

# Monitoreo de la capa de ozono austral

Carbajal Benitez Gerardo<sup>1</sup>, Skansi María de los Milagros<sup>1</sup>, Marincovich Giselle<sup>1</sup>,  
Quarin Fransisco<sup>1</sup>, Nollas Fernando<sup>1</sup>, Papandreas Sebastian<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Servicio Meteorológico Nacional, Argentina. Av. Dorrego 4019, CABA, C1425GBE,  
Argentina.

[gcarbajal@smn.gob.ar](mailto:gcarbajal@smn.gob.ar)

**Abstract.** El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) lleva a cabo mediciones de ozono total y perfil vertical de ozono para monitorear la capa de ozono y la radiación UV. Con 38 años de datos en la Estación Antártica Marambio y 30 años en la estación VAG-Ushuaia, estas mediciones son esenciales para comprender la dinámica y evolución del ozono estratosférico. En colaboración con instituciones internacionales y el gobierno local, el SMN contribuye significativamente al monitoreo del adelgazamiento de la capa de ozono durante la primavera austral. Estos esfuerzos conjuntos no solo proveen información vital sobre el estado actual de la capa de ozono, sino que también respaldan la investigación y la protección de la salud humana frente a los daños causados por la radiación UV. Los resultados de estas mediciones proveen información clave para validar los esfuerzos globales por restaurar la capa de ozono (Convenio de Viena y Protocolo de Montreal).

**Keywords:** Capa, Perfiles, Ozono, Dobson, Ozonosondas, Marambio, Ushuaia.

## 1 Introducción

El protocolo de Montreal es considerado el acuerdo internacional con mayor éxito en cuanto Medio Ambiente, debido al compromiso de los países que firmaron el compromiso de reducir la aminos a la atmosfera de los compuestos destructores de ozono en la estratosfera, como los clorofluorocarbonos (CFC's) en el año de 1987. Con el descubrimiento del Agujero de Ozono Antártico a mediados de la década de los 80's, reveló la amenaza que representan éstas sustancias producidas sintéticamente por el hombre. El daño causado por estos compuestos expone a las personas y los ecosistemas de la Tierra a la dañina radiación ultravioleta (UV).

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 CFC 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

2        **Carbajal Benitez Gerardo<sup>1</sup>, Skansi María de los Milagros<sup>1</sup>, Marincovich Giselle<sup>1</sup>, Quarin Francisco<sup>1</sup>, Nollas Fernando<sup>1</sup>, Papandreas Sebastian<sup>1</sup>.**

país en la emisión de CFC. 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.

Para el final del siglo XX, se tiene la certeza de que, durante el verano, la corriente en chorro dentro de 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 [1].

Este trabajo tiene como objetivo, mostrar y analizar el monitoreo de la capa de ozono en la Antártida, así como establecer las causas principales que lo originan [2,3].

## **2 Metodología.**

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se une al programa Vigilancia Atmosférica Global de la Organización Meteorológica Mundial (VAG/OMM) que consiste en una red de medición de parámetros físicos y químicos de la atmósfera, que afectan al clima.

### **2.1 Datos de Observaciones**

#### **2.1.1 Estación VAG-Ushuaia**

Este programa VAG o GAW (En inglés, Global Atmospheric Watch) dio origen a la creación e implementado en la estación VAG-Ushuaia en 1994, a través de un convenio con la Provincia de Tierra del Fuego e Islas Antárticas (PTFIA) y el SMN, con la finalidad de monitorear principalmente el agujero de ozono con Espectrofotómetro Dobson #131 (Periodo: 1994-actualidad) y posteriormente, se agregan ozonosondeos (Periodo: 2008-actualidad), con un convenio con el INTA y AEMET de España en el año 2008. Esta estación se encuentra en las orillas del vórtice polar y que por su situación geográfica (54°84'84"S, 68°31'06"O) de background (line base) es ideal para implementar los programas de medición de radiación solar, gases reactivos y de invernadero, además aerosoles. De esta manera cumple con los requisitos establecidos por el programa VAG para denominarle Estación Global, y por su ubicación es la más austral en el Hemisferio Sur (HS) seguidas por Cape Grim en Australia y Cape Point en Sudáfrica.

#### **2.1.2 Estación Antártica Marambio**

La Estación Antártica Marambio, inicia formalmente la medición de ozono estratosférico en el año 1987 con el espectrofotómetro Dobson #099 (1987-actualidad) y se agrega la medición de perfiles de ozono con ozonondas (Periodo: 1988-2019), mediante un convenio con el Instituto Finlandés de Meteorología (IFM). La estación se encuentra en la Península Antártica, en la isla de Seymour (64°24'00"S, 56°62'47"O)

**¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar title al texto que desea que aparezca aquí.**

3

y como toda estación Antártica se supone libre de contaminación e ideal para mediciones tipo background. Marmbio está catalogada en red VAG como regional (No global) debido que en su momento no cumplía con todos los programa de medición, pero actualmente se miden, además de la capa de ozono, radiación solar, gases reactivos y de invernadero, además aerosoles. La estación durante el invierno y la primavera, la mayor parte del tiempo, se encuentra influenciada por el vórtice polar y por el agujero de ozono, lo que permite monitorear la pérdida y transporte de ozono en la Antártida.

## **2.2 Datos satelitales**

Los datos se obtienen del portal web Goddar Space Flight Center de la NASA Ozone Watch (<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/monthly/SF.html>), donde se muestra diariamente la evolución de parámetros estratosféricos a través de series de tiempo, que se comparan con su estadística histórica (1979-actualidad) [2].

Otro portal donde se ofrecen datos y productos similares pero procesados de manera diferente es en el “US National Centers for Environmental Prediction (CPC/NCEP)” (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/>)

La Agencia Espacial Europea (eesa) a través del portal Tropospheric Emission Monitoring Internet Service (TEMIS) que tiene como anfitrión al Instituto de Países Bajos de Meteorología (KNMI) y es de los más completos, ofrece los datos productos de ozono total y radiación ultravioleta de los satélites europeos SCIAMACHY, GOME y GOME-2 (<https://www.temis.nl/index.php>) [3,4].

## **2.3 Datos de modelos y reanálisis**

Este tipo de datos y productos se usan para el monitoreo de la capa de ozono, tanto para generar estadísticas como predicciones, tanto la parte química y la dinámica en la estratosfera Antártica.

Los datos del Centro de Europeo de Predicción a Mediano Plazo (en inglés, ECMWF) a través del sitio web Andreas Dörnbrack muestra la evolución del vórtice polar en potencial de vorticidad, que es crucial para el desarrollo del agujero de ozono. (<https://www.pa.op.dlr.de/arctic/ecmwf.php?im=25>)

El Centro para Investigaciones de Ambiente Global del Instituto Nacional de Estudios Ambientales de Japón, muestran alternativamente el desarrollo y evolución del vórtice polar y la temperatura a distintas alturas de temperatura potencial con datos del reanálisis de NCAR. Además de un pronóstico a 24 horas donde muestra un escenario en cuanto a la estabilidad del vórtice (<https://db.cger.nies.go.jp/gem/stras/en/>)

El Centro de Clima de Tokio (Centro Regional del Clima RII, Asia) de la Agencia de Meteorología Japonesa muestra productos de la circulación en la estratosfera, entre los cuales de interés es el flujo de ondas con el flujo Eliassen-Palm que, según la actividad de onda pueden perturbar el vórtice polar y por lo tanto, impactar al agujero de ozono. Los productos se obtienen de los datos de circulación atmosférica del Reanálisis Japonés de Tres Cuartos de Siglo (JRA-3Q) para el periodo 1991 a 2020. (<https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/clisys/STRAT/>) [5]

4        **Carbajal Benitez Gerardo<sup>1</sup>, Skansi María de los Milagros<sup>1</sup>, Marincovich Giselle<sup>1</sup>, Quarin Francisco<sup>1</sup>, Nollas Fernando<sup>1</sup>, Papandreas Sebastian<sup>1</sup>.**

El Sistema de Monitoreo Atmosférico Copernicus (En inglés, CAMS) combina datos de los instrumentos satelitales con modelos numéricos de la atmosfera para proveer de información de alta precisión en el monitoreo y predicción de la capa de ozono, a nivel global (<https://atmosphere.copernicus.eu/monitoring-ozone-layer>)

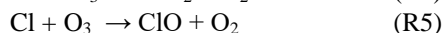
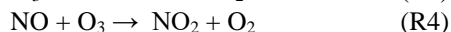
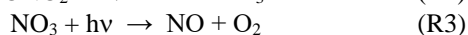
El Modelo Climático Comunitario de Atmósfera Completa (WACCM) de NCAR, que provee de predicciones que, se actualizan todos los días de compuestos químicos de la atmosfera a 10 días de predicción, usando el esquema del Modelo de mecanismos químicos MOZART TSMLT1, que se usa para la formación y destrucción de las NEP H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>, ClO<sub>x</sub>, etc. (<https://www.acom.ucar.edu/waccm/forecast/>)

## 2.4    Resultados y Análisis

Las condiciones dinámicas en la estratósfera Antártica durante el invierno austral (junio-agosto) sientan el escenario para el desarrollo de la capa de ozono en la Antártida. Las temperaturas es un buen indicador para observar el desarrollo y evolución de la destrucción de ozono en la estratosfera, debido a que las temperaturas son tan bajas, que conducen a la formación de las Nubes Estratosféricas Polares (NEP)

La cantidad de vapor de agua en la estratósfera es muy baja, solamente 5 de entre un millón de moléculas de aire (5.0 ppm), lo cual significa que, bajo condiciones normales, no existen nubes en la estratosfera. Sin embargo, cuando la temperatura cae por debajo de -78°C (194.6°K), empiezan a formarse las NEP, que consisten en una mezcla de agua (H<sub>2</sub>O), ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) y ácido Sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Estas últimas son llamadas NEP de tipo I (ácido nítrico, trihidratado, HNO<sub>3</sub>·3H<sub>2</sub>O). donde, en la superficie de partículas de la nube, tienen lugar reacciones químicas que, transforman compuestos halógenos pasivos e inocuos (por ej. HCl y HBr) en las denominadas especies activas de cloro y bromo. Cuando las temperaturas disminuyen abruptamente por abajo de los -85°C, se formarán nubes que consisten hielo de agua pura. Estas últimas son denominadas NEPs del tipo II. Las partículas en ambos tipos de nubes pueden crecer tanto que ya no flotan en el aire y precipitan fuera de la estratósfera. En este proceso traen consigo ácido nítrico que es un depósito que libera NO<sub>2</sub> bajo la radiación solar. Si el NO<sub>2</sub> es removido físicamente de la estratósfera (proceso denominado desnitrificación), el cloro y bromo activos pueden destruir muchas más moléculas de ozono antes de ser pasivas. La formación de NEP II llevará a una pérdida más severa de pérdida de ozono que la que causa el NEP I por sí mismo, puesto que las especies halógenas son más eficientemente activadas cuando se encuentran en las superficies de partículas de hielo de mayor tamaño.

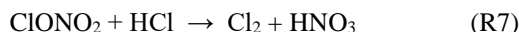
A través de varios mecanismos de las reacciones, los NO<sub>x</sub> atrapan cloro activo y lo transforman en reservorios Y posteriormente con la radiación UV, liberan cloro e inicia la destrucción del ozono, a través de ciclos catalíticos:



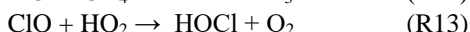


Donde la reacción R6 es el resultado final, donde dos moléculas de ozono, se destruyen para formar 3 moléculas de oxígeno con la intervención del ClO y liberación de Cl activo.

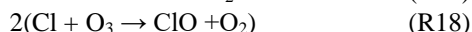
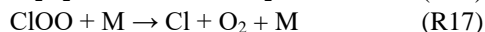
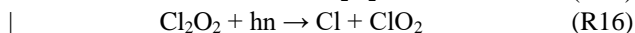
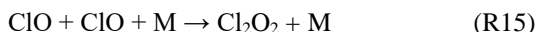
Las cinco reacciones básicas de la química heterogénea, las cuales son de mayor importancia para el la química de ozono son:



El ácido clorhídrico (HCl) es otra sustancia que tiene la capacidad de atrapar al cloro activo en reservorio, conjuntamente con el NOx y el Metano (CH4) durante el invierno polar:

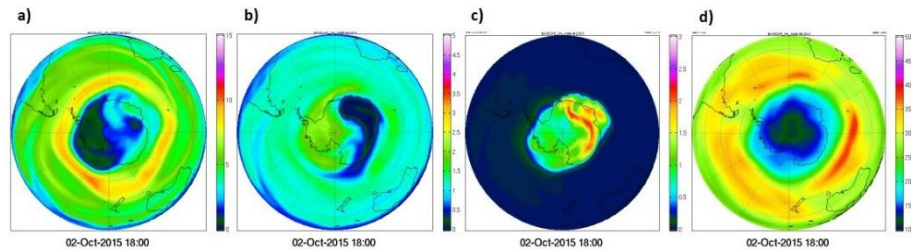


Un buen indicador de la activación química dentro del vórtice, es la cantidad de óxido de cloro (ClO). Sin embargo, se debe observar que el ClO se dimeriza y forma (2Cl<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). El dímero reacciona fácilmente en la presencia de luz solar. El ClO estará presente en las partes del vórtice iluminadas por el sol, mientras que las áreas oscuras serán llenadas con (2Cl<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), el cual no es observado por el Aura-MLS, pero es calculado por el modelo BASCOE. Observando la suma del monómero y dímero (ClO + 2Cl<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) se puede obtener una mejor impresión del grado de activación del cloro:



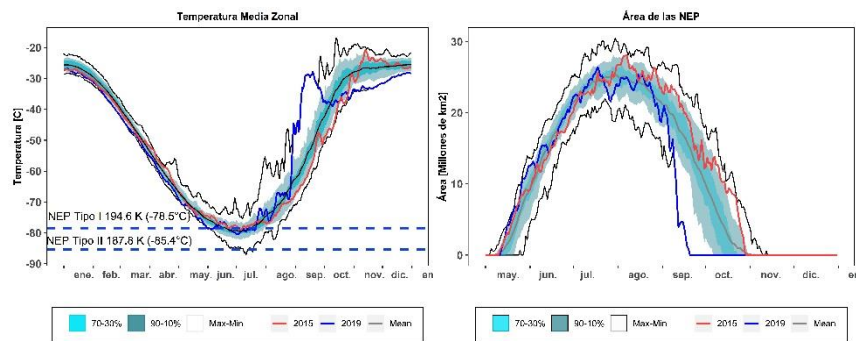
En la reacción (R19), nuevamente se observa que dos moléculas de ozono se transforman en 3 moléculas de oxígeno, a partir del ciclo de reacciones catalíticas.

La figura 1 como ejemplo se presenta el año 2015, donde se puede observar perfectamente que medida que el H<sub>2</sub>NO<sub>3</sub> está siendo removiendo (NEP) va apareciendo el HCl que es la forma en que se desactiva el cloro como destructor de ozono, al mismo tiempo se observa una gran cantidad en concentración del ClOx que es el destructor de ozono, situación que se observa en grafico de ozono, que presenta gran pérdida y profundidad.



**Fig. 1.** La química de la destrucción de ozono en la estratosfera Antártica.

En la figura 2 se muestra, a manera de ejemplo, las temperaturas para el año 2015 y 2019, así como el impacto en las NEP. En abril del año 2015 hubo una erupción grande del volcán Calbuco en Chile, que inyectó aerosoles en la estratosfera, provocando que esta se enfriara y una gran formación de NEP, derivando en uno de los agujero de ozono más grandes y profundos, comparado con los que se tiene registrado. En tanto, para el año 2019, a inicios de septiembre, se registra un fenómeno poco común en el HS, pero muy común en HN, que es un Calentamiento Súbito Estratosférico (siglas en inglés, SSW) provocando un decaimiento y poca formación de las NEP, derivando en un agujero de ozono pequeño y poco profundo.



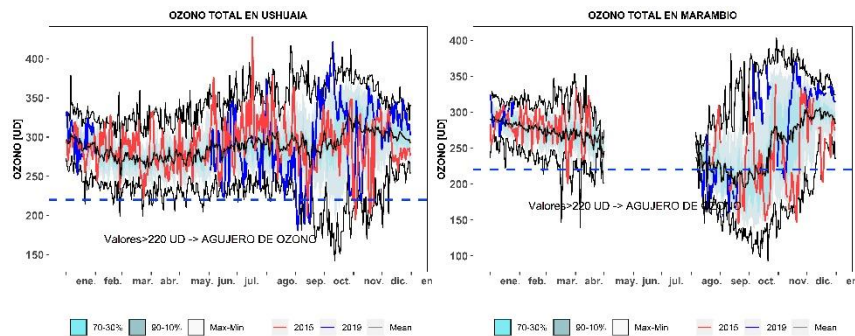
**Fig. 2.** Izquierda, representa la temperatura zonal a 10 hPa de altura en la zona de 60° a 90° de latitud. Mientras que en la derecha, representa las Nubes Estratosféricas Polares (NEP). En ambas la línea roja es el año 2015, la azul es el año 2019. La línea central negra es la media, mientras los extremos son los máximos y mínimos históricos del periodo 1979 a 2019.

Los sistemas de observación superficiales, juegan un papel primordial, debido a que ofrecen información puntualmente, también son usados para validar y verificar datos

¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar title al texto que desea que aparezca aquí.

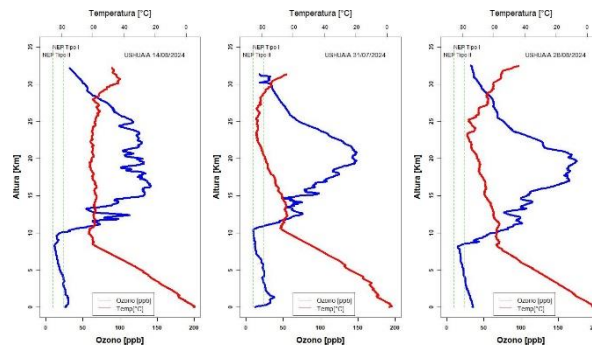
7

satelitales, reanálisis y modelos. En este sentido, tanto a estación VAG-Ushuaia y Marambio, se realizan mediciones diarias a través del espectrofotómetro Dobson, pero estas mediciones al ser dependientes del sol, en Marambio se interrumpen las observaciones debido a la noche polar y las condiciones meteorológicas prevalecientes durante el invierno. En la fig. 3 se muestran los resultados de esas mediciones en esos puntos de medición.



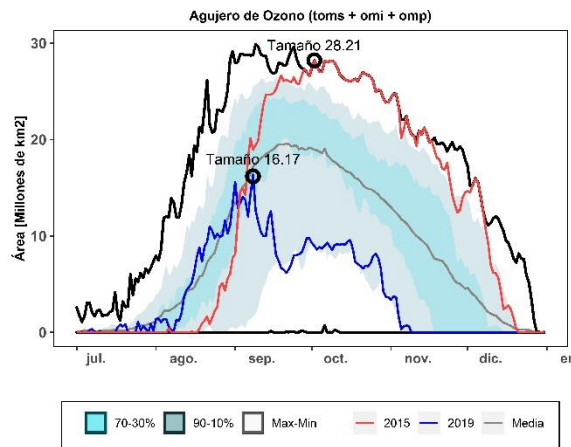
**Fig. 3.** Medición con el Espectrofotómetro Dobson en las estaciones VAG-Ushuaia y Marambio. La línea roja representa al 2015, la azul al 2019, las negras son las máximas, medias y mínimas para el periodo 1994 al 2003.

Otro sistema de medición son las ozonosondas que muestran los perfiles de ozono a diversas alturas de la atmósfera. En la figura 4, se muestra dos ejemplos, para el año en curso.



**Fig. 4.** Ozonosondeos realizados en la estación VAG-Ushuaia. La línea azul es el perfil de ozono, mientras que la roja es el perfil de temperatura. Las líneas verticales discontinuas son las temperaturas de formación para NEP.

En la figura 5 se puede apreciar la evolución en el crecimiento del agujero de ozono para los años de análisis 2015 y 2019. El máximo de ozono para el 2015 fue de aproximadamente 28,21 M km<sup>2</sup>, en tanto que en el año de 2019 fue de 16,7 M km<sup>2</sup>, la diferencia entre de ambos años es de aproximadamente 12,04 millones de km<sup>2</sup>. Si observamos la extensión de Canadá (~10.08 M km<sup>2</sup>) + Rusia (~17.09 M km<sup>2</sup>), total (~27.18 M km<sup>2</sup>). Es decir, el agujero de ozono formado en el 2015, llega a cubrir en su totalidad Canadá y Rusia.



**Fig. 5.** Evolución, tamaño y máximos del agujero de ozono en Millones de km<sup>2</sup> para los años 2015 y 2019. La línea roja representa al año 2015, la línea azul es el 2019, la media se representa con color marrón, los percentiles 10 a 90% y 70 a 30% en color relleno azul del periodo 1979 al 2022.

La capa de ozono austral desde que hay una disminución de ozono, debido a la destrucción del mismo, se inicia la medición con información satelital, validados con mediciones superficiales en la Antártida. A largo de la década de los 80 y 90, se observa una tendencia a ir aumentando año con año, con sus distintas variaciones. Mientras que a inicios de la década del 2000's esa tendencia se revierte y la tendencia es ir disminuyendo, hasta el 2020, donde parece ser una tendencia a ser constante el tamaño del agujero de ozono.

La figura 6 muestra año tras año la evolución del agujero de ozono desde 1979 al 2023.

Para el caso de los máximos absolutos (Izquierda) se observan:

- Una tendencia definida a aumento del tamaño del agujero de ozono desde 1979 hasta alrededor del 2000. Esta tendencia a aumentar ha sido de 1,217 M km<sup>2</sup> por año.
- Una tendencia hacia la recuperación del ozono y reducción del agujero de ozono para los años de 2006 al 2019 de 0,5031 M km<sup>2</sup> por año.
- Los últimos 4 años han sido muy similares y no se observa una tendencia definida.



¡Error! Utilice la pestaña Inicio para aplicar title al texto que desea que aparezca aquí.

9

- El año 2023 se presenta el máximo absoluto el día 21 de septiembre con aproximadamente 26 millones de km<sup>2</sup>, ocupando el 13° lugar en el ranking de mayor a menor.

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

- Para el periodo de 1979 al 2006, la tendencia aumenta más lenta que los valores máximos absolutos, es decir 0,8844 M km<sup>2</sup>.
- Para el periodo de 2006 al 2019, se observaba una recuperación de ozono y reducción del agujero de ozono de 0,5967 M km<sup>2</sup> por año, muy similar a los máximos absolutos.
- Los últimos 4 años (2020 al 2023) han sido muy parecidos y con muy poca variación.
- Para el año 2023, el tamaño del agujero de ozono presenta una área media de 23,07 M km<sup>2</sup>, ocupando el lugar del ranking 17, de mayor a menor.

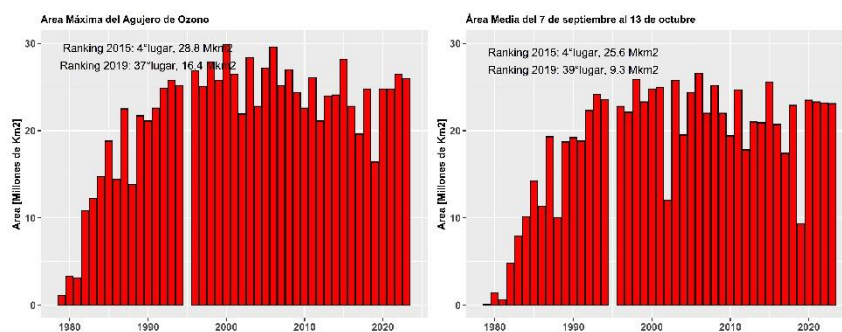


Fig. 6. Área del agujero de ozono por año del periodo 1979 hasta el 2023.

## 2.5 Conclusiones

El SMN continúa monitoreando la capa de ozono en la Antártida desde el año 1987 y se intensifica con la medición que se hace en Ushuaia, donde la estación se encuentra al límite con el vórtice polar.

Al monitoreo se está agregando las estaciones Antárticas de Belgrano y San Martín (DNA/IAA) donde se encuentran dos espectrofotómetros Brewer.

La Química de los CFC's son los principales responsables de la destrucción de ozono, aunque no los únicos. Mientras que la dinámica de la atmósfera modula dicha destrucción.

Se muestra que aún no está totalmente resuelto el problema del Agujero de Ozono, pero se han tenido avances con el protocolo de Montreal y sus respectivas enmiendas.

La Argentina, está posesionada como uno de los países más importantes en cuanto al monitoreo, producción de datos y publicaciones de ozono en la estratosfera.

10        **Carbajal Benítez Gerardo<sup>1</sup>, Skansi María de los Milagros<sup>1</sup>, Marincovich Giselle<sup>1</sup>,  
Quarín Francisco<sup>1</sup>, Nollas Fernando<sup>1</sup>, Papandreas Sebastian<sup>1</sup>.**

### **3    References**

1. 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).
2. Geir Braathen, “Boletín de Ozono Antártico”, Editado por la WMO (2017)
3. Carbajal Benítez Gerardo, Facundo Orte, Elian Wolfram, Eduardo Luccini y Fernando Nollas. Boletines e Informe Final del Agujero de Ozono 2018, 2020, (2021)
4. Newman (NASA), E. Nash (SSAI), R. McPeters (NASA), S. Pawson (NASA) National Aeronautics and Space Administration - Goddard Space Flight Center - NASA Ozone Watch.
5. Van der A, R. J., Allaart, M. A. F., and Eskes, H. J., Extended and refined multi sensor reanalysis of total ozone for the period 1970-2012, *Atmos. Meas. Tech.*, 8, 3021-3035, doi: 10.5194/amt-8-3021-2015 (2015)
6. Henk Eskes, Peter van Velthoven, Pieter Valks and Hennie Kelder, Assimilation of GOME total ozone satellite observations in a three-dimensional tracer transport model, *Q.J.R.Meteorol.Soc.* 129, 1663-1681, doi: 10.1256/qj.02.14, (2003)
7. Kobayashi, S., Y. Kosaka, J. Chiba, T. Tokuhiro, Y. Harada, C. Kobayashi, and H. Naoe, 2021: JRA-3Q: Japanese Reanalysis for Three Quarters of a Century. Joint WCRP-WWRP Symposium on Data Assimilation and Reanalysis/ECMWF Annual Seminar 2021, online, O4-2 (2021)