



INFORME FINAL - TEMPORADA DEL AGUJERO DE OZONO ANTÁRTICO 2021

Gerardo Carbajal Benítez¹, Héctor A. 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.

INDICE

ANTECEDENTES	4
1. Introducción.	6
2. CONDICIONES METEOROLÓGICAS PREVALECIENTES	7
2.1 Temperaturas.	8
2.2 Área y volumen del NEP	10
2.3 Estabilidad del vórtice.	11
3. OBSERVACIONES DE OZONO	13
3.1 Observaciones Satelitales.	13
3.2 Estaciones en superficie.	14
3.2.1 Estación VAG USHUAIA.	14
3.2.2 Estación Antártica San Martín.	17
3.2.3 Estación Antártica Belgrano.	18
4. ACTIVACIÓN QUIMICA DEL VÓRTICE	21
4.1 Resultados de Modelo.	21
5. EL AGUJERO DE OZONO	24
5.1 El área del agujero de ozono.	24
5.2 Déficit de masa de ozono.	26
7. CONCLUSIÓN	27
8. AGRADECIMIENTOS	27
9. BIBLIOGRAFÍA	28

RESUMEN.

El presente informe muestra la evolución del Agujero de Ozono sobre la Antártida para el año 2021. La temperatura de la estratosfera mínima y zonal, ha sido fría más de lo común, hecho que es más notorio durante el segundo semestre del año (Invierno y primavera). El flujo de calor hacia la estratosfera Antártica, ha sido muy poco, y la mayor parte del tiempo el movimiento ha sido muy cercano a la calma, lo que potencia las bajas temperaturas. Las Nubes Estratosféricas Polares presentaron áreas y volumen grandes, muy superior a lo común recordando que son el reservorio principal de cloro activo. En tal sentido, la destrucción de ozono fue considerable y prolongado hasta el mes de diciembre, lo cual denota un agujero de ozono con gran profundidad y persistente en el tiempo. El área máxima del Agujero de Ozono, fue de 24.8 millones de km², ocupando el lugar 18 desde que se tiene registro (1979 al 2021) Mientras que en el promedio del 7 de septiembre al 14 de octubre alcanza un área de 23,3 millones de km², ocupando el lugar 14 desde que se tiene registro e inicia el decremento del agujero de ozono. En términos generales fue un agujero en tamaño y profundidad muy parecido al del año anterior 2020.

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

ABSTRACT.

This report shows the Ozone Hole evolution over Antarctica for the year 2021. The minimum and zonal temperature in the stratosphere has been colder than usual, a fact that is more noticeable during the second semester of the year (winter, and spring). The heat flow towards the Antarctic stratosphere has been very little, and most of the time the movement has been very close to calm, which enhances the low temperatures. The Polar Stratospheric Clouds (PSC) presented areas and volumen large, much higher than usual, remembering that PSC are the main reservoir of active chlorine. In this sense, the destruction of ozone was considerable and prolonged until December, which denotes an ozone hole with great depth and persistent over time. The maximum area of the Ozone Hole was 24.8 million km², ranking 18th since there was a record (1979 to 2021), while on average from September 7 to October 14 it reached an area of 23.3 million of km², occupying the 14th place since records are kept and the decrease of the ozone hole begins. In general terms, it was a hole in size and depth very similar to that of the previous year 2020.

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 Clorofluorocarbones (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. 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).

Debido a la variabilidad meteorológica, existen grandes variaciones interanuales en las fechas de inicio y finalización del agujero de ozono antártico, así como en el tamaño del área impactada y en la intensidad del agotamiento del ozono. Es importante separar esta variabilidad interanual de las tendencias a más largo

plazo. Por lo tanto, monitorear el agujero de ozono antártico es una tarea importante para el programa **Global Atmosphere Watch (GAW) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM)**.

Se espera que los agujeros de ozono antárticos sean recurrentes año tras año, mientras la estratósfera contenga excesos de sustancias destructoras de ozono (en inglés, ODC's). Como se indica en el Resumen Ejecutivo de la edición 2018 de la Evaluación Científica de la **OMM / PNUMA** sobre el agotamiento del ozono. En Dicho informe se observa una declinación de dichos ODC's (Cl_2 y Br_2). Fuera de las regiones polares, el ozono en la estratósfera superior ha aumentado entre 1 y 3%, por década desde el año 2000. No se ha detectado ninguna tendencia significativa en la columna total de ozono global ($60^\circ\text{S} - 60^\circ\text{N}$) durante el período 1997–2016 con valores promedio. En los años transcurridos desde la última evaluación, permanecen aproximadamente un 2% por debajo del promedio de 1964-1980. Los cambios en la capa de ozono durante la segunda mitad de este siglo, serán complejos, con aumentos y disminuciones proyectados en diferentes regiones. Se espera que la media de la columna total de ozono en el hemisferio norte, durante la década del 2030, regrese a los valores de 1980, y el ozono de latitudes medias del hemisferio sur, regrese a mediados de siglo (2050). Se espera que el agujero de ozono antártico se vaya cerrando gradualmente en la década del 2060, y que la columna total de ozono en primavera, vuelva a los valores de 1980.

Evaluaciones anteriores, a través de modelos, han mostrado proyecciones de disminución de ODC's y como resultado, el ozono global aumenta. También, los modelos han demostrado que el aumento de las concentraciones de dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) considerados los principales gases de efecto Invernadero (GEI's) durante este siglo, hará que los niveles globales de ozono aumenten, más allá del nivel natural de ozono observado en la década de 1960, debido a que estos GEI's, atrapan parte de la radiación solar reflejada y emitida por la superficie, para calentar la tropósfera baja (calentamiento global), por lo que poca radiación alcanza la estratósfera superior y esta a su vez se enfría, resultando en un cambio de la circulación estratosférica. En relación a esto último, 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 troposférico 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 troposférico.

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).

1. INTRODUCCIÓN

La interacción entre el ozono y la dinámica a gran escala en la estratosfera de la Antártida es claramente diferente a la de la estratosfera del Ártico, debido a las diferencias en la superficie subyacente. La Antártida está rodeada de manera más uniforme por el océano, que no impide la circulación zonal de los vientos en la corriente en chorro polar, lo que resulta en la aparición anual del vórtice polar estratosférico invernal mucho más fuerte y más aislado. Esto evita que el aire más cálido y rico en ozono de latitudes medias, se mezcle con el aire polar considerablemente más frío, que ha experimentado una pérdida de ozono inducida por halógenos. Por el contrario, el Ártico está rodeado por tierra y agua. Las cadenas montañosas y la convección sobre mar abierto, que por definición debe estar a una temperatura superior al punto de congelación, desvían parte de la trayectoria del chorro del polo norte y generan ondulaciones. Estas ondulaciones, llamadas ondas de Rossby, debilitan la circulación polar, transportar aire más cálido de latitudes medias a la región del Ártico y disminuir la intensidad y la duración del vórtice polar del hemisferio norte.

Como resultado de las condiciones meteorológicas, que son muy contrastantes en los dos hemisferios, la columna total el ozono en el invierno-primavera del Ártico, es siempre mayor que el de la Antártida. Incluso cuando se han producido pérdidas químicas inusualmente grandes de ozono Ártico durante temporadas de invierno-primavera que fueron anormalmente frías (p. ej., 1997 y 2011).

En base a lo anteriormente mencionado, las condiciones meteorológicas de la estratósfera antártica durante el invierno austral (junio-agosto) sientan el escenario para la formación del agujero de ozono que ocurre año tras año en la Antártida. Las bajas temperaturas llevan a la formación de nubes en la estratósfera Polares (NEPs) que son reservas de sustancias destructoras del ozono estratosférico.

La cantidad de vapor de agua en la estratosfera es muy baja, solamente 5 de entre un millón de moléculas de aire son moléculas de agua, lo cual significa que bajo condiciones normales, no existen nubes en la estratosfera. Sin embargo, cuando la temperatura cae abruptamente por debajo de los -78°C (194.6°K), empiezan a formarse nubes en la estratosfera, que consisten en una mezcla de agua y ácido nítrico (HNO_3). Estas últimas son llamadas NEPs 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. HCl y HBr) en las denominadas especies activas de cloro y bromo (por ej. ClO y 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 ClO puede destruir miles de moléculas de ozono antes de ser inhibidas, mediante la reacción con dióxido de nitrógeno. (NO_2).

Cuando las temperaturas disminuyen abruptamente por debajo de los -85°C (187.8°K), se formarán nubes que consisten en hielo de agua pura. Estas últimas son denominadas NEPs 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 estratosfera. En este proceso traen consigo ácido nítrico (HNO_3). El ácido nítrico es considerado un reservorio que libera NO_2 bajo condiciones de iluminación solar. Si el NO_2 es removido físicamente de la estratosfera (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 NEPs de tipo I, puesto que las especies halógenas son mejor activadas, cuando se encuentran en las superficies de partículas de hielo de mayor tamaño.

El Vórtice polar es un sistema de baja presión, donde los fuertes vientos (Jet Polar) en la estratosfera circundan el continente antártico, dentro del Jet Polar, es caracterizado por temperaturas muy bajas y gran pérdida de ozono que supera a cualquier parte del mundo. A inicios del mes de agosto, la información sobre parámetros meteorológicos y mediciones de estaciones terrestres, ozonosondeos, información de satélites y otros componentes como modelos para pronóstico, pueden proporcionar una idea del desarrollo del vórtice polar y, por lo tanto, dan información acerca de cómo será la evolución del agujero de ozono durante la temporada. Las bajas temperaturas conducen a la formación de las llamadas nubes estratosféricas polares (NEPs).

Para mayor información sobre el agujero de ozono antártico y la pérdida de ozono en general, se solicita a los lectores que se contacten con la página web de ozono de la OMM:

<http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone/index.html>.

2. CONDICIONES METEOROLÓGICAS PREVALECIENTES.

Los datos meteorológicos utilizados en este informe provienen de la Oficina de Asimilación y Modelo Global de la NASA <http://macc.aeronomie.be/index.php> y del Centro Europeo para Pronósticos del Tiempo de Medio Alcance (ECMWF). Los reanálisis provenientes del GMAO, los así denominados datos MERRA, han sido bajados del sitio web de Vigilancia del Ozono de la NASA (<http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>). Los datos del ECMWF han sido extraídos y bajados del Instituto Noruego para Investigación del Aire (NILU) que ponen estos datos a disposición a través de un proyecto financiado por la Agencia Espacial Europea (ESA).

Para el análisis de la composición química de la estratosfera Antártica, se usan los datos BASCOE, dentro del sistema Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAM5) que es el predecesor del MAC. El sistema de asimilación BASCOE fue hecho para hacer análisis en tiempo real y predicciones a cierta cantidad de días.

(http://macc.aeronomie.be/4_NRT_products/5_Browse_plots/1_Snapshot_maps/index.php?src=BASCOE&spc=o3&l=at-050hPa.)

Los datos para el análisis de los calentamientos repentinos en la estratosfera, se usan imágenes del Centro Regional del Clima (RII WMO, Asia), con sede en TOKIO. <http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/clisys/STRAT/>

Para los datos de la Columna Total de ozono en superficie, se usa el Espectrofotómetro Dobson de la estación GAW-Ushuaia, dependiente del Servicio Meteorológico Nacional. Los datos de la Columna Total de Ozono en superficie de la Estación Antártica San Martín, son gentilmente proporcionados por el instituto Antártico Argentino (IAA) dependencia de la Dirección Antártica Argentina (DNA). Finalmente los perfiles de ozono se obtienen de los ozonosondeos realizados en la Estación GAW-Ushuaia y de la estación Antártica Marambio, esta última en convenio con el Instituto Meteorológico Finlandés (IMF).

2.1 Temperaturas.

Las temperaturas estratosféricas sobre la Antártida estuvieron por debajo del umbral de formación de las Nubes Estratosféricas Polares (NEP) tipo I (194.6 K) desde el 12 de mayo y por debajo del umbral de las NEP tipo II (187.8 K) desde el 5 de junio, ver **Figura 1**. También se observa que desde el inicio de año hasta inicios de la primavera, la curva de temperatura oscila alrededor de la media. Posteriormente, a mediados de septiembre, la estratosfera se mantiene más fría que de lo normal, favoreciendo la permanencia y formación de la Nubes Estratosféricas Polares (NEP)

En la **Figura 2** se muestra que la temperatura media zonal a nivel de 50 hPa y entre la región de 60° y 90°, ha estado oscilando alrededor de la media (1979 a 2020) desde inicio del año hasta el mes de septiembre. A mediados del mes de septiembre y hasta final del año la estratosfera permaneció fría, también favoreciendo las NEP, más tiempo de lo común.

Al mismo tiempo en la **Figura 3**, a nivel de 10 hPa, la Temperatura Media Zonal ha estado oscilando alrededor de la media del periodo correspondiente de 1979 a 2020. Consistentemente, a mediados de septiembre, se continúa con una estratosfera fría y se extiende hasta fin de año, tal como las temperaturas de niveles más bajos.

En términos generales, las temperaturas en la estratosfera a mediados de septiembre se mantienen por debajo de lo común, situación muy similar al del año 2020. Por momentos, se rebasaron los valores mínimos históricos del periodo 1979 al 2020.

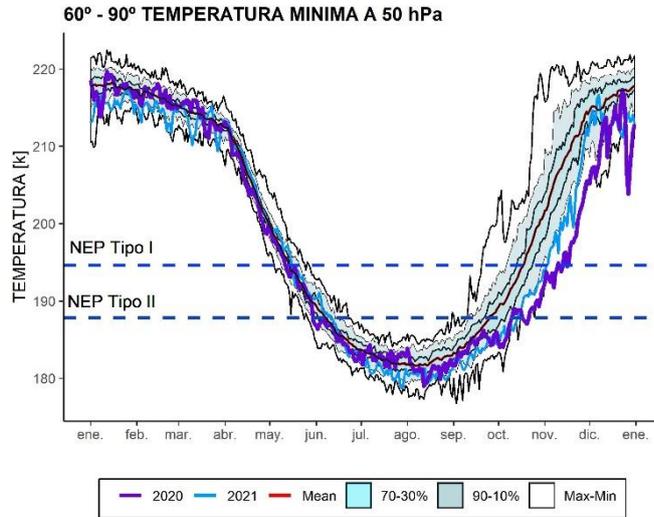


Figura 1. Temperatura mínima promedio a 50hpa, sobre la región de 50° a 90° S. La línea color azul representa la evolución de la temperatura mínima para el año 2021, la línea morada representa la temperatura para el año 2020, mientras que la línea marrón representa la media para el periodo 1979-2020. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos durante el periodo 1979-2018. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%. Las líneas rectas punteada de color azul, representan las nubes NEP tipo I (arriba) y NEP tipo II (abajo).

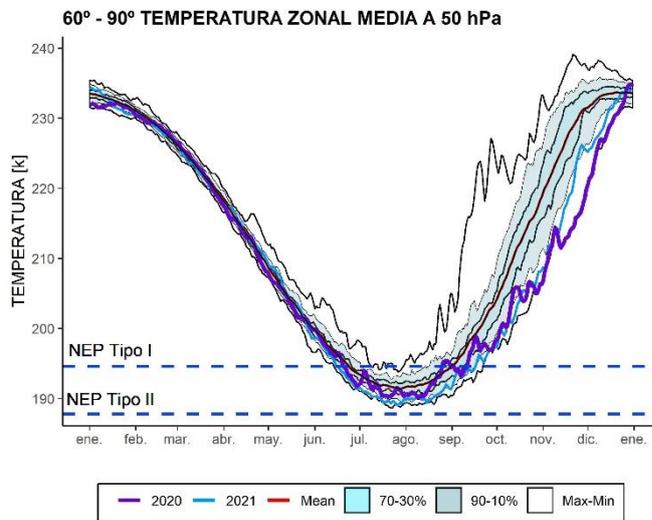


Figura 2. Temperatura zonal media a 50hPa, sobre la región de 60° a 90° S. La línea color azul representa la evolución de la temperatura zonal media para el año 2021, la línea morada representa el mismo parámetro para el año 2020, la línea marrón representa la media para el periodo 1979-2020. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos durante el periodo 1979-2018. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%. Las líneas rectas punteada de color azul, representan las nubes NEP tipo I (arriba) y NEP tipo II (abajo).

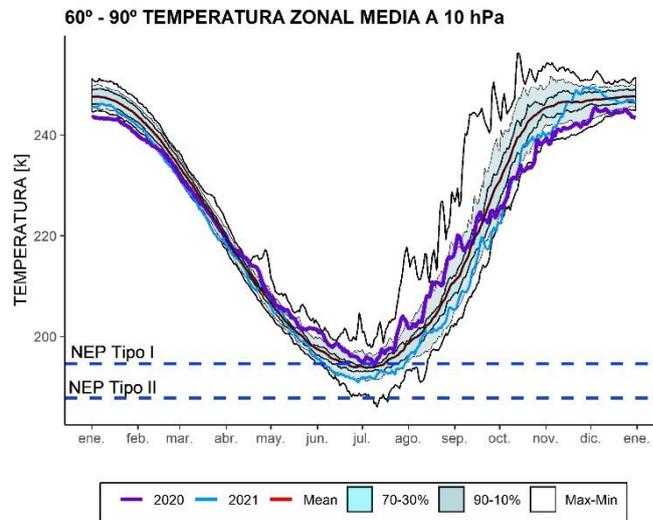


Figura 3. Temperatura zonal media a 10hPa, sobre la región de 60° a 90° S. La línea color azul representa la evolución de la temperatura zonal media para el año 2021, la línea morada representa la temperatura para el año 2020, la línea azul oscuro representa la media para el periodo 1979-2020. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos durante el periodo 1979–2018. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%. Las líneas rectas punteada de color azul, representan las nubes NEP tipo I (arriba) y NEP tipo II (abajo).

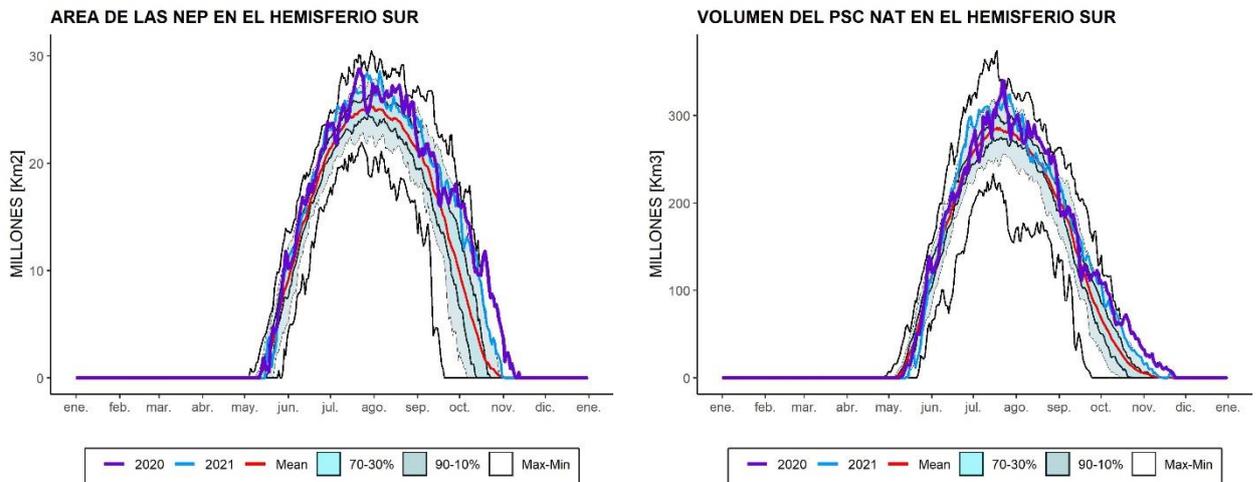
2.2 Área y Volumen de las Nubes Estratosféricas Polares (NEP).

Con la aparición de las NEP a mediados de mayo durante el inicio del invierno y en plena formación del vórtice en la Antártida, se inicia el preámbulo para el agujero de ozono. Las Temperatura mínima necesaria para la formación de **NEP tipo I** son 194.6 K (-78.5°C) y las **NEP tipo II** se forman a partir de los 187.8 K (-85.4°C).

El 27 de julio, las NEP alcanzan su extensión máxima con 28.4 millones de km² (Figura 4), consistente con las temperaturas más frías de lo normal en la estratosfera. Al inicio de la primavera, las NEP empiezan a decrecer pero más lentamente de lo común. Es decir de su media (1979 a 2020). Debido a la estratosfera continua fría, estas son más persistentes y en algunos momentos muy similares al 2020. A mediados del mes de octubre, inician su descenso más temprano que el 2020.

El volumen de las NEP (Figura 5) se incrementa a partir de la primera parte del mes de mayo, y oscila alrededor de la media del periodo 1979 a 2020. El 19 de julio las NEP alcanza su valor máximo con 317.6 millones de Km³. Luego, los valores permanecen muy cercanos a la media (1979 - 2020). Posteriormente disminuyen hasta alcanzar el volumen cero, a partir del día 23 de noviembre.

Las temperaturas lo suficientemente bajas para la existencia de NEP, se encuentra directamente relacionado con la cantidad de la pérdida de ozono que tendrá lugar más tarde en la estación del año, pero el grado de la pérdida de ozono depende también de otros factores, como la cantidad de vapor de agua y HNO₃.



Figuras 4 y 5. Serie de tiempo del Área y volumen de las nubes estratosféricas polares (NEP) sobre la región Antártica, donde la temperatura están suficientemente bajas para la formación de ácido nítrico trihidratado (NEP tipo I) en el nivel isentrópico de 460 K. La línea color morada representa la evolución del tamaño y volumen de la NEP para el año 2020, la línea azul representa el mismo parámetro para el año 2021, la línea roja representa la media para el periodo 1979-2020. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos históricos durante el periodo 1979 – 2020. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%.

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 estratósfera. En la **Figura 6** se muestra el desarrollo del flujo de calor. Lea el subtítulo para mayores detalles de cómo interpretar el gráfico.

Durante los primeros meses del año, hasta principios de mayo, el valor medio de 45 días del flujo de calor en 100 hPa (Curva 2021) ha sido menor a la media del periodo 1997-2020, lo que supone gran movimiento del flujo de calor. Después, dicha curva tiende a disminuir la intensidad, incluso llega a valores máximos históricos hasta inicios del mes de agosto, es decir, el flujo disminuye considerablemente. Al no haber flujo de calor hacia la estratosfera, ésta tiende a enfriarse, tal como se mostró en el apartado de temperaturas.

La **Figura 7** se muestra los mapas de vorticidad potencial (PV) en el nivel isentrópico de 485 K (~19 km de altura) para los días 19 de cada mes, desde julio hasta noviembre durante los 3 últimos años 2019 al 2021 (de abajo hacia arriba). Se observa durante el mes de julio, un vórtice muy similar durante los tres años. En el año 2019 en el mes de septiembre, se puede ver un vórtice más pequeño comparado con los dos años posteriores, pero en octubre muestra que el vórtice se debilita, mientras que los años 2020 y 2021, son muy parecidos en tamaño y profundidad. El mes de noviembre, el vórtice del 2019 ya casi desapareció, mientras que los dos años siguientes se observa una profundidad muy similar, marcado más en el 2020, lo cual marca una estratosfera fría y una agujero de ozono más extendida en el tiempo, es decir, un cierre tardío respecto a lo normal.

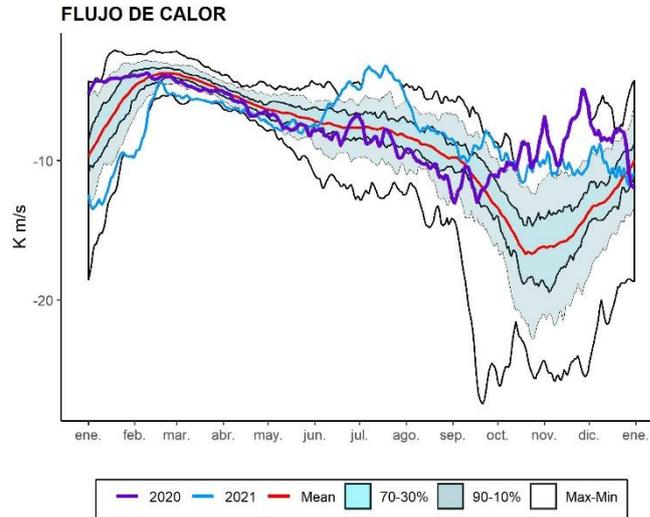


Figura 6. Serie de tiempo del flujo de calor meridional promediado sobre la región entre 45-75°S. La curva azul muestra los datos para el año 2021, la línea morada representa al año 2020. Note que entre más negativo es el número, significa un alto flujo de calor. Los valores cercanos a cero significan un flujo de calor muy pequeño y calmo. La línea roja representa la media para el periodo 1979-2020. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2020. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%.

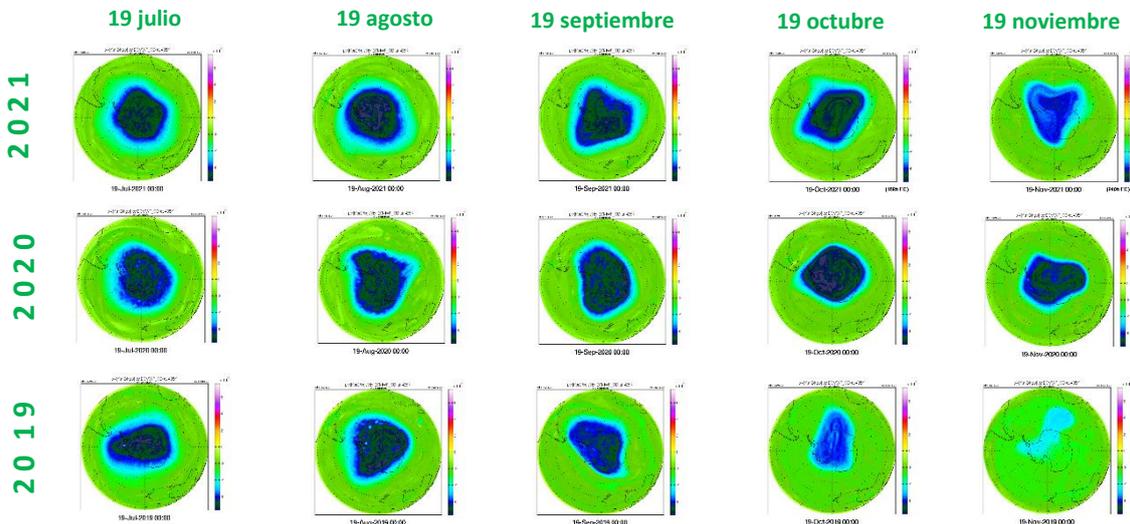


Figura 8. Mapas de vorticidad potencial (PV) a una altura isentrópica de 485 K, para los días 8 de cada mes (mayo - noviembre) para los años 2019, 2020 y 2021, respectivamente. Los valores negativos más cercanos a cero, indican un vórtice débil (tono de color más claro).

3. OBSERVACIONES DE OZONO

3.1 Observaciones Satelitales

Con el retorno del sol al inicio de la primavera austral en la Antártida, tanto los datos satelitales, los datos de superficie y sondeos con globos, muestran que el agujero de ozono, inicia una formación temprana del agujero de ozono y en esas fechas se encuentra en etapa de crecimiento y fortalecimiento. Lentamente se empiezan a mostrar en algunas de las observaciones.

La **Figura 9** muestra las columnas de ozono mínimas tal como han sido medidas por el instrumento GOME-2 a bordo del MetOp. Se aprecia que a partir de los primeros días de agosto, empieza la destrucción de ozono superando la media histórica del periodo 1979 al 2020 y se intensifica durante el mes de septiembre, siendo muy similar al del año 2020, inclusive en algunos casos la destrucción alcanza los mínimos históricos. Esta gran destrucción, continúa hasta fin de año. Esta gran destrucción de ozono nos permite establecer que el agujero de ozono fue de gran profundidad, en tal caso, explica el cierre de éste la tercera semana del mes de diciembre. Éste hecho, muy probablemente es debido a una estratosfera muy fría y la persistencia de las NEP que son reservas que contienen sustancias destructoras de ozono.

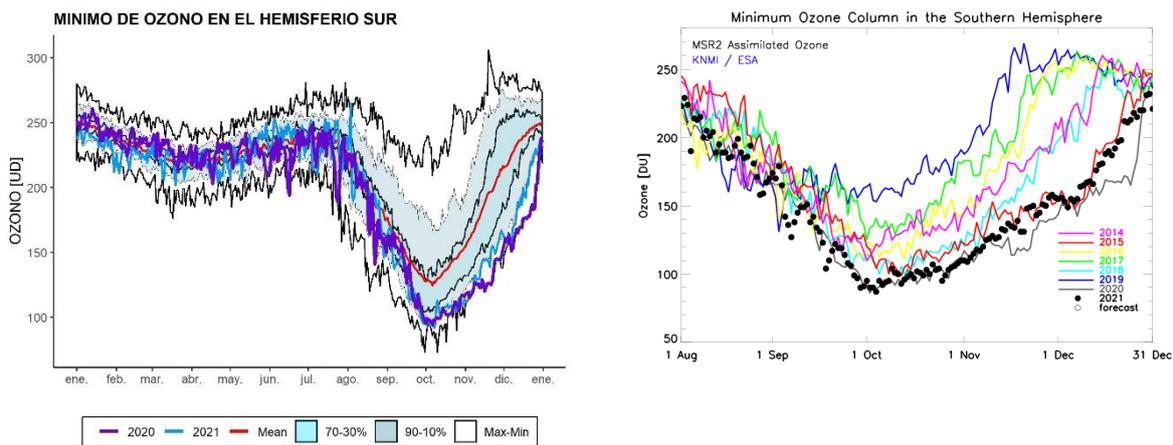


Figura 9. Mínimo diario de la columna total de ozono en el Hemisferio Sur observado por GOME-2 (izq.), y SCIAMACHY (der.) La línea azul muestra las observaciones de GOME-2 para el año 2021, la línea morada representa al año 2020, la línea roja es la media del periodo 1979 a 2020. Las líneas negras son máximos y mínimos, mientras que las áreas sombreadas representan los percentiles de 10 a 90% y 30 a 70%, del mismo periodo que la media. La figura (der.) está adaptada desde un gráfico provisto por el Instituto Holandés de Meteorología (KNMI).

La **Figura 10** muestra los mapas de las columnas de ozono total de las observaciones del satélite OMI para los meses de julio a diciembre para los años 2019, 2020 y 2021. Donde se aprecia claramente que el año 2019 el agujero de ozono es de menor tamaño y se cierra en el mes de noviembre, debido que a inicios del mes de septiembre la estratosfera sufrió un calentamiento repentino, que inhibió la producción de las NEP y por lo tanto, pocas sustancias químicas destructoras de ozono. Para el año 2020, el agujero de ozono se observa muy estable y de gran profundidad, debido a un enfriamiento estratosférico sin precedentes, lo que ocasiona una prolongación hasta finales de diciembre. El año 2021 muestra que ha sido muy similar al del año 2020, estratosfera fría, más de lo común durante los meses de

septiembre, octubre y noviembre, lo cual se observa en la profundidad y persistencia del agujero de ozono y éste se cierra a mediados del mes de diciembre.

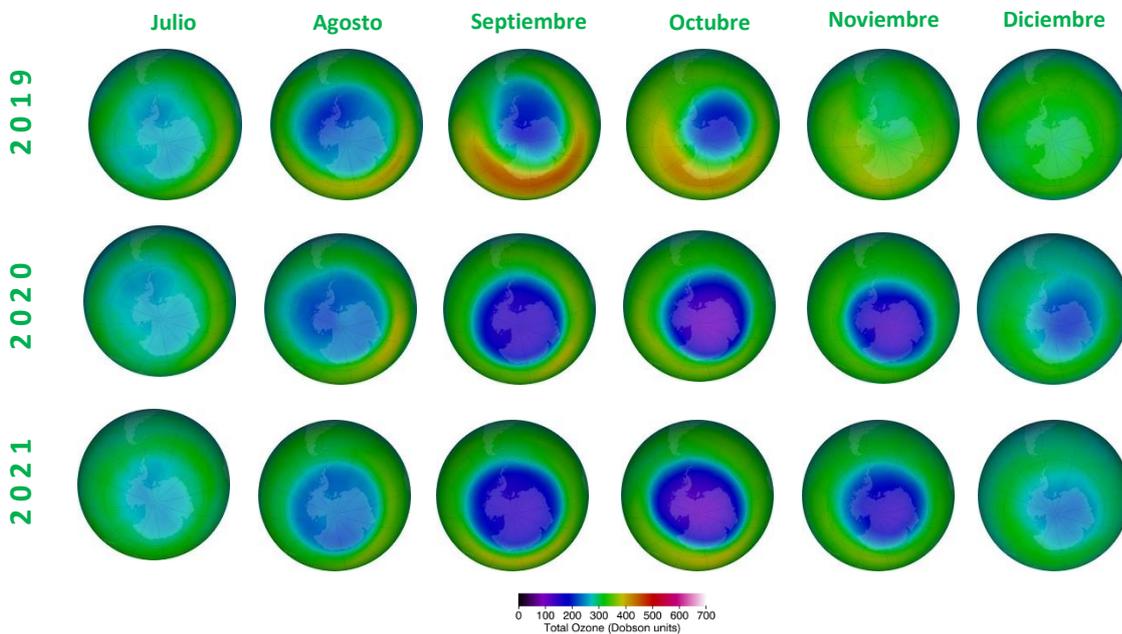


Figura 10. Mapas de columna total de ozono del OMI para la segunda mitad de los años 2019, 2020 y 2021.

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) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Además de la Estación Antártica San Martín (67°07'48'' S, 67°06' 08'' O), dependencia de la Dirección Nacional Antártica/Instituto Antártico Argentina (DNA/IAA).

3.2.1 Estación VAG-USHUAIA.



La Estación de Vigilancia Atmosférica Global (VAG) de Ushuaia forma parte de la red de medición de parámetros físicos y químicos de la atmósfera de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). La estación VAG de Ushuaia se localiza al borde del Vórtice Polar, de tal manera que en temporada de agujero de ozono, éste puede pasar por arriba de la ciudad de Ushuaia e incluso adentrarse hacia el norte de la Provincia de Tierra del Fuego.

El espectrofotómetro Dobson (#D131) mide todos los días y en la **Figura 11a**, se muestra la evolución de la columna total de ozono para el año en curso, comparado con su media histórica (1994-2020). Algunos días faltantes debido a las condiciones meteorológicas adversas que impiden la operación del instrumento. En la **figura 11b** se muestra los datos de la columna total de ozono del SCIAMACHY & GOME-2. En ambos casos se puede observar que los valores están muy cercanos y oscilan al rededor a la media, excepto algunos días de noviembre que muestran más destrucción de ozono, inclusive rebasando los mínimos históricos. Para este año 2021, solo un día, el agujero de ozono pasa por la ciudad de Ushuaia, siendo el 15 de noviembre mostrando un valor de 208 UD.

En la **Figura 12** se muestran los valores del del Índice ultravioleta (IUV) donde se observa que cercanos al día 15 de noviembre, se presentan los valores mas altos del IUV, siendo el valor máximo de IUV = 10 (Valor Alto).

En la **Figura 13** se muestra los 9 perfiles de ozono durante los ozonosondeos, y se observa en términos generales que no hay perdida significativa e ozono, pero si se observa gran cantidad de ozono que circunda el vórtice polar y no alcanza a entrar al interior de dicho vórtice. En la misma figura se aprecia el perfil de temperatura, donde se observa que no hay un enfriamiento significativo circundando el vórtice antártico.

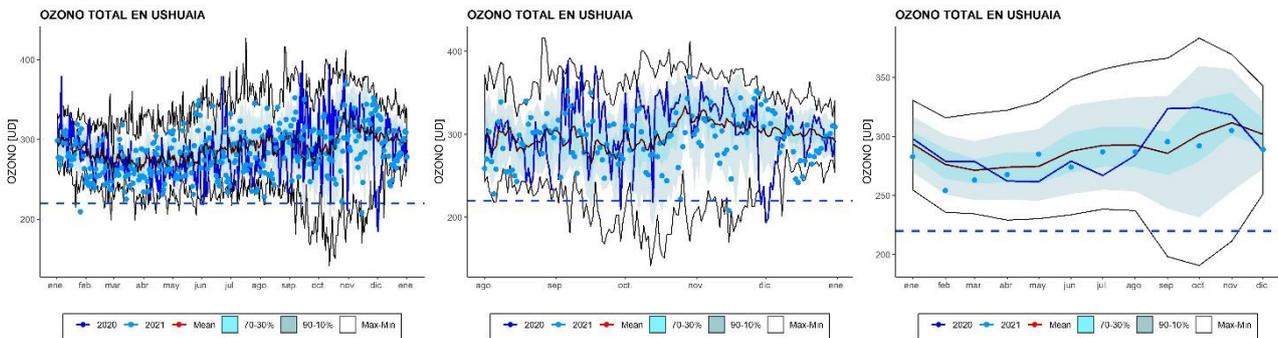


Figura 11. Datos de la columna de Ozono Total (COT) en Unidades Dobson [UD] medidos con el Espectrofotómetro Dobson en la estación VAG Ushuaia. Los puntos azules representa la COT para el año 2021. La línea morada representa la COT para el año 2020. La línea roja es la media para el periodo 1994-2020.

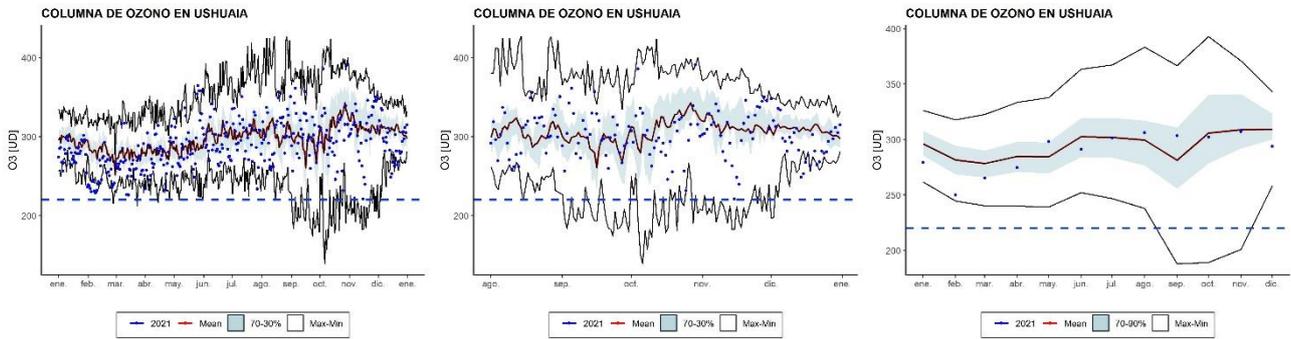


Figura 11a. Datos de la columna de Ozono Total (COT) en Unidades Dobson [UD] medidos con los SCIAMACHY & GOME-2 (v2.0-2.2) en la estación VAG Ushuaia. Los puntos azules representan la COT para el año 2021. La línea roja es la media para el periodo 2002-2020.

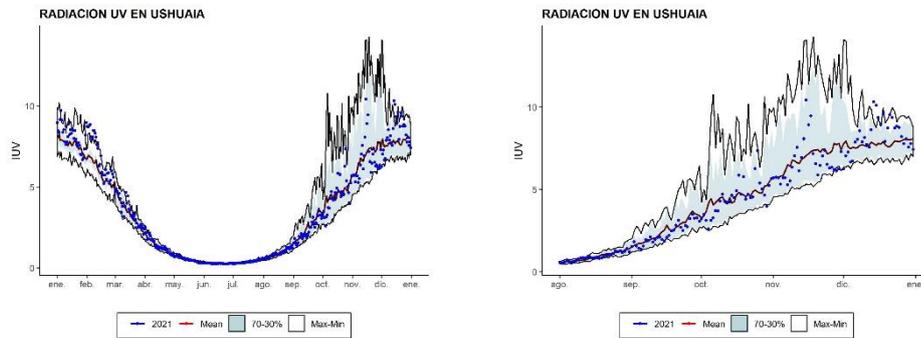


FIGURA 12. índice de radiación ultravioleta registrados asociados al ozono en la estratosfera, medidos con los SCIAMACHY & GOME-2 (v2.0-2.2) en la estación VAG Ushuaia. Los puntos azules representan la COT para el año 2021. La línea roja es la media para el periodo 2002-2020.

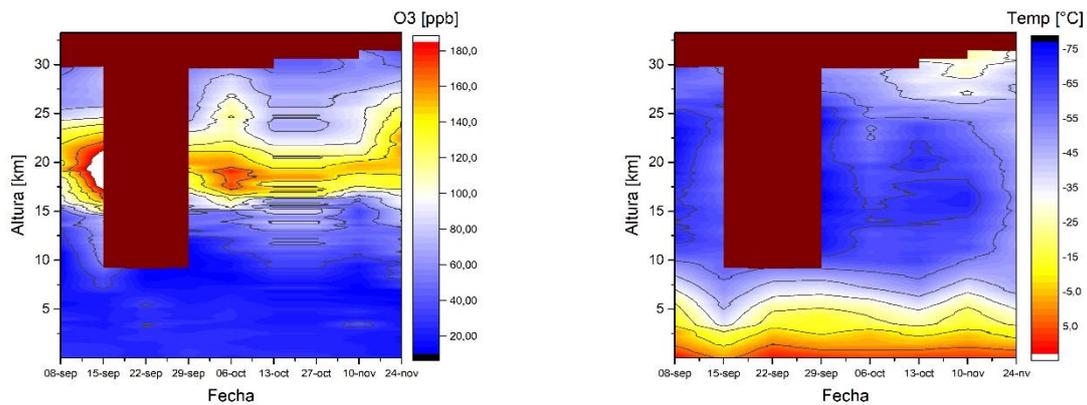


Figura 13. 6 Ozonosondeos realizados en la Estación VAG de Ushuaia los días 28 de agosto y 3, 9, 16 de septiembre, 28 de octubre y 6 de noviembre del 2019. De izquierda a derecha y arriba abajo, progresivamente.

3.2.3 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 comenzó a medir normalmente a partir del día 13 de septiembre, fecha en la cual el μ (factor de masa de aire) tiene el valor adecuado para comenzar a medir en este período.



El espectrofotómetro Brewer de Base San Martín está siendo operado y mantenido por el personal técnico del IAA Ing. Rodrigo Azpilcueta y el Ing. Alvaro Martín Errasquin (2021).

En la **Figura 14** son los valores diarios durante todo el año. El hueco que se observa entre mayo a septiembre, es la noche polar que no se mide, debido a la noche polar y a las características meteorológicas adversas. Los primeros meses, los

valores oscilan alrededor de la media y también se aprecia una alta variabilidad, no se puede hacer afirmaciones porque el programa de medición inicia en el año 2016 y son muy pocos valores, pero no se observan eventos significativos. Para una mejor apreciación en la **Figura 14** se observa que la mayoría de los puntos están por debajo de la media, inclusive debajo de sus mínimos históricos, lo cual denota la gran destrucción de ozono y es consistente con las mediciones satelitales presentadas en la sección anterior (3.1 Observaciones Satelitales). También muestra que la estación detecta la profundidad del agujero de ozono. Finalmente, los datos mensuales en la **Figura 14**, durante los meses de septiembre a diciembre se encuentran por abajo de los valores mínimos de la serie del periodo 2016 a 2020.

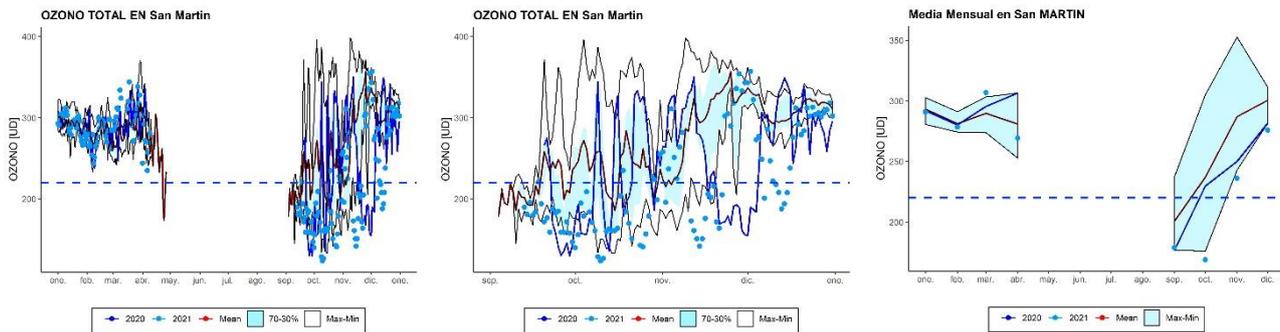


Figura 14. Datos de la columna de Ozono Total (COT) en Unidades Dobson [UD] medidos con el Espectrofotómetro Brewer en la estación Antártica san Martín. Los puntos azules representan la COT para el año 2021. La línea morada representa la COT para el año 2020. La línea roja es la media para el periodo 2016-2020.

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.

En la **Figura 15** se muestra los valores de la columna total de ozono diarios y el promedio mensual, donde se detecta la profundidad del agujero de ozono en ambos gráficos e inclusive tocan los mínimos historias (1992 a 2020) y los del año 2021.

En **la Figura 16** se muestra los ozonosondeos, el perfil para ozono (Izquierda) y el perfil de temperatura (Derecha). El agujero de ozono entre los 14 y 20 km de altura muestra la destrucción de ozono y su evolución, así como el cierre tardío.

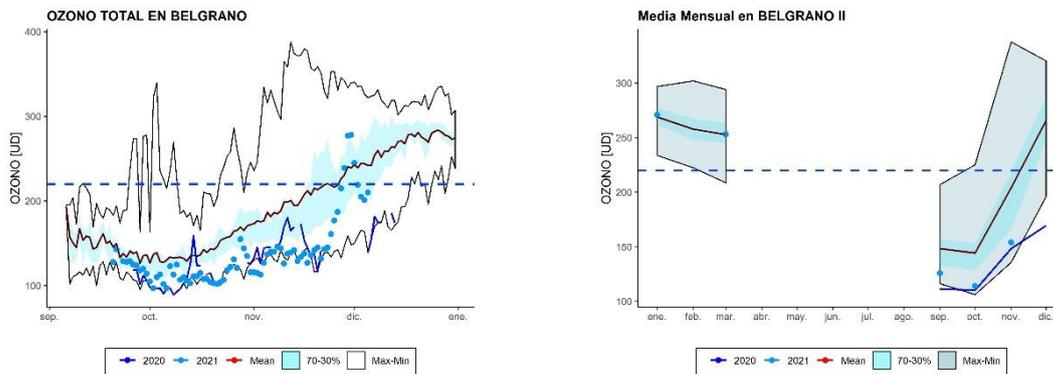


Figura 15. Columna total de ozono para la Estación Antártica Belgrano II. Los datos son desde 1992 hasta el 2020.

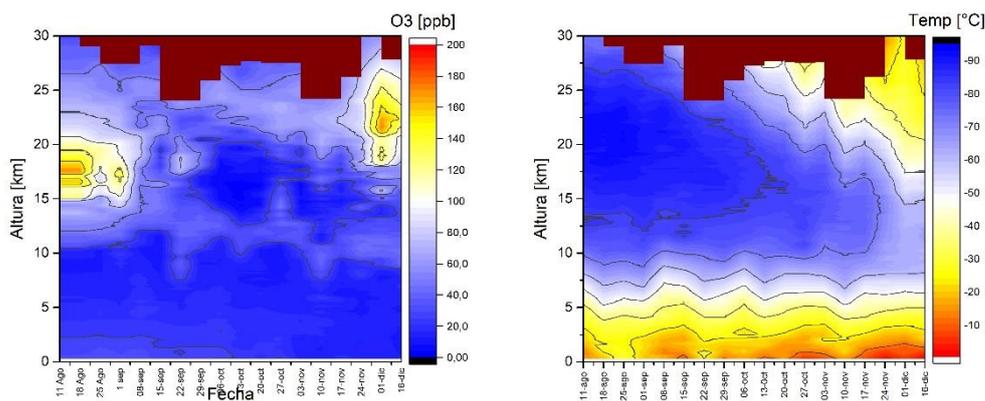
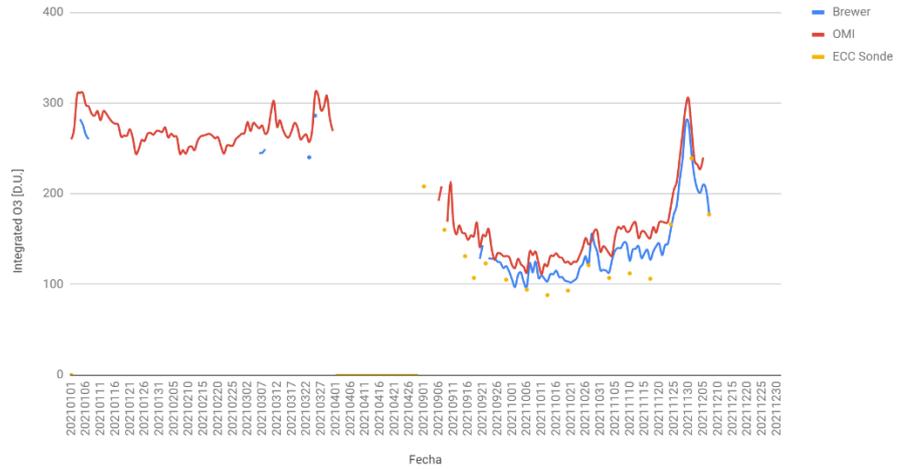


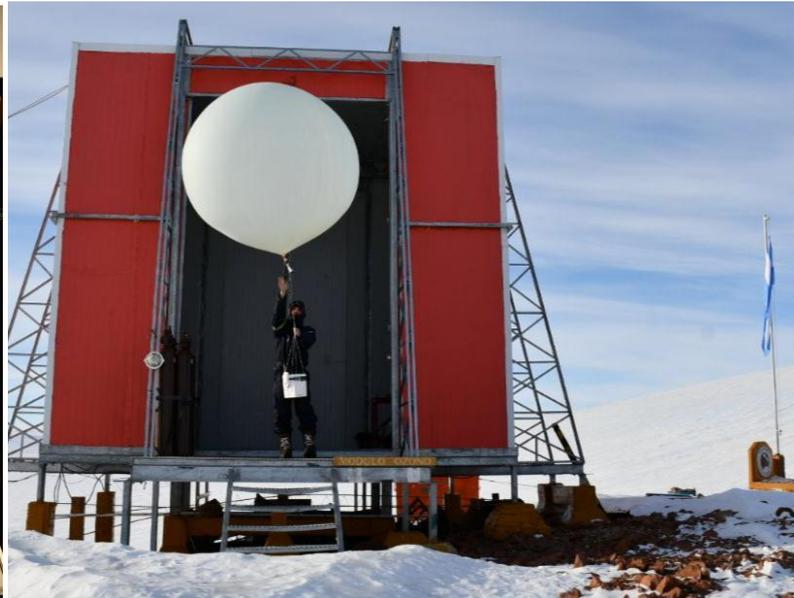
Figura 16. Ozonosondeos realizados en la Estación Antártica Belgrano II. En los cuatro gráficos. Izquierda; Perfil de ozono con unidades [ppb]. Derecha; la temperatura en [°C]



B099 vs OMI vs ECC Sonde



En la imagen podemos ver los registros del espectrofotómetro Brewer #099 (año 2021) vs registro satelital de OMI y algunas valores de las ozonosondas lanzadas durante el presente año.



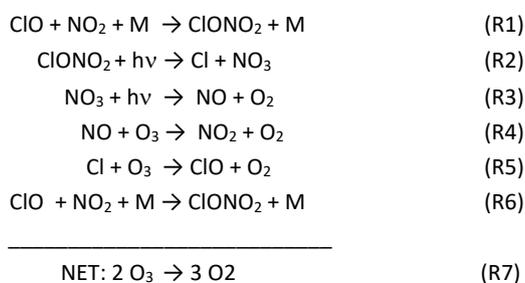
El Ing. Heraldo Iván Vilca, es el responsable de la calibración de las ozonosondas, lo podemos ver en la foto de la izquierda preparando las soluciones químicas. Los Técnicos Sebastián Firpo y Santiago Kyanka son los responsables de preparar el globo y realizar el lanzamiento del ozonsondeo.

4. ACTIVACIÓN QUÍMICA DEL VÓRTICE

4.1 Resultados del Modelo.

La **Figura 17** muestra el comparativo de las cuatro especies químicas para el año 2021 en el nivel de 50 hPa. Los gráficos han sido realizados a partir de la salida del modelo BASCOE en el Instituto Belga para la Aeronomía Espacial (BIRA-IASB). Este último está a cargo del monitoreo y evaluación de los productos de composición estratosférica suministrados por los proyectos MACC europeos. En este contexto, el sistema de asimilación BASCOE ha sido dispuesto para suministrar en tiempo casi-real, análisis y pronósticos del ozono, además de especies relacionadas con el mismo en la estratosfera. 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 offline (nivel-2. V3.3) obtenidos del instrumento Aura-MLS. El conjunto de datos offline incluye varias especies: O₃, H₂O, HNO₃, HCl, ClO, (ClO)₂, HOCl y N₂O. La información acerca de los proyectos MACC del modelo BASCOE con referencias, se pueden encontrar en la dirección web: http://macc.aeronomie.be/4_NRT_products/3_Models_changelogs/BASCOE.php.

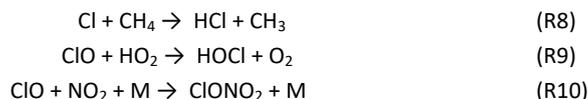
Las reacciones heterogéneas son procesos que involucran distintas fases como gaseosa, sólidas y líquidas, estas son extremadamente significativas en la estratosfera Antártica, debido que catalizan la formación de compuestos clorados que se encuentran como reservorio en las NEP. La importancia de tales reacciones, es la liberación de cloro y son removidos o atrapados por especies de nitrógeno (NO_x), que en su forma más estable está como ácido nítrico (HNO₃) A través de varios mecanismos de las reacciones, los NO_x 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 R7 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.

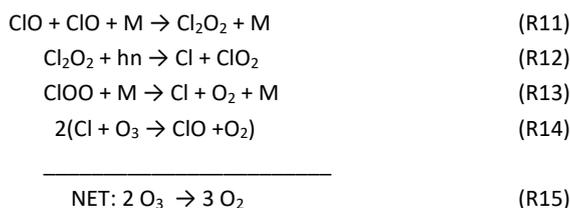
Se puede apreciar a partir de la **Figura 17a** como el ácido nítrico (HNO₃) a partir del mes de mayo, es removido gradualmente, hasta el mes de noviembre. La remoción de HNO₃ gaseoso, inicialmente en el mes de mayo (Invierno), es una indicación de que este compuesto se condensa en la forma de nubes estratosféricas polares (ácido nítrico, trihidratado, HNO₃·3H₂O).

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



En la segunda fila de la **Figura 17b** representa al ácido clorhídrico (HCl) que su comportamiento es muy similar, pero no idéntico al HNO₃. La remoción comienza en el mes de mayo (Invierno) prolongándose hasta el mes de septiembre, cuando inicia la primavera austral, donde el cloro activo formado a través de los procesos fotoquímicos, reacciona con el metano para formar HCl (R8). Este proceso termina activando menos cloro para la destrucción de ozono.

Un buen indicador de la activación del vórtice, es la cantidad de óxido de cloro (ClO). Sin embargo, se debe observar que el ClO se dimeriza y forma (Cl₂O₂). 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 (Cl₂O₂), el cual no es observado por el Aura-MLS, pero es calculado por el modelo BASCOE. Observando la suma del monómero y dímero (ClO + Cl₂O₂) se puede obtener una mejor impresión del grado de activación del cloro:



En la reacción R15, nuevamente se observa que dos moléculas de ozono se transforman en 3 moléculas de oxígeno, a partir del ciclo de reacciones catalíticas.

Esto se muestra en la tercera fila de la **Figura 17c**, donde se observa que a partir del mes de mayo (invierno) la presencia de ClO₂ o ClOx ya está presente, alcanzando su máximo en el mes de julio y agosto. Al inicio de la primavera en septiembre, se nota un decaimiento debido a la luz solar que provoca la liberación de cloro activo para la destrucción del ozono. En el mes de octubre, poco ClOx está presente y la mayor parte se encuentra como cloro activo. Finalmente en los meses de noviembre y diciembre, queda presente dentro del vórtice solo cloro activo residual.

En la última fila de la **Figura 17d** se muestra el ozono a nivel de 50 hPa con unidades partes por millón (ppb) que es muy consistente con las especies químicas analizadas, en especial el COx que conforme desaparece desde el mes de septiembre y forma cloro activo, la concentración de ozono disminuye, incluso hasta el mes de noviembre.

En el apartado del tamaño del agujero de ozono analizaremos la profundidad y el cierre tardío del mismo.

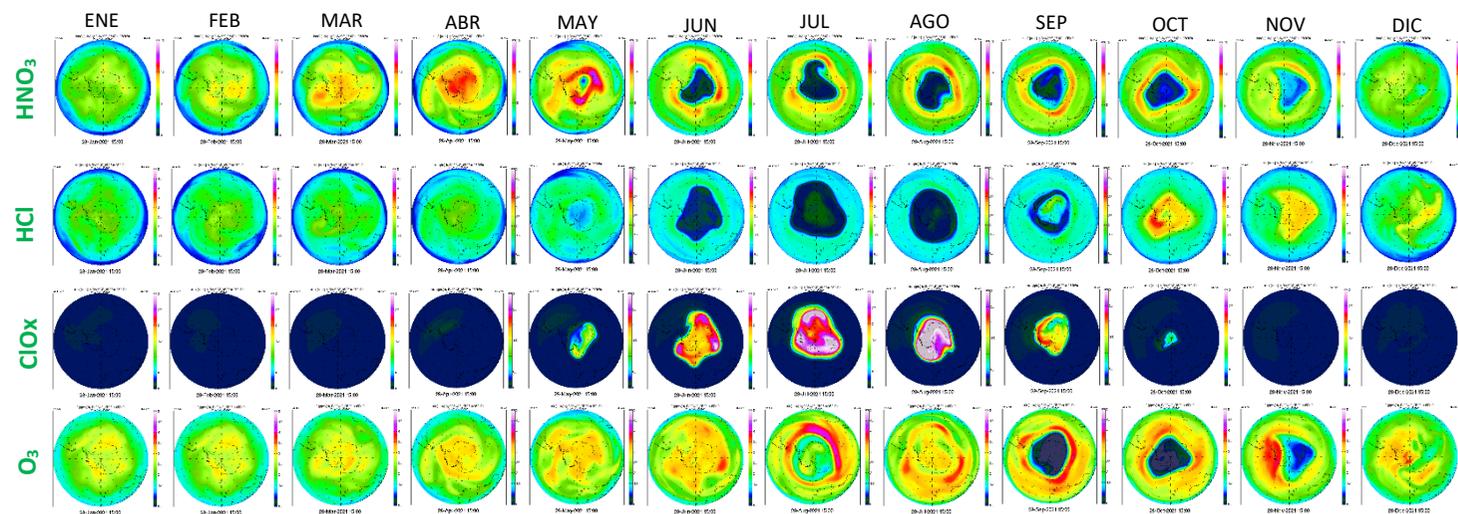


Figura 17. Resultados del modelo de asimilación BASCOE a 50 hPa. Este modelo se usa como parte del proyecto macc-II, ahora el NRT Análisis de ozono y especies relacionadas con el ozono (http://macc.aeronomie.be/4_NRT_products/5_Browse_plots/1_Snapshot_maps/index.php?src=BASCOE&spc=o3&l=at-050hPa). La primera fila (a) muestra la relación de mezcla del ácido nítrico (HNO₃). La segunda fila (b) muestra la relación de mezcla para el ácido clorhídrico (HCl). La tercera fila (c), muestra la relación de mezcla para el óxido de cloro y su dímero (ClO_x = ClO + 2Cl₂O₂). La última fila (abajo) muestra la relación de mezcla del ozono.

5. El Agujero de ozono

5.1 El área del agujero de ozono

En la **Figura 18** se muestra el área de la región en la que el ozono total es menor a las 220 UD (Agujero de Ozono) tal como es deducida por el instrumento GOME-2 a bordo del Metop y SCIAMACHY en el Envisat.

En dichas figuras, se muestra el inicio y crecimiento del agujero de ozono, que en términos generales fue muy similar al del año 2020. El inicio fue más tardío que lo común, comparado con la media del periodo 1997 a 2020. Después el crecimiento fue rápido y a mediados de agosto, su tamaño supera al de la media, alcanzando un tamaño máximo de 24,81 millones de km² para el día 7 de octubre. Después inicia el descenso en el crecimiento, muy parecido al 2020 pero muy por encima de la media. La primera semana de noviembre se observa una caída repentina y más rápida que la del año 2020, aunque la primera semana de diciembre nuevamente el tamaño del agujero de ozono es igual al del año 2020. Finalmente, la fecha que el agujero se cierra es aproximadamente el 22 de diciembre.

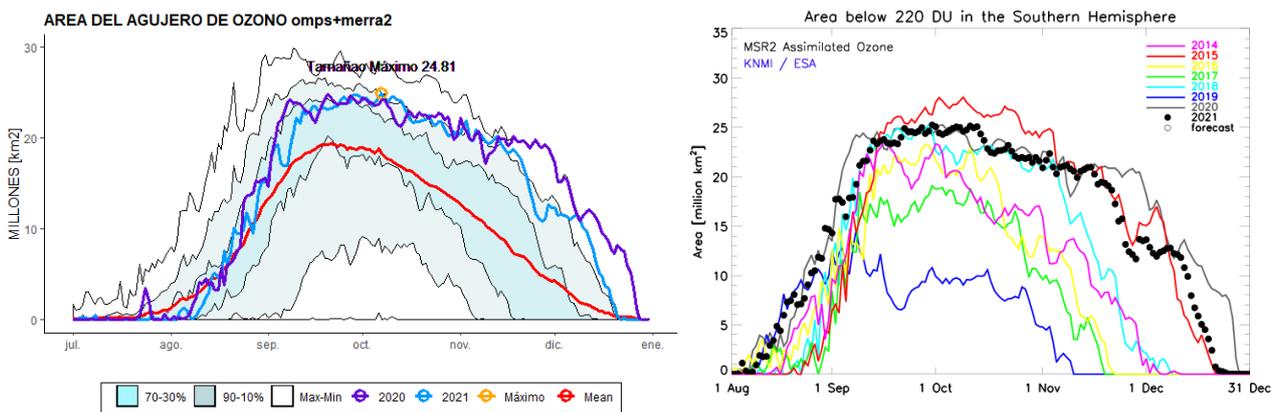


Figura 18. Área (millones de km²) El año 2021 (Izq.) es mostrado en azul, mientras que el año 2020 es la línea color morado. La línea roja es la media del periodo 1979-2020. El área sombreada azul agua representa los percentiles 30 a 70% y el área sombreada en azul transparente representa los percentiles 10 a 90%. El gráfico está hecho en la SMN basado en datos descargados del sitio web de Vigilancia del Ozono de la NASA. El segundo gráfico (Der.) es el área de agujero de ozono desde los años 2014 a 2021. Los datos son provistos por KNMI y están basados en los datos de los satélites GOME-2 y SCIAMACHY.

En la **Figura 19** se presenta el máximo del agujero de ozono para esta temporada, siendo el máximo el día 7 de octubre con 24.4 Millones de km² y ocupando el lugar 18 de los 41 agujeros de ozono desde que se tiene registro (1979 -2021). Pero si tomamos el promedio del área del agujero de ozono que oscila del 7 de septiembre al 13 de octubre (Fechas en que se presenta la máxima área) encontramos que su tamaño promedio es de 23.3 Millones de km², ocupando el lugar 14 de los 41 agujeros de ozono que se tienen registro.

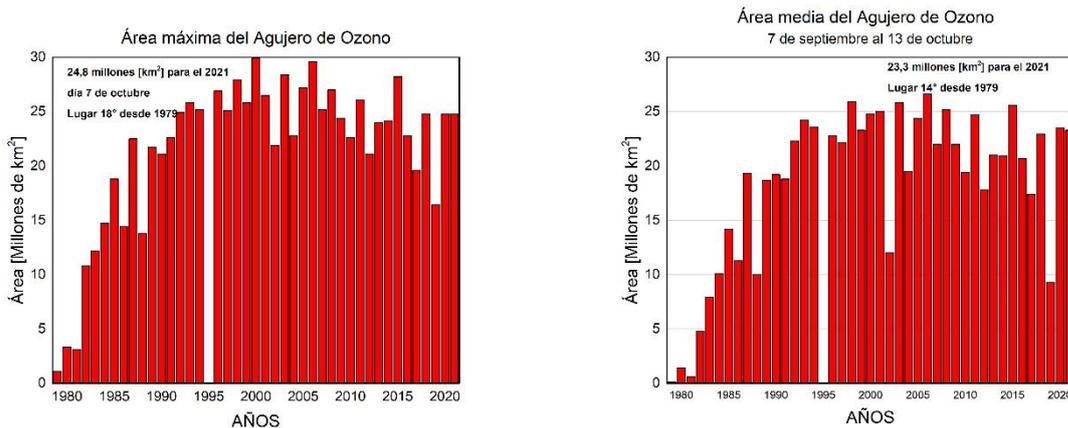


Figura 19. Izquierda; records anuales del área máxima de agujero de ozono año con año desde 1979 a 2021 (Millones de Km²). Derecha; Área del agujero de ozono promedio entre el 7 de septiembre al 13 de octubre).

En la **Figura 20** se observa la evolución del agujero de ozono mensualmente y muestra que el agujero tiene inicio en agosto y se prolonga hasta el mes de diciembre, con una intensidad máxima en los meses de septiembre y octubre, alcanzando a cubrir todo el continente Antártico. El mes de noviembre se muestra un agujero muy estable y finalmente en el mes de diciembre se cierra.

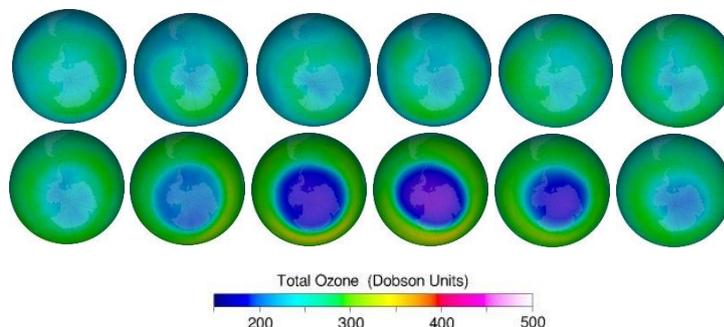


Figura 20. Evolución y crecimiento progresivo del agujero de ozono promedio mensual, desde enero hasta diciembre del 2021.

5.2 Déficit de masa de ozono.

El déficit de la masa de ozono se define como la cantidad de ozono medida en megatonnes que debe ser agregada al agujero, de tal manera que el ozono total llegue a 220 UD en aquellas regiones en las que se encuentra por debajo de este umbral. Este parámetro es también un indicativo de la profundidad que tiene el agujero de ozono y que está asociado al área y volumen de las NEP, así como al enfriamiento de la estratosfera.

La **Figura 21** se muestra el déficit de la masa de ozono, tal como es deducido del GOME-2 Y OMI, respectivamente. El desarrollo de este parámetro, al inicio es muy similar al del año pasado (2020). A partir del mes de septiembre se encuentra por arriba de su media del periodo 1979 a 2020. El déficit máximo se alcanza el día 7 de octubre con un valor de 35,19 millones de toneladas. Posterior al máximo, el déficit inicia el descenso, es decir la recuperación de ozono y el día 22 de diciembre.

Esto nos muestra que el agujero de ozono no fue grande comparado con años anteriores, pero sí muy profundo, lo cual asocia gran destrucción de ozono y se extiende hasta pasada la mitad del mes de diciembre.

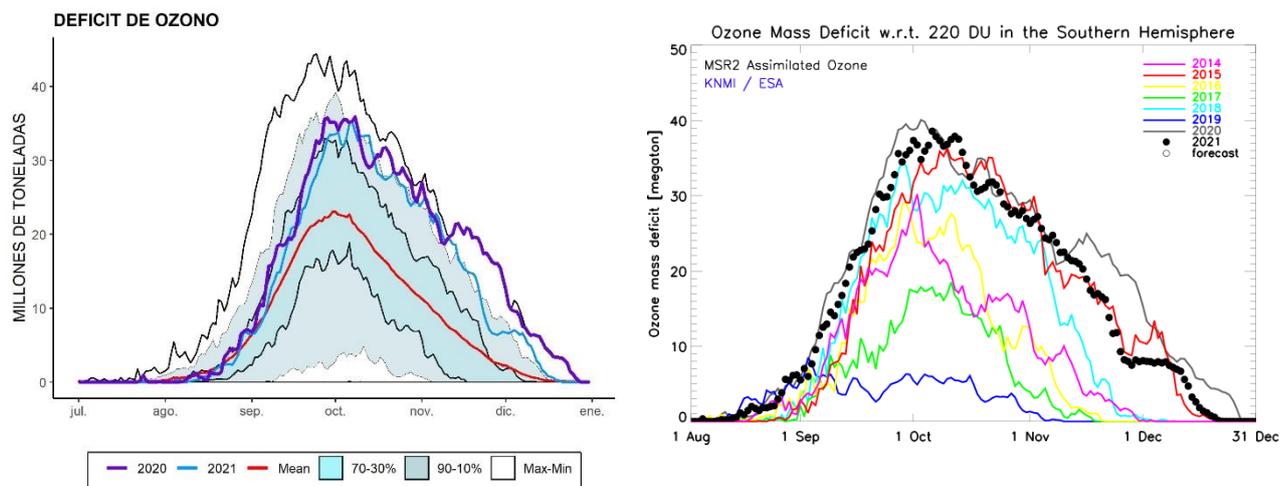


Figura 21. Déficit de ozono para el año 2021. Izquierda; Satélites de la NASA, EEUU (TOMS+OMI+OMPS). Derecha, Datos de la ESA (Agencia Espacial Europea).

6. CONCLUSION

La actividad de destrucción y a la vez formación del agujero de ozono, ha iniciado normalmente, con un vórtice fortalecido y una estratosfera fría, con valores muy parecidos a los del año anterior (2020) que favorece la formación de la NEP I y II y con la primera luz del sol empiezan a liberar las especies cloradas para la destrucción de ozono.

El flujo calor hacia la estratosfera es muy débil lo que favorece que el enfriamiento estratosférico continúe hasta cerca de final del año y muy por debajo de la media del periodo 1979 a 2020. Esta es una situación muy parecida al del año pasado (2020).

En base a la situación anterior, se observa la temperatura en la estratosfera continua en por debajo de su media histórica y muy cercana a los mínimos históricos, consecuentemente el área y volumen de las NEP Tipo I y II, son grandes y perduran más en el tiempo, de tal manera que al ser un reservorio de cloro activo, haya más destrucción de ozono.

En la medición con los espectrofotómetros Dobson y Brewer en la Antártida, muestran valores bajos en concordancia con los satélites que miden mínimos y déficit de ozono, hasta finalizar el agujero de ozono. En tal sentido el agujero de ozono de esta año ha sido caracterizado por una profundidad, aunque su tamaño de 24.4 millones de km² (lugar 18) ha sido mediano con respecto a los anteriores, aun tomando el promedio del 7 de septiembre al 13 de octubre de 23.3 millones de km² se encuentra en el Rankin 14 de los 41 años (1979 a 2021).

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 ozonosondas de Belgrano II del convenio entre el instituto Antártico Argentino (IAA) dependencia de la Dirección Nacional del Antártico de Argentina (DNA) y el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) de España.

Se agradece al Instituto Finlandés de Meteorología, por el soporte de las ozonosondas en la Estación Antártica Marambio (Convenio con el SMN).

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 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, 2020.
- 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. Repositorio Institucional del Servicio Meteorológico Nacional, Argentina.
- Carbajal Benítez Gerardo, Facundo Orte, Elian Wolfram, Eduardo Luccini y Fernando Nollas. Boletines 1, 2, 3, 4 y 5. Temporada del Agujero de Ozono 2020. Repositorio Institucional del Servicio Meteorológico Nacional, Argentina.
- Carbajal 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.
- E. Botek, S. Chabrilat, Y. Christophe (BIRA-IASB) "Report on 2014 Antarctic ozone hole studies" MACC-III project (Monitoring Atmospheric Composition and Climate - III) 2014.
- Geir Braathen, "Boletín de Ozono Antártico", Editado por la WMO.
- Gerardo Carbajal Benítez, Héctor Estévez, Eduardo Luccini, Facundo Orte, Héctor Ochoa, Elian Wolfram, María Elea Barlasina, Lino Condori y Fernando Nollas. (2021) Pattern analysis of seven total ozone column measuring stations in the center, southern of South America and Antarctica. Procceding of Quadrennial Ozone Symposium (QOS) 2021.
- 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.
- Karpechko, A., Y. (2020). Jet stream stops shifting as ozone layer recovers, *Nature*, Vol 579, 544-501.
- Scientific Assessment of Ozone Depletion 2018 – Exective Sumary – WMO UNO environment, NOAA, NASA, European Comission.
- Manuel Gil Ojeda "El ozono estratosférico" *Tethys*, 3, 47–58, 2006. DOI:10.3369/tethys.2006.3.06.
- Newman (NASA), E. Nash (SSAI), R. McPeters (NASA), S. Pawson (NASA) National Aeronautics and Space Administration - Goddard Space Flight Center - NASA Ozone Watch.
- Solomon, S. (2019). The discovery of the Antarctic ozone hole, *Nature*, Vol 575, 46-47.
- 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.
- 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.