muestran un enfriamiento en la estratosfera antártica, por debajo de la media. Las NEP se han formado y se encuentran por arriba de la media histórica de tal manera que se ha iniciado la activación química del agujero de ozono, es decir especies de cloro han iniciado las reacciones catalíticas de destrucción de ozono. Las observaciones en superficie aún no han empezado a medir, con excepción de Marambio y Ushuaia. El agujero de ozono se encuentra ya formado y creciendo, hasta el 30 de agosto tiene una superficie de 13,8 millones de km².

El próximo boletín se estima ostra publicado antes del día 14 de septiembre 2022.

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).

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

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

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

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

Se agradece a los observadores Antárticos del Pabellón Científico de Marambio; **Sr. Pedro Díaz y Diego Bordón.**

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

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

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