

# Nubes estratosféricas polares y su seguimiento a través de modelos y ozonosondeos en Ushuaia y Belgrano II

Nota Técnica SMN 2024-169

**Gerardo Carbajal Benitez<sup>1</sup>, Héctor Ochoa<sup>2</sup> y Héctor Estévez Pérez<sup>3</sup>.**

<sup>1</sup> *Servicio Meteorológico Nacional, Argentina*

<sup>2</sup> *Dirección Nacional Antártica/Instituto Antártico Argentino, Argentina.*

<sup>3</sup> *Instituto de Geofísica, UNAM, México.*

Marzo 2024

### *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.*

## Resumen

Las Nubes Estratosféricas Polares (NEP) son los reservorios principales para los compuestos de cloro y bromo, que son parte de los destructores de la capa de ozono en la Antártida. Estas se forman al inicio del invierno austral, a mediados del mes de mayo, dentro del vórtice polar y después, al aparecer la radiación solar en la primavera, estas nubes liberan el cloro activo para la destrucción de ozono en la estratosfera, generando de esta manera el llamado agujero de ozono. A través de los modelos MERRA-2 y BASCOE es posible tener un seguimiento y monitorear la formación de las NEP. Durante este proceso, se observa como el ácido nítrico y clorhídrico generan estas nubes, clasificándolas como tipo I y II, dependiendo de la temperatura fría de la estratosfera. Estas dan paso a la generación de ácido nítrico tri-hidratado (NAT) y si se congelan aún más, se forman partículas de hielo a las cuales son las de tipo II. Posteriormente, estas nubes liberan los compuestos de cloro que dimerizan y destruyen al ozono ( $\text{ClO}_x = \text{ClO} + \text{Cl}_2\text{O}_2$ ). A este paso se le da el nombre de activación química del vórtice polar. Este mecanismo de reacciones de los radicales libres, son parte de ciclos catalíticos de destrucción del ozono que hay en la atmosfera. Algunos de los eventos naturales como erupciones volcánicas que emiten aerosoles y vapor de agua a la estratosfera permiten un mejor y más eficiente crecimiento de las NEP. A través de los programas de ozonosondeos que, se encuentran instalados en puntos de medición, tal es el caso de la estación GAW-Ushuaia y la Estación Antártica Belgrano II, una afuera y otro adentro del vórtice polar, respectivamente. Además de observar con perfiles de temperatura, un posible calentamiento súbito estratosférico que va a favorecer que el agujero de ozono no crezca o se vaya inhibiendo con el tiempo, tal fue el caso del año 2023, el cual se presentó un calentamiento súbito estratosférico que si bien no fue tan importante, fue lo suficiente para inhibir la producción de las NEP y en consecuencia detuvo la destrucción de ozono como se venía observando.

## Abstract

The Polar Stratospheric Clouds (PSC) are the main reservoirs for chlorine and bromine compounds, which are part of the ozone layer destroyers in Antarctica. These form at the beginning of the southern winter, in the middle of May, within the polar vortex, and then, when solar radiation appears in the spring, these clouds release active chlorine for ozone destruction in the stratosphere, thus generating the so-called ozone hole. Through the MERRA-2 and BASCOE models, it is possible to track and monitor the formation of PSC. During this process, it is observed how nitric and hydrochloric acid generate these clouds, classifying them as type I and II, depending on the cold temperature of the stratosphere. These give way to the generation of tri-hydrated nitric acid (NAT), and if they freeze further, ice particles are formed, which are type II. Subsequently, these clouds release chlorine compounds that dimerize and destroy ozone ( $\text{ClO}_x = \text{ClO} + \text{Cl}_2\text{O}_2$ ). This step is called chemical activation of the polar vortex. This mechanism of free radical reactions is part of catalytic cycles of ozone destruction in the atmosphere. Some of the natural events like volcanic eruptions that emit aerosols and water vapor into the stratosphere allow for better and more efficient growth of PSC. Through ozone sounding programs that are installed at measurement points, such as the GAW-Ushuaia station and the Belgrano II Antarctic Station, one outside and the other inside the polar vortex, respectively. In addition to observing with temperature profiles, a possible sudden stratospheric warming that will favor the ozone hole not growing or being inhibited over time, such was the case in 2023, which presented a sudden stratospheric warming. Although it was not so important, it was enough to inhibit the production of PSC and consequently stopped the destruction of ozone as had been observed

**Palabras clave:** Nubes Estratosféricas Polares, ozono, modelos, ozonosondeos.

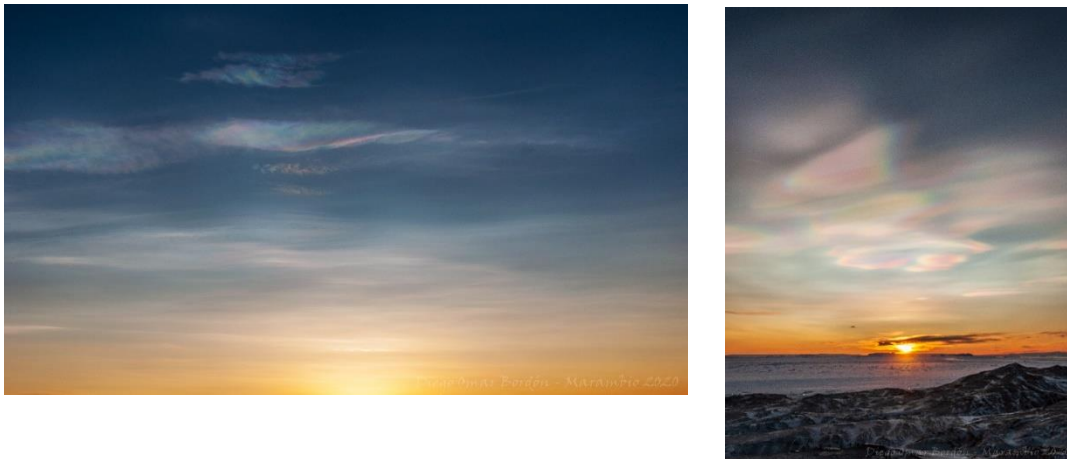
**Citar como:** Carbajal Benitez, G., H. Ochoa y H. Estevez Perez, 2024: Nubes Estratosféricas Polares y su seguimiento a través de modelos y ozonosondeos en Ushuaia y Belgrano II. Nota Técnica SMN 2024-169

## 1. INTRODUCCIÓN

A principios de la década de los 80, se descubre una anomalía ambiental sobre los polos, tanto en el Ártico como el Antártico, que consiste en la disminución de ozono en la estratosfera y a la cual se le llamó “El Agujero de Ozono”. Este fenómeno ocurre por la presencia de cloro, que proviene de los gases llamados clorofluorocarbonos (CFC's). Estos compuestos son de origen antropogénico (Molina y Rowland, 1974) y pueden perdurar por más de 50 años. La liberación de cloro es durante el inicio de la primavera y con la presencia de la radiación solar, a través de un mecanismo llamado *fotólisis*.

En este sentido, cobro gran interés para la comunidad científica las **Nubes Estratosféricas Polares (NEP)** que se forman durante el invierno polar. Las partículas en su superficie, proporcionan la química heterogénea que transforman compuestos radicales halogenados en reservorios que funcionan como catalizadores en la destrucción del ozono (Solomon y otros., 1986).

Las nubes se pueden reconocer a simple vista como color nacarado (Figura 1) y se encuentran en el invierno de la Antártida y algunas veces se han avistado en el sur de la Argentina y Chile, en el año 2022 (Carbajal y otros, 2022). Mientras que en el Ártico se pueden observar a lo largo de las cadenas montañosas como las escandinavas (Lauster y otros, 2022). Las NEP a menudo se forman entre los 15 y 30 km de altura según el lugar donde se observen (Leroux y Noel, 2024).



**Figura 1.** Nubes estratosféricas polares (NEPs). Fotos: sr. diego bordón, pabellón científico de la estación antártica Marambio, SMN 2020.

Estas nubes año a año se forman adentro del vórtice polar que, entre más estable sea, más fría en su interior y esto tiene como consecuencia que las NEP se extienden en área y volumen. Caso contrario, un vórtice inestable genera vientos más lentos que circundan al polo y no puede enfriar su interior y, por lo tanto, menos NEP estarán presentes.

El objetivo general de esta nota técnica, es contribuir al conocimiento y entendimiento de las Nubes Estratosféricas Polares, que se presentan durante el invierno en la Antártida, a través de información de modelos y de ozonosondeos, para integrarlos en el Boletín de la Temporada de Agujero de Ozono.

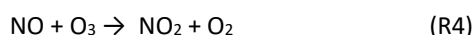
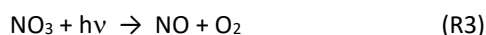
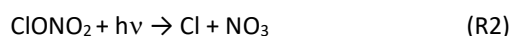
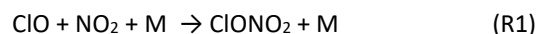
## 2. MARCO TEORICO DE LAS NEPs.

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  $-78^{\circ}\text{C}$  ( $194.6^{\circ}\text{K}$ ), empiezan a formarse las nubes en la estratosfera, que consisten en una mezcla de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ), ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y ácido Sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Estas últimas son llamadas NEP de tipo I, donde, en la superficie de partículas de la nube, tienen lugar reacciones químicas que, transforman compuestos halógenos pasivos e inocuos (por ej.  $\text{HCl}$  y  $\text{HBr}$ ) en las denominadas especies activas de cloro y bromo (por ej.  $\text{ClO}$  y  $\text{BrO}$ ). Estas formas activas de cloro y bromo provocan una rápida pérdida de ozono al inicio de la primavera, con los primeros rayos del sol, a través de ciclos catalíticos, en los que una molécula de  $\text{ClO}$  puede destruir miles de moléculas de ozono antes de ser inhibidas, mediante la reacción con dióxido de nitrógeno. ( $\text{NO}_2$ ). La remoción temprana de  $\text{HNO}_3$  gaseoso es una indicación de que este compuesto se condensa en la forma de nubes estratosféricas polares (ácido nítrico, trihidratado,  $\text{HNO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ). El mecanismo de formación de las NEP tipo I se da cuando la baja de temperatura del umbral mencionado, produce la formación de tres tipos de partículas que están mezcladas dentro de las NEP:

1. Se forman gotas líquidas de solución ternaria super-enfriadas, cuando el vapor de agua y el ácido nítrico se condensan en aerosoles en la estratosfera.
2. Se forman partículas sólidas de ácido nítrico tri-hidratado (NAT) exclusivamente a través de procesos de nucleación heterogéneos, que ocurren en partículas de hielo o núcleos de meteoritos. La nucleación de partículas NAT de meteoritos se documentó por primera vez mediante estudios de laboratorio. Posteriormente, resaltado por observaciones que mostraron la formación de NAT NEP a pesar de la ausencia de deshidratación estratosférica y temperaturas por encima del punto de congelación. Este proceso conduce a la formación de grandes y baja densidad de partículas NAT, conocidas como "NAT-rock" o "Mother-NAT" (Tritscher et al., 2021).
3. Se forman cristales de hielo en la estratosfera a través de nucleaciones homogéneas y heterogéneas. La nucleación homogénea es bien entendida y solo requiere temperaturas extremadamente bajas, de  $5$  a  $8^{\circ}\text{C}$  por debajo del punto de enfriamiento. Temperaturas tan bajas pueden generarse por ondas de gravedad provocadas por la orografía y conducir a la rápida formación de un tipo específico de NEP conocido como "ola de hielo NEP". Las partículas NAT pueden luego nuclearse en estas partículas de hielo y propagarse a través de grandes regiones, un fenómeno identificado a través de mediciones espaciales y llamado "cinturón NAT" (Höpfner y otros, 2006, Noel y Pitts, 2012). La nucleación heterogénea de partículas de hielo NEP puede ocurrir sobre partículas NAT preexistentes (Fortin y otros, 2003) o núcleos extraños. Aunque las temperaturas son clave para impulsar la formación de partículas específicas de las NEP, otros parámetros son importantes, como el vapor de agua. La formación de las NEP es muy sensible a los cambios en el vapor de agua: los estudios habían demostrado que una estratosfera más húmeda y fría produciría más NEP (Khosrawi y otros, 2016).

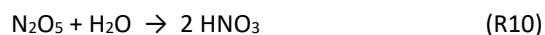
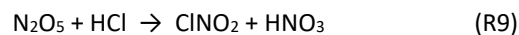
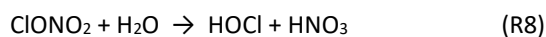
Cuando las temperaturas disminuyen abruptamente por debajo de los  $-85^{\circ}\text{C}$  ( $187.8^{\circ}\text{K}$ ), se formarán nubes que consisten en hielo de agua pura. Estas últimas son denominadas NEP de tipo II. Las partículas en ambos tipos de nubes pueden crecer tanto que ya no flotan en el aire y precipitan fuera de la estratósfera. En este proceso traen consigo ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ). El ácido nítrico es considerado un reservorio que libera  $\text{NO}_2$  bajo condiciones de iluminación solar. Si el  $\text{NO}_2$  es removido físicamente de la estratósfera (proceso denominado desnitrificación), el cloro y bromo activos pueden destruir muchas más moléculas de ozono antes de ser inhibidos. La formación de nubes de hielo llevará a una pérdida más severa de ozono, que la que causa las NEP de tipo I, puesto que las especies halógenas son mejor activadas, cuando se encuentran en las superficies de partículas de hielo de mayor tamaño.

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

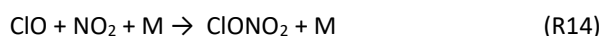
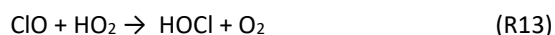


Donde la reacción R6 es el resultado final, donde dos moléculas de ozono, se destruyen para formar 3 moléculas de oxígeno con la intervención del ClO y liberación de Cl activo.

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 un reservorio, conjuntamente con el NOx y el Metano (CH<sub>4</sub>) 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.

Finalmente es importante remarcar la doble función de las NEP en la estratosfera:

1. Las reacciones heterogéneas, activan la reservas de cloro y bromo en la estratosfera en forma de radicales libres que, contribuyen la destrucción de ozono durante la primavera, con la aparición de la radiación solar (Solomon, 1999).
2. Inducen la desnitrificación, y deshidratación de la estratosfera al capturar el  $\text{HNO}_3$  y  $\text{H}_2\text{O}$  necesarios para su formación, lo que retrasa la desactivación de cloro y, por lo tanto, prolonga el agotamiento de la capa de ozono (p. ej. Toon y otros, 1986; Jensen y otros, 2002, Khosrawi y otros, 2017).

### 3. METODOLOGÍA

Se eligen dos fuentes de datos para el análisis y en general para el monitoreo de la formación, evolución y financiación de las NEP durante el periodo de tiempo que dura el agujero de ozono en la estratosfera de la Antártida.

Los datos provienen del análisis retrospectivo del “*Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, version 2*”, MERRA-2, producido por el “*Goddard Earth Observing System Data Assimilation System (GEOS DAS)*”. MERRA-2 utiliza una versión del modelo GEOS con el análisis atmosférico *Gridpoint Statistical Interpolation (GSI)* desarrollado conjuntamente con NOAA/NCEP/EMC. Dado que se necesitan unos dos meses para incorporar estos datos a las estadísticas, se complementa la asimilación del MERRA-2 con el sistema de asimilación *GEOS FP* que proporciona análisis y predicciones. Este sistema de asimilación que produce el *GEOS DAS*, integra versiones de vanguardia del modelo de circulación general atmosférica GEOS con técnicas avanzadas de asimilación de datos, utilizando una amplia gama de observaciones satelitales.

El área de las NEP formadas a partir de ácido nítrico trihidraado (NAT) se calcula suponiendo un perfil fijo de  $\text{HNO}_3$  con una concentración de 4,54 ppt sobre una superficie de temperatura potencial ( $\theta$ ) de 460 K, además, una concentración fija de vapor de agua de 5,0 ppm. Entonces, se interpolan las temperaturas y se encuentra el área de temperatura menor que la temperatura de condensación para cada superficie. Para calcular el volumen, primero calculamos las áreas y luego las integramos en el rango de niveles de entrada. En lugar de utilizar niveles  $\theta$  fijas, calculamos un valor promedio de  $\theta$  para cada nivel de presión de 60°S a 90°S (Responsables: P. Newman (NASA), L. Lait (SSAI), S. Pawson (NASA)).

La fuente de los datos pueden ser obtenidos, entre otros, del portal web *NASA Ozone Watch / Goddard Space Flight Center*:

[https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/temp\\_2024\\_MERRA2\\_SH.html](https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/temp_2024_MERRA2_SH.html).

Además de portal web Giovanni NASA / Earth Data:

<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni>.



La Aeronomía Espacial (BIRA-IASB) está a cargo del monitoreo y evaluación de los productos de composición estratosférica suministrados por los proyectos MACC europeo. En este contexto, el sistema de asimilación *BASCOE* ha sido dispuesto para suministrar en tiempo cuasi real, análisis y pronósticos del ozono, así como de especies relacionadas con sí mismo, para la estratósfera. La versión usada en esta edición ha sido originalmente desarrollada dentro del marco del programa GSEPROMOTE de la Agencia Espacial Europea. El sistema de datos *BASCOE* asimila el conjunto de datos off-line (nivel-2, V3.3) obtenidos del instrumento Aura-MLS. A pesar de haber sido suministrado un pocos días más tarde que la corriente NRT, el conjunto de datos off-line incluye varias especies: O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, HNO<sub>3</sub>, HCl, ClO, (ClO)<sub>2</sub>, HOCl y N<sub>2</sub>O. La información acerca de los proyectos MACC y del modelo *BASCOE* se pueden encontrar en:

[http://macc.aeronomie.be /4\\_NRT\\_products/3\\_Models\\_changelogs/BASCOE.php](http://macc.aeronomie.be /4_NRT_products/3_Models_changelogs/BASCOE.php).

Los datos de los *ozonosondeos* provienen de dos estaciones, los cuales se evalúa los perfiles de humedad relativa, el ozono y temperatura:

1. La Estación GAW-Ushuaia, que se encuentra al límite del vórtice polar, pero cuando éste es inestable, el agujero de ozono puede pasar por encima de la estación, tal fue el caso del año 2023 donde el Agujero de Ozono pasa 5 veces por el sur de la Provincia de Tierra del Fuego. En la estación GAW-Ushuaia es mantenida y financiada por el Servicio Meteorológico Nacional y la Provincia de Tierra del Fuego en un convenio suscrito en el año 1994. Posteriormente para el programa de ozonosondeos en el año 2008, se firma un Memorándum de Entendimiento con la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) de España y del Instituto Nacional de Tecnología Aeroespacial (INTA) de España, quienes proporcionaron los insumos y la infraestructura de los ozonosondeos y este finaliza en el año 2013.
2. Los ozonosondeos que se hacen en esta estación Antártica Belgrano II, 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.

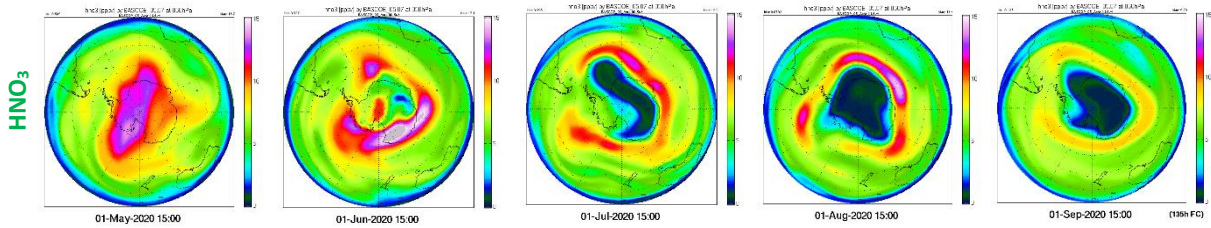
El periodo de los ozonosondeos es desde el año 2020 al 2023, los cuales se realizan en la temporada del agujero de ozono. Es importante mencionar que en ocasiones los globos sondas no llegan siempre a la misma altura y pocas veces estallan en la troposfera, por lo cual los datos se descartan para estos casos.

Los datos generados por ambas estaciones siguen los protocolos vigentes del programa Vigilancia Atmosférica Global (En inglés: GAW) de la Organización Meteorológica Mundial (en inglés: WMO) en cuanto a los lanzamientos (WMO/GAW Report, 2014).

## 4. ANÁLISIS DE DATOS

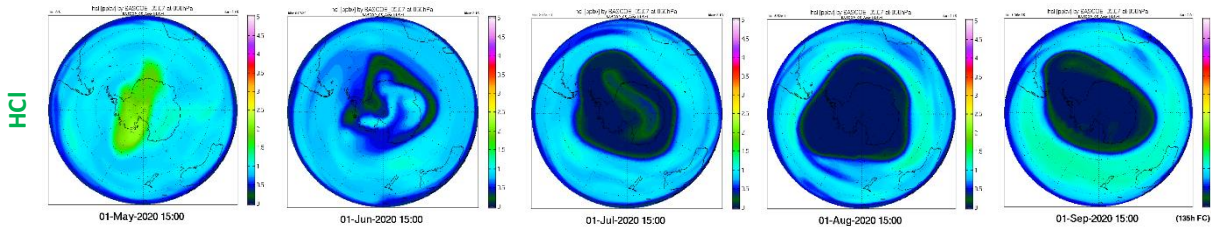
La química de formación se explicó en el apartado del marco teórico, pero se ilustra aún mejor en la Figura 2. Donde se puede apreciar como el ácido nítrico gaseoso (HNO<sub>3</sub>) a una altura de 50hPa es removido gradualmente. Aproximadamente en mayo inicia el invierno austral y las temperaturas en la estratosfera descienden, es entonces que, también inicia la remoción del HNO<sub>3</sub>. Para el mes de julio con la remoción de este gas, se forman las NEP y en septiembre se encuentran plenamente formadas.





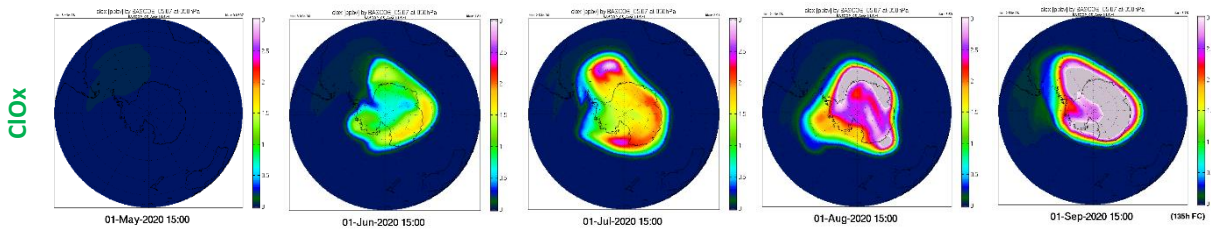
**Figura 2.** Los mapas muestran la progresiva remoción del HNO3 en un nivel de 50 hPa. En la escala de color se observa que, entre más oscuro es mayor la remoción de este gas y consecuentemente la aparición de las NEPs.

Al mismo tiempo, el ácido clorhídrico (HCl) es removido dado que reacciona con nitrato de cloro (ClONO<sub>2</sub>) y forma cloro activo (R7). Se puede apreciar como el ácido clorhídrico está disminuyendo, puesto que es convertido en partículas NEP. La conversión extensa ya tiene lugar en los meses de julio, agosto y septiembre, de tal manera que, todo el vórtice se encuentra esencialmente vacío de HCl (Figura 3).



**Figura 3.** Los mapas muestran la progresiva remoción del HCL en 50 hPa. En la escala de color se observa que, entre más oscuro es mayor la remoción de este gas y consecuentemente la aparición de las NEPs.

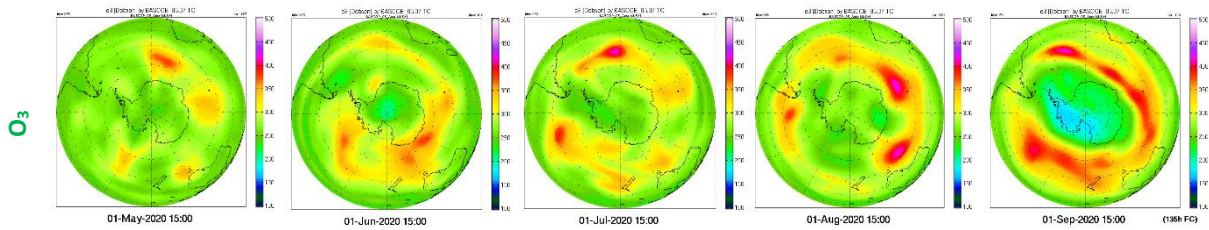
Un buen indicador de la activación del vórtice, es la cantidad de óxido de cloro (ClO), ver (R15)(R16)(R17)(R18). Sin embargo, se debe observar que el ClO se dimeriza y forma (Cl<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). Este dímero es fácilmente descompuesto en la presencia de luz solar, de tal manera que, el ClO estará presente, en las partes del vórtice iluminadas por el sol, mientras que las áreas oscuras serán llenadas con el dímero (Cl<sub>2</sub>O<sub>2</sub> = (ClO)<sub>2</sub>), el cual no puede ser observado por el satélite Aura-MLS, pero es calculado por el modelo BASCOE. Observando la suma del monómero y dímero (ClO<sub>x</sub> = ClO + Cl<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) se puede obtener una mejor impresión del grado de activación del cloro. Esto se muestra en la Figura 4. Los primeros signos de activación son ya visibles el desde el mes de junio. El grado máximo de activación tiene lugar durante los meses de agosto y septiembre.



**Figura 4.** Los mapas muestran la progresiva formación del ClOx en un nivel de 50hPa. En la escala de color se observa que, entre más tiende al violeta es mayor la concentración de este gas.

Esta última Figura 5, muestra la concentración (razón de mezcla) para el ozono en el nivel de 50 hPa que es donde se encuentra la capa de ozono. Se puede apreciar que, para los meses del invierno austral, aún no se forma el agujero de ozono, debido a que no hay luz solar y el proceso de formación de las NEP aun continua. Ya a inicios de septiembre, la aparición de la radiación solar está vigente y el

proceso de liberación de compuestos halogenados inició, de tal manera que el agujero de ozono empieza a aparecer dentro del vórtice polar. Mientras que, a las orillas de dicho vórtice que funciona como una barrera, se nota la acumulación de ozono proveniente de latitudes medias y tropicales.



**Figura 5.** Los mapas muestran la progresiva formación del agujero de ozono. En la escala de color se observa que, entre más tiende al azul, menos concentración de ozono.

## 5. RESULTADOS

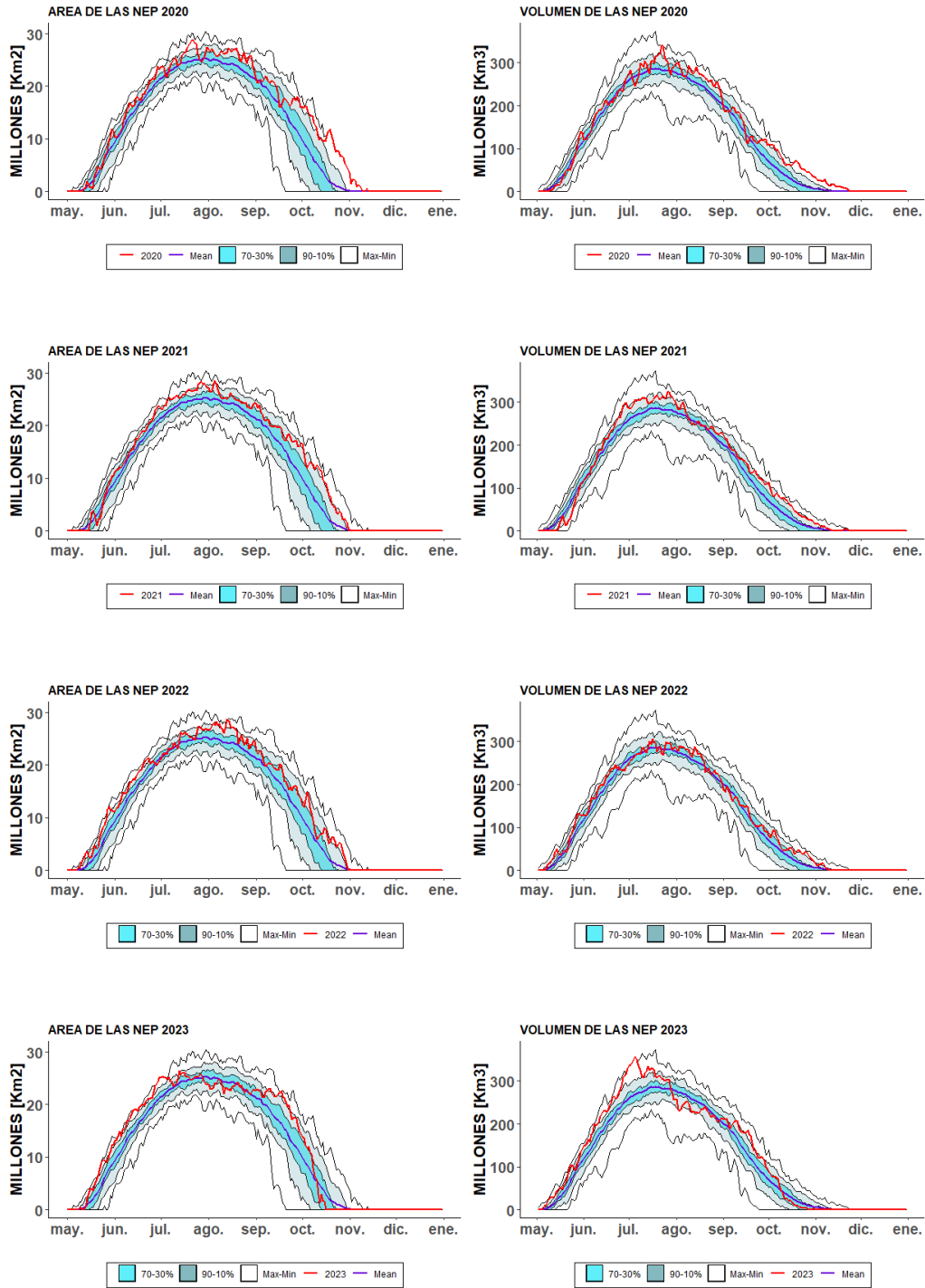
Si tomamos el periodo de 1979 al año 2023 (44 años) encontramos que, el inicio promedio de la formación de las NEP es a partir del 5 de mayo, también muestra un área máxima de 29,72 de millones de km<sup>2</sup> para el año 2006. En tanto el volumen se empieza a detectar a partir del 29 de abril, con un máximo de 373,96 millones de km<sup>3</sup> para el año 1995 (Tabla 1).

**Tabla 1.** Comparación de los valores máximos de las NEPs de los últimos 4 años, donde el tamaño medio del agujero de ozono ha sido de dimensiones muy parecido.

	Fecha	Área Máxima [millones km <sup>2</sup> ]	Fecha	Volumen Máximo [millones km <sup>3</sup> ]	Área Media del Agujero de Ozono [millones km <sup>2</sup> ]
<b>2020</b>	21 de julio	28,80	22 de julio	340,00	23,5
<b>2021</b>	5 de agosto	28,55	27 de Julio	324,05	23,8
<b>2022</b>	13 de agosto	28,76	25 de julio	298,94	23,2
<b>2023</b>	26 de julio	25,74	5 de julio	357,32	23,0

En la siguiente Figura 6 se muestra la evolución por año del área y volumen de las NEP desde el año 2020 hasta el año 2023. Estas a su vez, son comparadas con la media, así como máximos y mínimos, del periodo 1979 a 2023. En cada una de ellas se observa que, el periodo de crecimiento es mucho más rápido que el periodo de destrucción. El inicio de formación es aproximadamente a inicios del mes de mayo, aunque en los años 2022 y 2023, estos comienzan antes que la media y se crecen mucho más rápido que incluso en otros años. Otra característica de las NEP, es que para el inicio de la primavera, la variabilidad crece en amplitud, debido a que la dependencia que, ya es más química que física, es decir, la destrucción de ozono va depender de la cantidad de cloro activo proveniente de las NEP como reservorio y la química heterogénea que tenga para un año determinado. Otros factores físicos que afectan es la temperatura de la estratosfera, del flujo de calor generado por la actividad de ondas, etc.

Es importante notar que, en el año 2020 las NEP se prologan su volumen cerca del mes de diciembre y el agujero de ozono se cierra aproximadamente los días 27 y 28 del mes de diciembre, el cual se registra como uno de los agujeros más profundos y más persistentes desde el inicio del monitoreo.



**Figura 6.** Series de tiempo para los últimos 4 años. La línea roja representa el año en curso, las líneas internas y externas negras representan el máximo y mínimo y las zonas sombreadas son los percentiles de 10 a 90% y 30 a 70% del periodo 1979 a 2023 (44 años).

Otro de los resultados importantes para este trabajo, es el que se realiza en los puntos de medición, tanto dentro como fuera del voltica polar, es decir, los ozonsondeos que se realizan tanto en la estación GAW-Ushuaia y la estación Antártica Belgrano II.

Esta actividad, año con año se cumple según el plan de trabajo y se realizan los lanzamientos respectivos, siempre y cuando las condiciones meteorológicas lo permitan (que no sean adversas, como nieve, lluvia, viento, etc.). Además que los lanzamientos de los globos alcancen por lo menos 28 kilómetros de altura, por arriba de la capa de ozono, de esta manera establecer la temperatura, la cantidad de ozono y últimamente la humedad o vapor de agua en la estratosfera.

### **GAW-Ushuaia.**

Como ya se mencionó anteriormente, los ozonosondeos en la estación GAW-Ushuaia siguen los protocolos GAW/WMO y en el repositorio institucional del Servicio Meteorológico Nacional se publica un procedimiento más detallado en la preparación y lanzamiento de los globos junto con la Celda de Concentración Electrolítica con siglas en inglés "ECC" (Manuel Cupeiro, 2013). En la misma publicación se muestra la recepción de los datos que van enviando los globos sondas conforme sube y llega a la estratosfera.

La estación GAW-Ushuaia se localiza en la llamada Isla Grande en la Provincia de Tierra del Fuego en Argentina, a unos 10 km al suroeste de la ciudad de Ushuaia (54° 50' S, 68° 18' O, 18 m.a.s.l). Esta estación se estableció en la zona debido a que está en gran parte del tiempo al borde y apenas afuera del vórtice polar, de tal manera que puede capturar la mayoría de eventos que pueden impactar la estratosfera y la troposfera, en la cercanía de dicho vórtice polar. De hecho, cuando el vórtice se encuentra perturbado, es común que el agujero de ozono pase por encima de la estación y por la ciudad de Ushuaia, de tal manera que se han avistado NEP en la zona.

En la Figura 7, se observan 4 años del programa de medición a través de ozonosondas, La columna de la izquierda se refiere a la humedad relativa [%] que nos ofrece información del vapor de agua en la estratosfera, la columna del centro, nos muestra la temperatura y su evolución en el tiempo. Finalmente, la columna de la derecha es el ozono a lo largo de la troposfera y estratosfera en el tiempo.

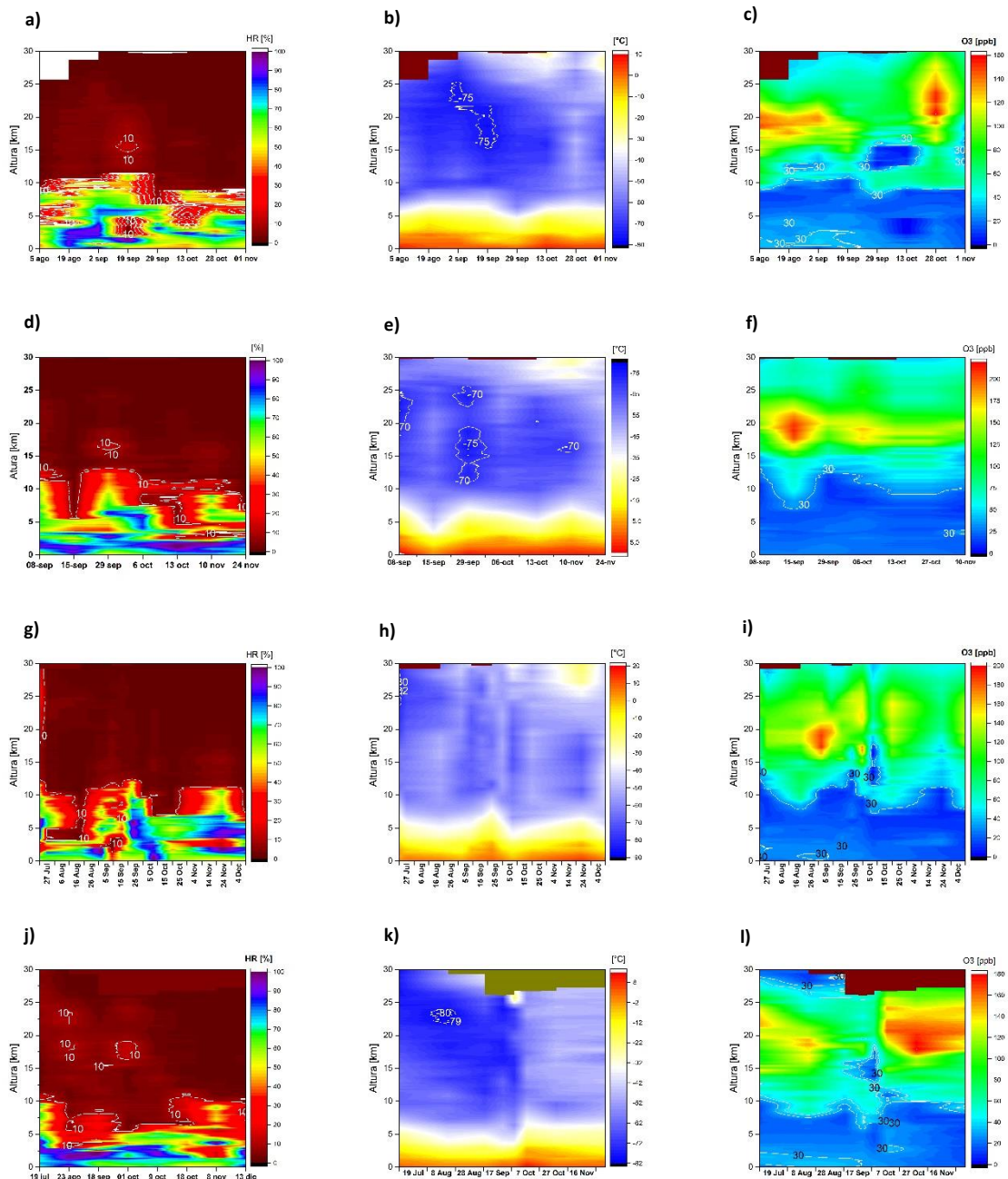
En la columna de la humedad relativa (**a, d, g, j**), debido a que en el año 2022 después de la erupción Hunga Tonga, se inyectó vapor de agua en la estratosfera durante el invierno Antártico, lo cual enfrió la estratosfera y ayudó a la formación de las NEP (Janusz, and Agnieszka, 2024, Santee et al, 2023, Santee et al, 2024)

La observación de humedad relativa entre los 15 y 30 km de altura, es decir la altura en la cual se encuentra el agujero de ozono, no presenta vapor de agua significativa, es decir una estratosfera seca a lo largo del lanzamiento de las ozonosondas durante los años 2020 a 2023. Es decir por fuera del vórtice polar, el vapor de agua no afecta a las NEP.

Para los años 2020, 2021 y 2023, se observan temperaturas (**b, e, h, k**) por debajo del umbral de formación de NEP y es muy probable que se hayan notado la presencia de estas por encima de la estación. Para el año 2022, la estratosfera no se detecta tan fría, pero se detectan NEP las cuales se deben a la deformación del vórtice y de agujero de ozono (<https://www.surenio.com.ar/nubes-polares-un-fenomeno-visual-atractivo-pero-peligroso/>).

Finalmente, en la última columna se muestra la concentración del ozono (**c, f, i, l**), el cual tiene una disminución muy significativa, en la estratosfera baja, que corresponde al agujero de ozono que está pasando por la estación al momento de lanzamiento. En estas figuras claramente se observa la pérdida de ozono en la estratosfera baja durante el inicio de la primavera austral, que hemos detectado que la presencia del agujero de ozono es menor a los 30 ppb.





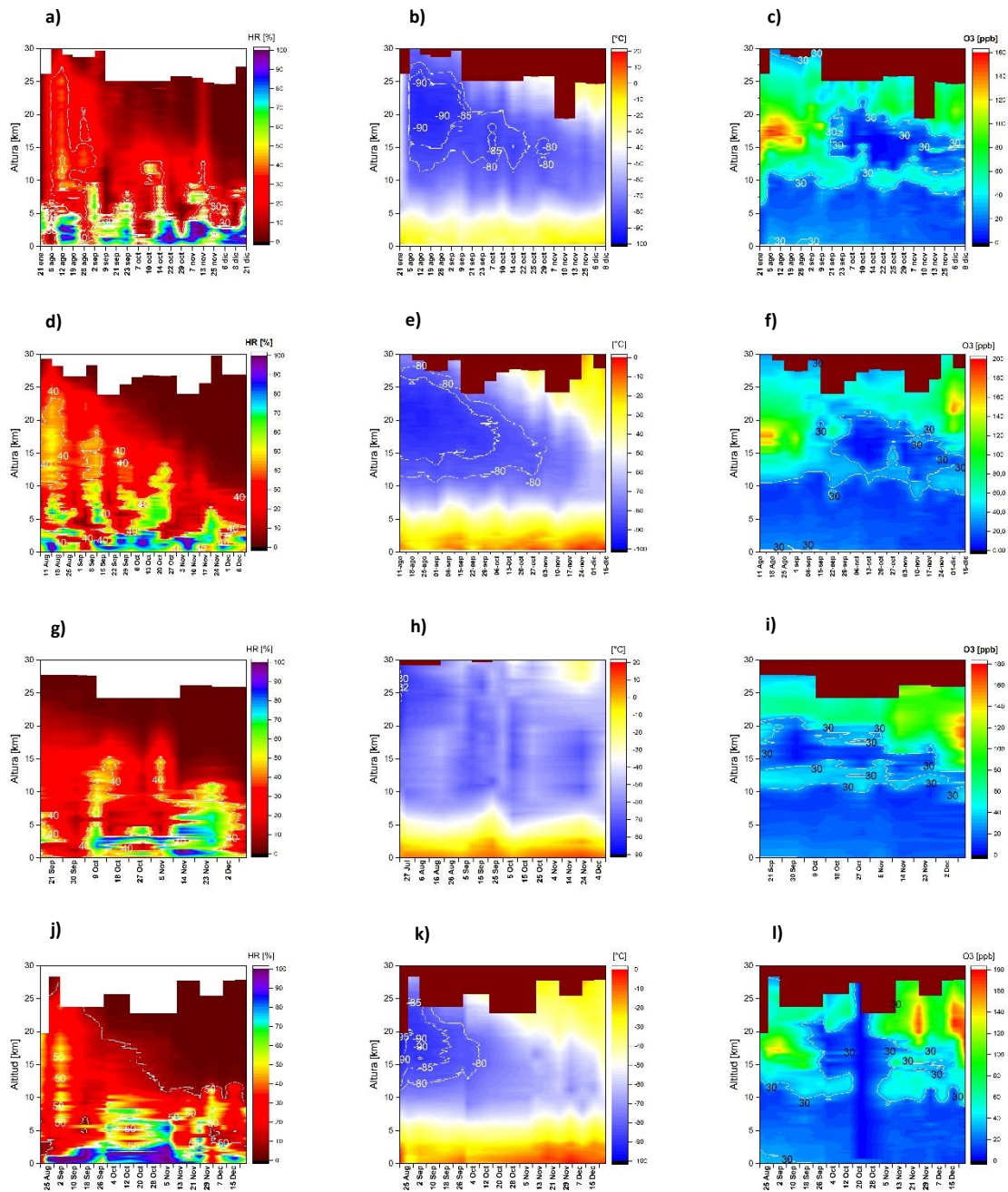
**Figura 7.** Ozonsondeos realizados en la estación GAW-Ushuaia del año 2020 al 2023 (4 años). La columna izquierda se refiere a la humedad relativa [%] las líneas blancas indican el valor máximo en la estratosfera, la columna central muestra la temperatura [°C] y las líneas blancas muestran el umbral en las cuales las NEP se forman y la columna de la derecha es el ozono [ppb] a lo largo de la estratosfera y troposfera, las líneas blancas muestran la concentración umbral para distinguir al agujero de ozono.

### **Estación Antártica Belgrano II.**

La estación Antártica Belgrano II está designada como GAW-Regional de medición y monitoreo de ozono, en el cual tiene implementado su programa de ozonsondeos. Esta estación se encuentra ubicada en el Nunatak Bertrab al sur del mar de Wedell en la Bahía Vahsel sobre la Costa Confin en la Tierra de Coats (77° 52'S, 34° 37'O). Este programa de medición de ozono es un convenio de Colaboración Científica entre la Dirección

Nacional del Antártico - Instituto Antártico Argentino (IAA) y el Programma Nazionale di Ricerche in Antártide (PNRA) de Italia a través del Instituto de Física Atmosférica de Roma (IFAR).

En la Figura 8 se muestra de la misma manera los ozonosondeos para los años 2020 a 2023, pero ahora la estación permanece dentro y con la influencia del vórtice polar, además del agujero de ozono.



**Figura 8.** Ozonosondeos realizados en la estación antártica Belgrano II del año 2020 al 2023 (4 años). La columna izquierda se refiere a la humedad relativa [%] las líneas blancas indican el valor máximo en la estratosfera, la columna central muestra la temperatura [°C] y las líneas blancas muestran el umbral en las cuales las NEP se forman y la columna de la derecha es el ozono [ppb] a lo largo de la estratosfera y troposfera, las líneas blancas muestran la concentración umbral para distinguir al agujero de ozono.

En la columna de la izquierda (**a, d, g, j**) es la humedad relativa [%] que muestra en la fecha de inicio, dentro de la estratosfera, valores de hasta 40%, después se observan porcentajes por debajo del 10%. Debido a que continuó la formación de las NEP tipo I y II. Es importante decir que no se detecta vapor de agua en el 2022 y 2023, al menos mediante los ozonosondeos, tal como menciona Santee et al, 2023 y Santee et al, 2024 provenientes de la erupción del volcán Hunga Tonga en el año 2022.

En la columna central (**b, e, h, k**) está la temperatura, donde se muestra el umbral para la formación de las NEP Tipo I y II. Los años 2020 y 2021 se observa como las isotermas se extienden en el tiempo, mientras que el año 2022 solo se ve en la primera ozonsonda y esto es muy consistente con el volumen de las NEP en la Figura 6. En el 2023, la temperatura retrocede después de un calentamiento súbito estratosférico que permite que las NEP finalicen su presencia antes de terminar el mes de octubre.

En la columna de la derecha (**c, f, i, l**) se muestra la concentración de ozono y como se distribuye en la vertical. Se observa una disminución de ozono entre los 15 y 25 km de altura para todos los gráficos, por debajo de los 30 ppb que denota el agujero de ozono. En año 2023 las NEP inician favorablemente y esta situación se reflejaba en la formación del agujero de ozono, pero después del calentamiento súbito estratosférico, este retrocede e incluso poco a poco disminuye su tamaño.

## 6. CONCLUSIONES

Las Nubes Estratosféricas Polares (NEP) se les consideran reservorios de compuestos destructores de ozono, debido a que contienen cloro y bromo, lanzados a la atmosfera en forma de CFCs y BrFCs, los cuales se emiten por procesos industriales. Después los procesos dinámicos de transporte y temperatura de la estratosfera, sientan las bases para su producción o en su defecto, destrucción (formando cloro activo). La química heterogénea, es la responsable directa de la formación y activación de dichos compuestos para la destrucción de ozono en la estratosfera.

Existen eventos naturales que pueden afectar la formación y destrucción de las NEP, tal es el caso de las emisiones volcánicas que pueden inyectar vapor de agua a la estratosfera y dependiendo del tipo de erupción, estas pueden ayudar a la formación de este tipo de nubes (NAT), en consecuencia se genera un agujero de ozono grande, tal es el caso del año 2015. Caso contrario, un flujo intenso de ondas atmosféricas, conducen a un elevado transporte de calor hacia la estratosfera Antártica, generando un calentamiento súbito estratosférico, que inhibe la producción de la NEP, en tal caso un agujero de ozono pequeño como en el 2019.

Es posible dar seguimiento a las NEP dentro del vórtice polar con modelos como MERRA-2 y BASCOE, que se asimilan con datos satelitales. La formación de estas nubes durante el invierno polar, junto con la temperatura estratosférica del hemisferio sur, pueden darnos un indicador de como se espera la formación y evolución del agujero de ozono.

A través de los ozonosondeos es posible dar seguimiento, a la presencia de las NEP en los puntos de medición, así como también la observación de vapor de agua, dentro y fuera del vórtice polar, además del monitoreo del agujero de ozono y sus variaciones durante la primavera austral.

## 7. REFERENCIAS

Carbajal Benítez G., Ochoa H., Barlasina M. E., Luccini E., Orte F., Estévez Pérez H. y Wolfram E., 2022: Boletín 3: Temporada del Agujero de Ozono en la Antártida 2022. Repositorio Institucional del Servicio Meteorológico Nacional, <http://hdl.handle.net/20.500.12160/2184>.



Cupeiro Manual, Ozonondeos, Repositorio Institucional del Servicio Meteorológico Nacional, <http://hdl.handle.net/20.500.12160/389>.

Fortin T. J., Drdla K., Iraci L. T., and Tolbert M. A., 2003: Ice condensation on sulfuric acid tetrahydrate: Implications for polar stratospheric ice clouds, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3, 987–997, <https://doi.org/10.5194/acp-3-987-2003>, 2003.

Höpfner M., Larsen N., Spang R., Luo B. P., Ma, J., Svendsen S. H., Eckermann S. D., Knudsen B., Massoli P., Cairo F., Stiller G., v. Clarmann T., and Fischer H., 2006: MIPAS detects Antarctic stratospheric belt of NAT PSCs caused by 815 mountain waves, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 1221–1230, <https://doi.org/10.5194/acp-6-1221-2006>, 2006.

Janusz Krzyścin, and Agnieszka Czerwinska, 2024: Signs of Slowing Recovery of Antarctic Ozone Hole in Recent Late Winter-Early Spring Seasons (2020-2023), *Atmosphere* 2024, 15, 80. <https://doi.org/10.3390/atmos15010080>.

Jensen E. J., Toon O. B., Tabazadeh A., and Drdla K., 2002: Impact of polar stratospheric cloud particle composition, number density, and lifetime on denitrification, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107, SOL 27-1-SOL 27-8, 835 <https://doi.org/10.1029/2001JD000440>, 2002.

Khosrawi F., Urban J., Lossow S., Stiller G., Weigel K., Braesicke P., Pitts M. C., Rozanov A., Burrows J. P., and Murtagh D., 2016: Sensitivity of polar stratospheric cloud formation to changes in water vapour and temperature, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 101–121, <https://doi.org/10.5194/acp-16-101-2016>, 2016.

Khosrawi F., Kirner, O., Sinnhuber B.-M., Johansson S., Höpfner M., Santee M. L., Froidevaux L., Ungermann, J., Ruhnke, R., Woiwode, W., Oelhaf, H., and Braesicke, P., 2017: Denitrification, dehydration and ozone loss during the 2015/2016 Arctic winter, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 12893–12910, <https://doi.org/10.5194/acp-17-12893-2017>, 2017.

Lauster B., Dörner S, Enell C-F., Frieß U., Gu M., Pukite J., Raffalski U., and Wagner T., 2022: Occurrence of polar stratospheric clouds as derived from ground-based zenith DOAS observations using the colour index. *Atmos. Chem. Phys.*, 22, 15925–15942. 2022. <https://doi.org/10.5194/acp-22-15925-2022>.

Leroux M. and Noel V., 2024: Investigating long-term changes in polar stratospheric clouds above Antarctica: A temperature-based approach using spaceborne lidar detections. *EGUSphere*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-131>.

Mohanakumar K. *Stratosphere-Troposphere Interactions. An Introduction*. Ed. Springer, ISBN 978-1-4020-8216-0, eISBN 978-1-4020-8217-7, 2008.

Molina M. J. and Rowland F. S., 1974: Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone, *Nature*, 249, 810–812, <https://doi.org/10.1038/249810a0>, 1974.

Noel V. and Pitts M., 2012: Gravity wave events from mesoscale simulations, compared to polar stratospheric clouds observed from spaceborne lidar over the Antarctic Peninsula, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117, <https://doi.org/10.1029/2011JD017318>, 2012.

Santee M. L., Lambert A., Froidevaux L., Manney G. L., Schwartz M. J., Millán L. F., Livesey N. J., Wagner F., Fuller R. A., 2023: Strong Evidence of Heterogeneous Processing on Stratospheric Sulfate Aerosol in the Extrapolar Southern Hemisphere Following the 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Eruption. *JGR Atmosphere*, <https://doi.org/10.1029/2023JD039169>. 2023.

Santee M. L., Manney G. L., Lambert A., Millan L., Livesey N. J., Pitts M. C., Froidevaux L., Read W. G., Fuller R., 2024: The Influence of Stratospheric Hydration from the Hunga Eruption on Chemical Processing in the 2023 Antarctic Vortex. *Authorea ESS Open Archive*, 2024.

Solomon, S., Garcia, R. R., Rowland, F. S., and Wuebbles, D. J. 1986: On the depletion of Antarctic ozone, *Nature*, 321, 755–758, <https://doi.org/10.1038/321755a0>, 1986.

Solomon, S., 1999: Stratospheric ozone depletion: A review of concepts and history, *Reviews of Geophysics*, 37, 275–316, <https://doi.org/10.1029/1999RG900008>, 1999.

Toon O. B., Hamill P., Turco R. P., and Pinto J., 1986: Condensation of HNO<sub>3</sub> and HCl in the winter polar stratospheres, *Geophysical Research Letters*, 13, 1284–1287, <https://doi.org/10.1029/GL013i012p01284>, 1986.

Tritscher I, Pitts M. C., Poole L. R., Alexander S. P., Cairo F., Chipperfield M. P., Groöß J.-U., Höpfner M., Lambert A., Luo B., Molleker S., Orr A., Salawitch R., Snels M., Spang R., Woiwode W., and Peter T., 2021: Polar Stratospheric Clouds: Satellite Observations, Processes, and Role in Ozone Depletion, *Reviews of Geophysics*, 59, e2020RG000702, <https://doi.org/10.1029/2020RG000702>, 2021.

WMO/GAW Report 201, Quality Assurance and Quality Control for Ozonesonde Measurements in GAW, G.J Smith and Panel for the Assessment of Standard Operating Procedures for Ozonesondes (ASOPOS), 2014.

## Instrucciones para publicar Notas Técnicas

En el SMN existieron y existen una importante cantidad de publicaciones periódicas dedicadas a informar a usuarios distintos aspectos de las actividades del servicio, en general asociados con observaciones o pronósticos meteorológicos.

Existe no obstante abundante material escrito de carácter técnico que no tiene un vehículo de comunicación adecuado ya que no se acomoda a las publicaciones arriba mencionadas ni es apropiado para revistas científicas. Este material, sin embargo, es fundamental para plasmar las actividades y desarrollos de la institución y que esta dé cuenta de su producción técnica. Es importante que las actividades de la institución puedan ser comprendidas con solo acercarse a sus diferentes publicaciones y la longitud de los documentos no debe ser un limitante.

Los interesados en transformar sus trabajos en Notas Técnicas pueden comunicarse con Ramón de Elía ([rdelia@smn.gov.ar](mailto:rdelia@smn.gov.ar)), Luciano Vidal ([lvidal@smn.gov.ar](mailto:lvidal@smn.gov.ar)) o Martin Rugna ([mrugna@smn.gov.ar](mailto:mrugna@smn.gov.ar)) de la Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, para obtener la plantilla WORD que sirve de modelo para la escritura de la Nota Técnica. Una vez armado el documento deben enviarlo en formato PDF a los correos antes mencionados. Antes del envío final los autores deben informarse del número de serie que le corresponde a su trabajo e incluirlo en la portada.

La versión digital de la Nota Técnica quedará publicada en el Repositorio Digital del Servicio Meteorológico Nacional. Cualquier consulta o duda al respecto, comunicarse con Melisa Acevedo ([macevedo@smn.gov.ar](mailto:macevedo@smn.gov.ar)).