



Servicio  
Meteorológico  
Nacional

## BOLETIN 2 - TEMPORADA DEL AGUJERO DE OZONO 2020

***Gerardo Carbajal Benítez<sup>1</sup>, Facundo Orte<sup>2</sup>, Elian Wolfram<sup>1,2</sup>,  
Eduardo Luccini<sup>3</sup>, Fernando Nollas<sup>1</sup>, María Elena Barlasina<sup>1</sup> y  
Héctor Ochoa<sup>4</sup>.***

*1. Servicio Meteorológico Nacional.*

*2. CEILAP, UNIDEF (CITEDEF-CONICET),.*

*3. CEPROCOR-CONICET.*

*4. Dirección Nacional del Antártico / Instituto Antártico Argentino.*

Septiembre, 2020

### *Información sobre Copyright*

*Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.*

*La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.*

## INDICE

RESUMEN	4
ANTECEDENTES	4
1. Introducción.	5
2. CONDICIONES METEOROLOGICAS PREVALECIENTES	6
2.1 Temperaturas.	6
2.2 Área y volumen del NEP	8
2.3 Estabilidad del vórtice.	9
3. OBSERVACIONES DE OZONO	10
3.1 Observaciones Satelitales.	10
3.2 Estaciones en superficie.	13
3.2.1 Estación VAG USHUAIA.	13
3.2.2 Estación Antártica MARAMBIO.	15
3.2.3 Estación Antártica San Martin	16
3.2.4 Estación Antártica Belgrano II	17
4. ACTIVACION QUIMICA DEL VÓRTICE	18
4.1 Resultados de Modelo.	18
5. EL AGUJERO DE OZONO	19
5.1 El área del agujero de ozono.	19
5.2 Déficit de masa de ozono.	20
6. RADIACIÓN UV	20
7. CONCLUSIONES	21
8. AGRADECIMIENTOS	22
9. BIBLIOGRAFÍA	22

## RESUMEN

El presente Boletín 2 del Agujero de Ozono, tiene por objetivo de establecer la evolución del Agujero de Ozono sobre la Antártida 2020. La temperatura de la estratosfera mínima media y zonal, se encuentran por arriba de la media del periodo 1979 al 2019 y las proyecciones muestran que rebasarán los valores mínimos históricos del mismo periodo, de tal manera que la formación de las Nubes Estratosféricas Polares irá en aumento tanto en área como en volumen, recordando que éstas nubes, liberan principalmente cloro, que destruye al ozono. El flujo de calor, a través del movimiento de ondas atmosféricas, está disminuido, es decir, se presenta con muy poca actividad, de tal manera que el transporte de calor desde la troposfera a la estratosfera, es muy pequeña. El vórtice polar se encuentra fortalecido y de seguir esta tendencia, estará aún más intenso y muy estable para finales de septiembre. Bajo estas condiciones, se espera que a inicios de octubre, que es el mes más crítico para el Agujero de Ozono, se profundice e intensifique la destrucción de ozono y el agujero crezca, igual o superior al 2015. En cuanto a la radiación UV en la Antártida y Tierra del Fuego, aún es baja con Índice UV igual menor a 4 (moderado), pese a que en las Estaciones Antárticas de Belgrano II y San Martín, ya se encuentran en condiciones de Agujero de Ozono, mientras que Marambio hasta el día 26 de septiembre estará bajo la influencia del Agujero de Ozono. Finalmente, en Ushuaia, no se espera que el Agujero de ozono pase, por lo menos hasta después del 28 de septiembre. Debido a lo prestado a finales de septiembre, se espera que agujero de ozono, sea muy intenso y de gran extensión.

**Palabras Claves:** Ozono, Estratosfera, Antártida, Destrucción, Química y Meteorología.

## ANTECEDENTES

La estratosfera sobre la región Antártica sufre el deterioro de la capa de ozono año tras año, es decir, hay una disminución de la columna total de ozono en la estratosfera por debajo del umbral de los 220 Unidades Dobson (UD), formándose el conocido Agujero de ozono. Estos episodios se presentan inicialmente a finales de agosto y/o inicios de septiembre, finalizando en los últimos días de octubre y en algunos años, suele extenderse hasta la segunda semana de noviembre. Este fenómeno se le atribuye a las especies químicas que no se encuentran en la naturaleza y son totalmente de origen antropogénico, como compuestos de cloro ( $\text{Cl}_2$ ) y bromo ( $\text{Br}_2$ ), modulado por factores meteorológicos que permiten la estabilidad y fortalecimiento, inclusive debilitamiento del vórtice polar, durante el verano y otoño.

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 Atmospheric Watch (GAW) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM).

Se espera que los agujeros de ozono antárticos sean recurrentes año tras año, mientras la estratosfera contenga excesos de sustancias destructoras de ozono (en inglés, OCD'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. Se espera que, debido acciones tomadas dentro del Protocolo de Montreal, conduzcan a una disminución de los OCD's y por lo tanto una recuperación gradual de la capa de ozono, que ya desde la evaluación del 2014, se observa una declinación de dichos OCD's ( $\text{Cl}_2$  y  $\text{Br}_2$ ). Fuera de las regiones polares, el ozono en la estratosfera superior aumentó entre 1 y 3%, desde el año 2000 al 2018. 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) también regrese a valores de 1980. 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 muestran que el aumento de las concentraciones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>) considerados los principales gases de efecto Invernadero (GEI's) durante este siglo, hará que los niveles globales de ozono estratosférico aumenten, más allá del nivel de formación natural de ozono, durante 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 troposfera baja (calentamiento global), por lo que poca radiación alcanza la estratosfera superior y esta a su vez se enfría, resultando en un cambio de la circulación estratosférica. Por otro lado, el efecto químico del aumento de las concentraciones de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), otro GEI, será el principal agotar el ozono estratosférico.

En el año 2019, el agujero de ozono en la Antártida, se presentó como uno de los más pequeños que se tienen registrado, debido a un calentamiento súbito de la estratosfera, provocado por un gran movimiento de ondas atmosféricas, originadas desde la troposfera hacia la estratosfera polar. Se considera que el agujero de ozono del año 2019 ha sido el 9° menor de los 40 años de monitoreo (1979 a 2019). Pero si tomamos el intervalo de tiempo entre el 7 de septiembre al 13 de octubre y promediamos, encontramos que la extensión fue 9.3 millones de Km<sup>2</sup> por lo cual es el 6° agujero de ozono más chico, después del año 1979, 1980, 1981, 1982 y 1983

## 1. INTRODUCCIÓN

La cantidad de vapor de agua en la estratósfera 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 estratósfera. 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<sub>3</sub>). Estas últimas son llamadas Nubes Estratosféricas Polares (NEP). Las denominadas NEPs del tipo I, se forman en la superficie de partículas de la nube, tienen lugar reacciones químicas que transforman compuestos halógenos pasivos e inoocuos (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<sub>2</sub>).

Cuando las temperaturas disminuyen abruptamente por debajo de los -85°C (187.8°K), se formarán nubes que consisten hielo de agua pura. Estas últimas son denominadas NEPs del tipo II. Las partículas en ambos tipos de nubes pueden crecer tanto que ya no flotan en el aire y precipitan fuera de la estratósfera. En este proceso traen consigo ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>). El ácido nítrico es considerado un reservorio que libera NO<sub>2</sub> bajo condiciones de iluminación solar. Si, el NO<sub>2</sub> es removido físicamente de la estratósfera (proceso denominado desnitrificación), el cloro y bromo activos pueden destruir muchas más moléculas de ozono antes de ser inhibidos. La formación de nubes de hielo llevará a una pérdida más severa de ozono, que la que causa el 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.

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 (PSC).

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>.

El presente boletín tiene como objetivo iniciar el monitoreo del agujero de ozono en la temporada 2020, desde su inicio hasta su finalización, con la finalidad de contribuir al entendimiento y comprensión de dicho fenómeno, así como de informar sobre sus impactos a todas aquellas personas que estén interesadas en conocer la evolución e impacto del agujero de ozono.

## 2. CONDICIONES METEOROLÓGICAS PREVALECIENTES.

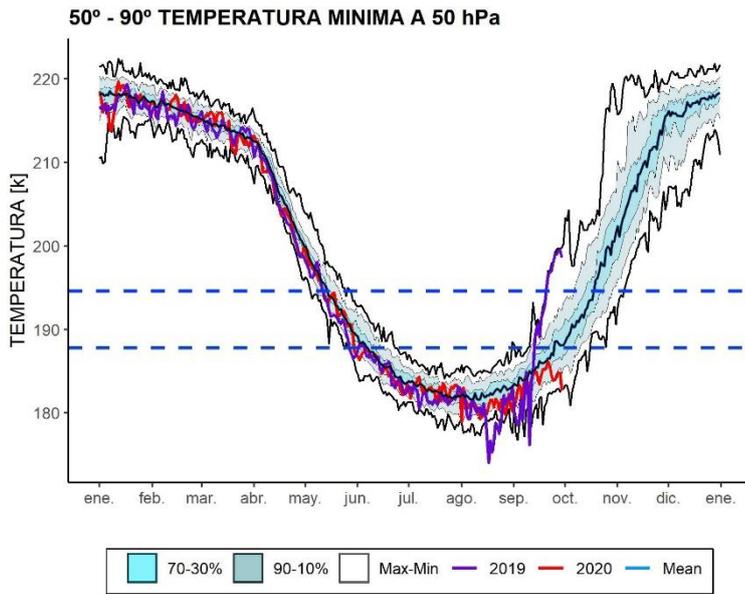
### 2.1 Temperaturas.

Las temperaturas estratosféricas sobre la Antártida para este año (2020) han estado por debajo del umbral donde se forman las Nubes Estratosféricas Polares (NEP) Las NEP tipo I de 194.6 K desde el 12 de mayo y por debajo del umbral de las NEP tipo II de 187.8 K desde el 27 de mayo del presente, ver **Figura 1**. Desde los meses de abril hasta Julio. Desde el primer semestre del año, las temperaturas diarias mínimas en el nivel de 50 hPa, han estado cercanas y oscilando alrededor del promedio correspondiente al período 1979 a 2019. También muy cercanas al 2019. A partir del 12 de agosto, se nota un enfriamiento sostenido, hasta el 19 de septiembre, donde se acerca a la temperatura mínima absoluta del periodo 1979 a 2019.

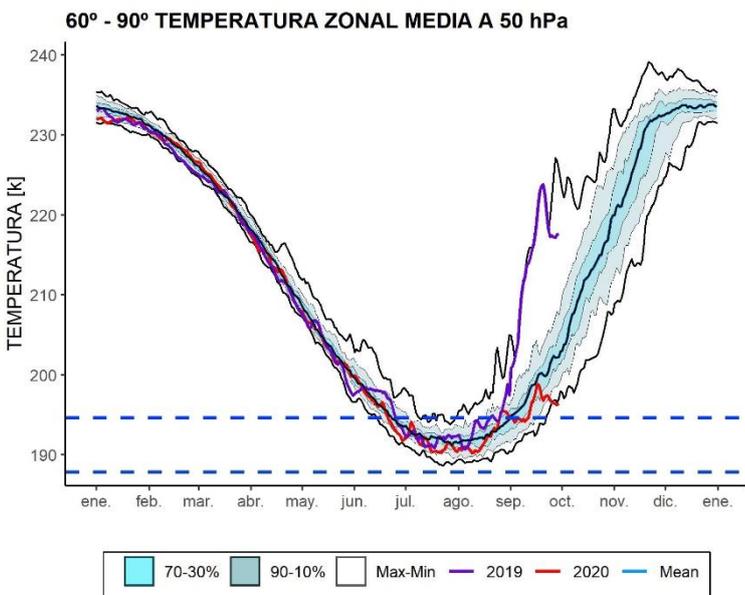
En la **Figura 2** se muestran la temperatura zonal media, a nivel de 50 hPa y entre la región de 60° y 90° S, ha estado oscilando alrededor de la media del periodo 1979 a 2019, desde el inicio del año. se observa un enfriamiento sostenido desde finales de julio hasta el 17 de septiembre, los días 18 y 19 septiembre, las temperaturas son más bajas que al mínimo histórico del periodo 1979 a 2019.

Al mismo tiempo en la **Figura 3**, a nivel de 10 hPa, la Temperatura Media Zonal y entre la región de 60° y 90° S, la temperatura en la estratosfera ha estado oscilando alrededor de la media del periodo correspondiente de 1979 a 2019. A inicios de septiembre, se observa un enfriamiento por debajo de la media del periodo 1979 a 2019, pero en los dos últimos días (18 y 19 de septiembre), el enfriamiento es mayor que la mínima historia del periodo 1979 a 2019.

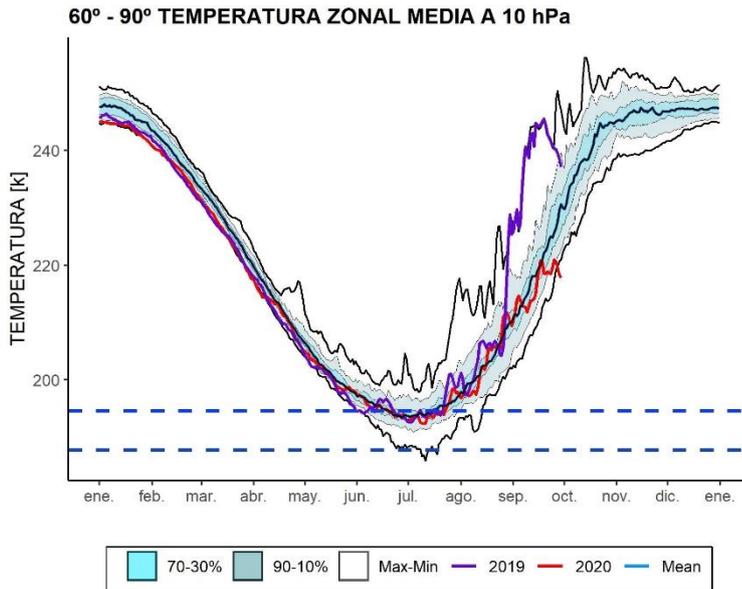
Finalmente se concluye de esta parte del análisis que la estratosfera esta ma's fría que lo normal e incluso que las mínimas históricas del periodo 1979 a 2019.



*Figura 1. Temperatura mínima promedio a 50hPa, sobre la región de 50° a 90° S. La línea color roja, representa la evolución de la temperatura mínima para el año 2020, la línea morada representa al año 2019, la línea azul fuerte la media de 1979 a 2019. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2019. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%. Las líneas rectas punteada representan las nubes NEP tipo I 194,6 K (arriba) y NEP tipo II 187,8 (abajo).*



*Figura 2. Temperatura zonal media a 50hPa, sobre la región de 60° a 90° S. La línea color roja, representa la evolución de la temperatura zonal media para el año 2020, la línea morada representa al año 2019, la línea azul fuerte la media de 1979 a 2019. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2019. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%. Las líneas rectas punteada representan las nubes NEP tipo I (arriba) y NEP tipo II (abajo).*

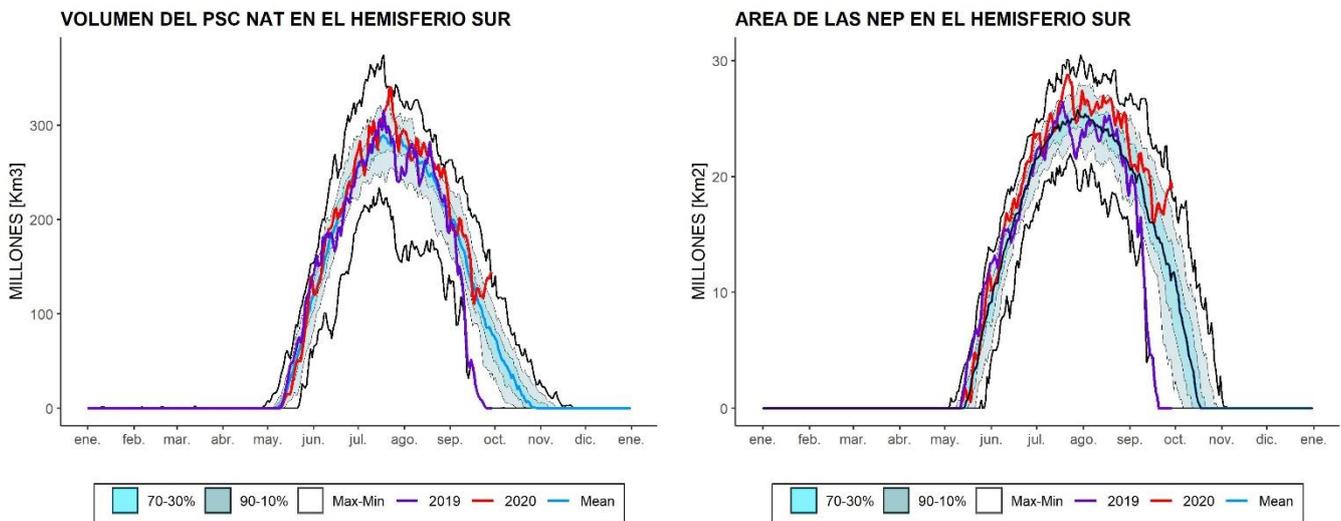


*Figura 3. Temperatura zonal media a 10hPa, sobre la región de 60° a 90° S. La línea color roja, representa la evolución de la temperatura zonal media para el año 2020, la línea morada representa al año 2019, la línea azul fuerte la media de 1979 a 2019. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2019. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%. Las líneas rectas punteada representan las nubes NEP tipo I (arriba) y NEP tipo II (abajo).*

## 2.2 Área y Volúmen del NEP

Desde la aparición de las NEP aproximadamente el 12 de mayo, la NEP se incrementa inicialmente y oscila sobre el valor medio del periodo 1979 a 2019. Posteriormente, debido al enfriamiento en la estratosfera, aumenta el tamaño de las NEP a partir del 15 de julio y es mayor incluso que en el año 2019. Este aumento alcanza un máximo de 28,8 millones de Km<sup>2</sup> el 28 de julio y posteriormente desciende sin alcanzar los valores medios, pero a finales de agosto, las NEP alcanzan su valor medio. Con el enfriamiento continuo de la estratosfera se incrementa la formación de NEP y el día 19 de septiembre, el área supera al máximo histórico del periodo 1979 a 2019. Ver [Figura 4](#).

El volumen NEP se incrementa a partir del 12 de mayo y oscila alrededor de la media del periodo 1979 a 2019, hasta el mes de julio. El 22 de julio alcanza su valor máximo con 340.00 millones de Km<sup>3</sup>, después los valores han oscilado alrededor de la media (1979 - 2019) hasta finales de agosto. Con el incremento de la temperatura estratosférica, el volumen del NEP crece y el 19 de septiembre, el volumen es mayor al máximo histórico del periodo 1979 a 2019. Ver [Figura 5](#).



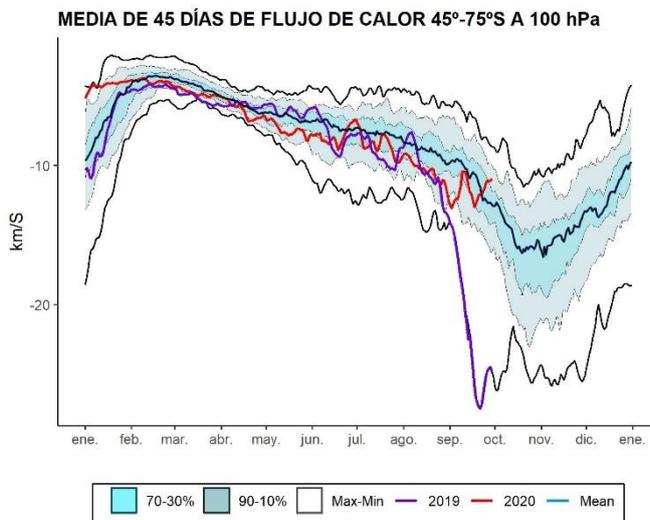
**Figuras 4 y 5.** Serie de tiempo donde la temperatura están suficientemente bajas para para la formación de ácido nítrico trihidratado (NEP tipo I) en el nivel isentrópico de 460 K. Área y volumen de las nubes estratosféricas polares (NEP), sobre la región Antártica. En ambos gráficos, la línea color roja, representa la evolución del tamaño y volumen de las NEP's para el año 2020, la línea morada representa al año 2019, la línea azul fuerte la media de 1979 a 2019. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2019. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%.

El área o volumen con temperaturas lo suficientemente bajas para la existencia de NEPs, 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 HNO<sub>3</sub>.

## 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 abril, el valor medio de 45 días del flujo de calor en 100 hPa ha sido poco mayor a la media del periodo 1997 -2019. La actividad es mayor que la media y muy cercana a la del año 2019, Las predicciones muestran que la actividad de ondas que transportan calor, decrece y se acerca a la media, es decir el flujo tiende a estabilizarse. Durante el mes de septiembre, el flujo oscila y se acerca a media, pero las predicciones muestran que el flujo va disminuyendo, y se hace mucho menor que la media, este flujo que disminuye, puede ser la causa del enfriamiento de la estratosfera.



**Figura 6.** Serie de tiempo del flujo de calor meridional promediado sobre la región entre 45-75°S. La curva roja muestra los datos para 2020 (actualizado hasta el 19 de septiembre y proyectado al 29 de septiembre). Por favor, note que un gran número negativo significa un gran flujo de calor. Los valores cercanos a cero significan un flujo de calor pequeño. La línea azul fuerte la media de 1979 a 2019. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos durante el periodo 1979 – 2019. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%, finalmente la línea morada representa al año 2019.

La **Figura 7** se muestra los mapas de proyección de vorticidad potencial (PV) en el nivel isentrópico de 485 K para la fecha del 22, 23, 24 Y 25 de septiembre, para los años 2015 al 2019 y 2022 (de arriba a abajo). Este nivel corresponde a aproximadamente 19 km de altura. Se incluye el año 2015 debido a que en ese año se presentó uno de los tres agujeros de ozono más grandes registrados y el 2019 porque se presentó uno de los agujeros más pequeños comparables con los inicios de los 80's.

Se puede ver que el vórtice polar del 2020 hasta el momento es más estable que incluso el del 2015. Se nota que son más comparables los años 2015 y 2020. Los valores de PV más negativos, es indicativo que los vórtices están fortaleciendo hasta el momento.

La estratosfera más fría que normal, poco flujo de calor (poca actividad de ondas) podrían ser los responsables de un vórtice polar estable y fortalecido, condiciones favorables para que las Modo Anular del Sur (SAM) ente a una fase positiva.

### 3. OBSERVACIONES DE OZONO

#### 3.1 Observaciones Satelitales

El sol empieza a retornar a la Antártida, ya que finaliza la noche polar e inicia la primavera austral. Tanto los datos satelitales, los datos de superficie y sondeos con globos muestran que el agujero de ozono, que ya inició la formación temprana del agujero de ozono, pero aún se encuentra en etapa de crecimiento y fortalecimiento. Lentamente se empiezan a mostrar en algunas de las observaciones.

La **Figura 8** muestra la columna de ozono mínimo del 2020, tal como han sido medidas por el instrumento GOME-2 a bordo del MetOp en comparación con su media histórica 1979 - 2019. Se aprecia que en el 2020 (línea roja) oscila y está muy cercana a la media, pero se espera más destrucción debido al incremento de las NEP en una estratosfera fría.

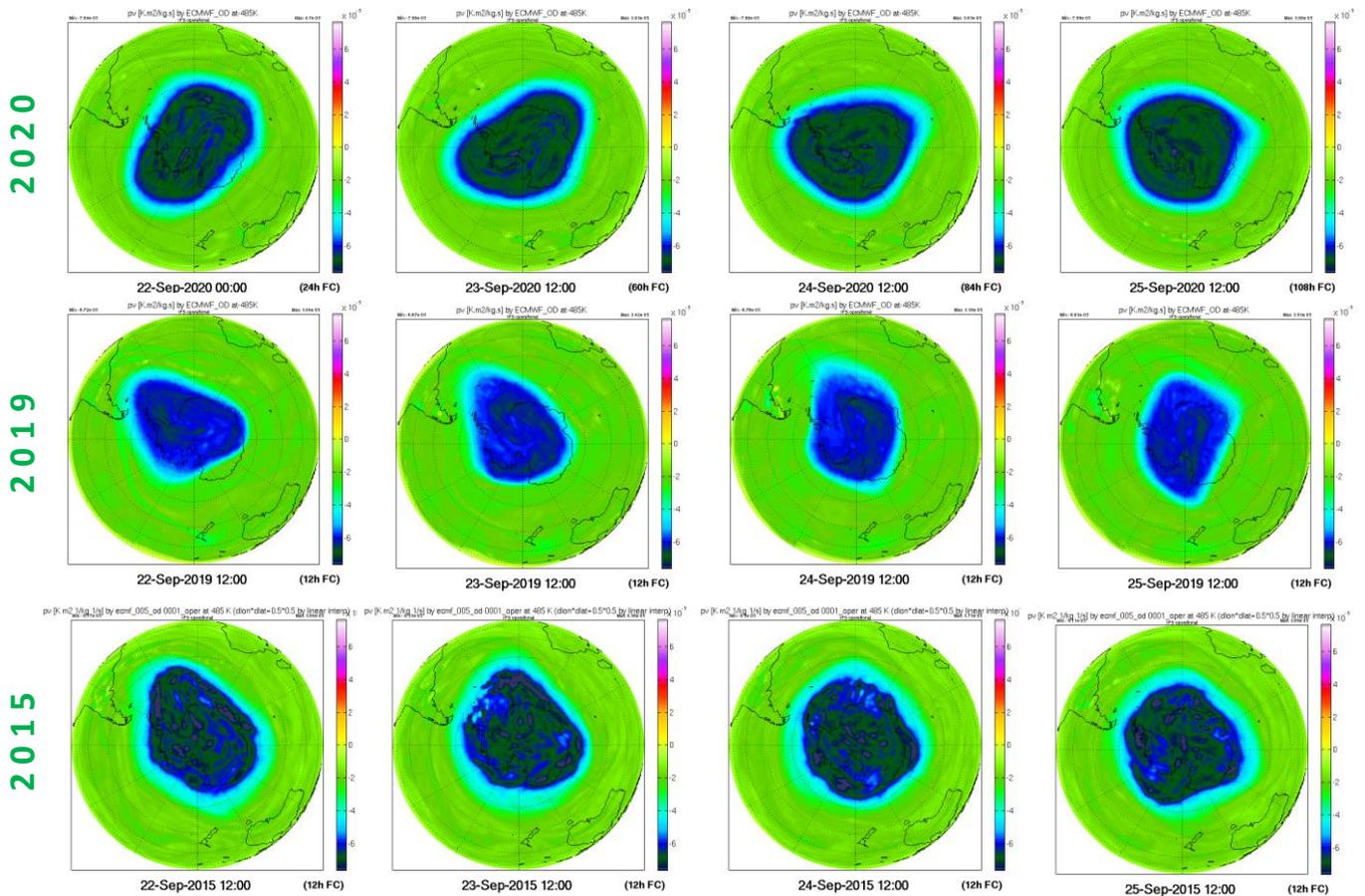


Figura 7. Mapas de proyecciones para la Vorticidad Potencial (PV) a una altura isentropica de 485 K. Para los días 2, 3 y 4 de septiembre del 2015, 2019 y 2020 respectivamente.

La Figura 9 muestra los mapas de las columnas de ozono, tal como han sido medidas por el satélite OMI en comparación con datos del año del 2006 al 2020, todas son tomados los días 23 de septiembre. Se observa para esta fecha que el agujero de ozono ya está presente, bien formado y en pleno crecimiento.

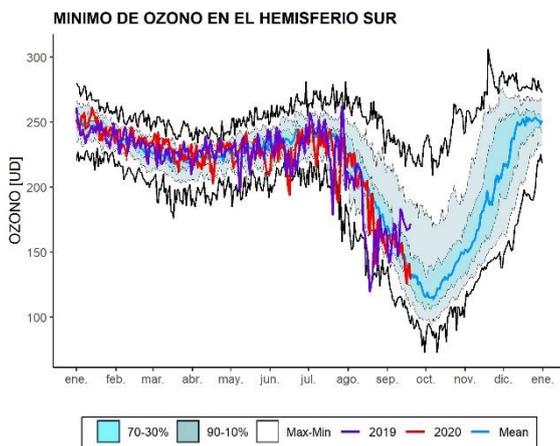


Figura 8. Mínimo diario de la columna total de ozono en el hemisferio sur observado por GOME-2, y en el pasado por SCIAMACHY. La línea roja muestra las observaciones de GOME-2 para el año 2020, la línea morada representa al año 2019. El pronóstico para los siguientes días muestra que el mínimo de ozono continuará decreciendo. La figura está adaptada desde un gráfico provisto por el Instituto Holandés de Meteorología (KNMI).

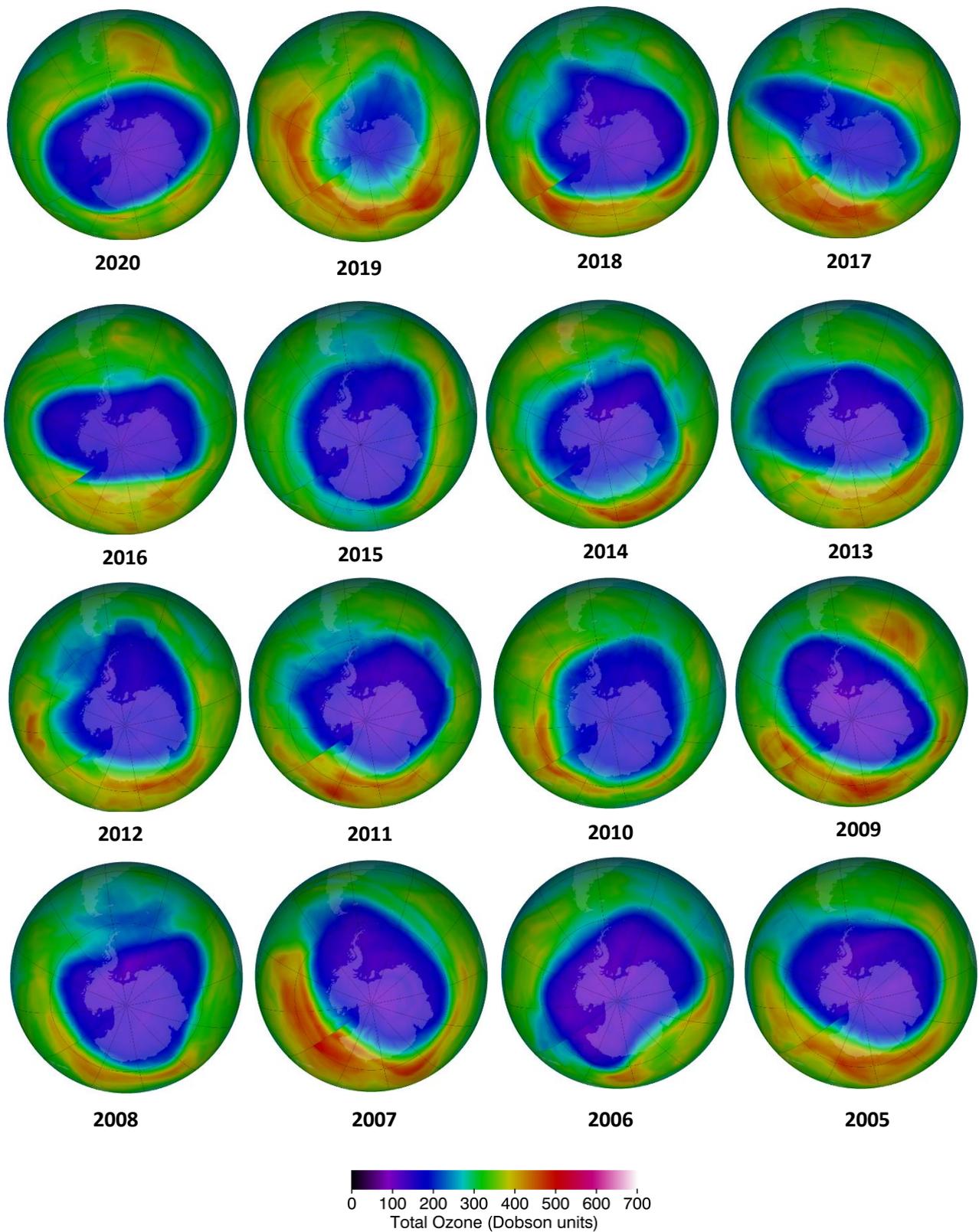


Figura 9. Mapas de columna total de ozono del 23 de septiembre, para cada año (2005 al 2020). Los mapas son obtenidos del OMI.

## 3.2 Observaciones en superficie

Por ahora, solo se usan, mediciones en superficie obtenidos mediante el Espectrofotómetro Dobson y ozonosondeos de la Estación GAW Ushuaia ( $54^{\circ} 50' 54.46'' S$ ,  $68^{\circ} 18' 37.52'' O$ ) y la Estación Antártica Marambio ( $61^{\circ} 14' 33.68'' S$ ,  $56^{\circ} 37' 36.98'' O$ ) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Además de la Estación Antártica San Martín ( $68^{\circ} 07' 48'' S$ ,  $67^{\circ} 06' 08'' O$ ), dependencia de la Dirección Nacional Antártica/Instituto Antártico Argentina (DNA/IAA).

### 3.2.1 Estación VAG-USHUAIA.

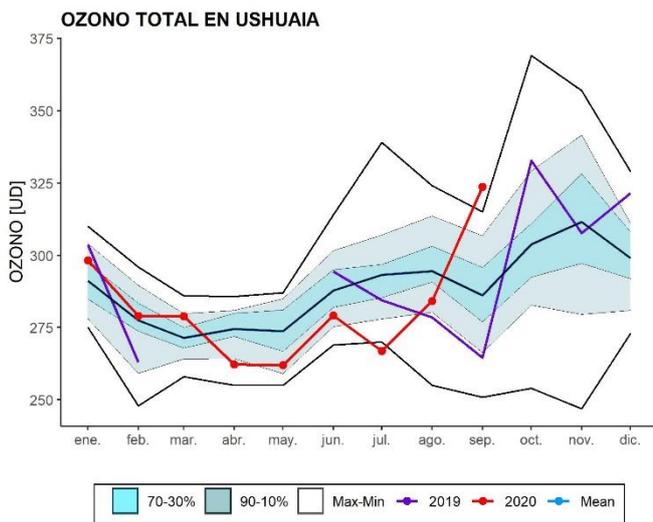
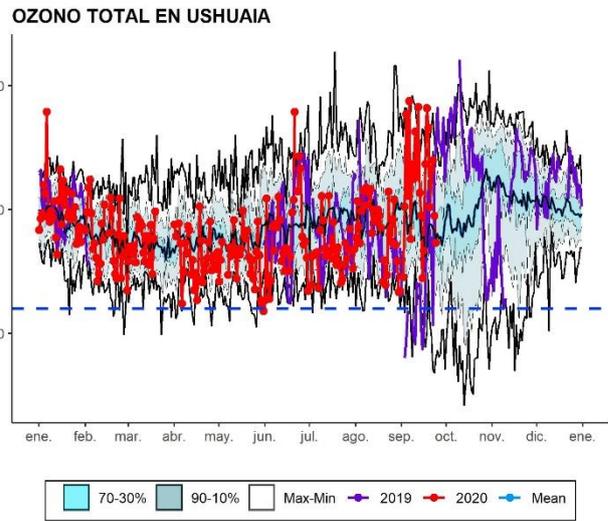
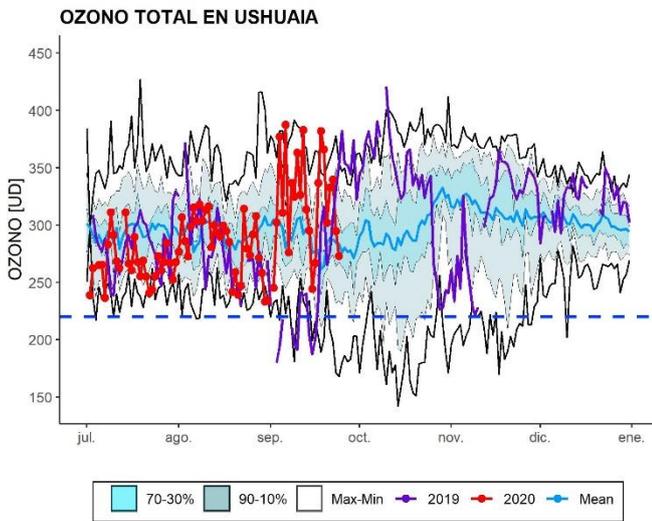


La Estación de Vigilancia Atmosférica Global (VAG) de Ushuaia forma parte de la red de medición de parámetros físicos y químicos de la atmosfera de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). La estación VAG de Ushuaia se localiza al borde del Vórtice Polar, de tal manera que, durante la temporada de 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.

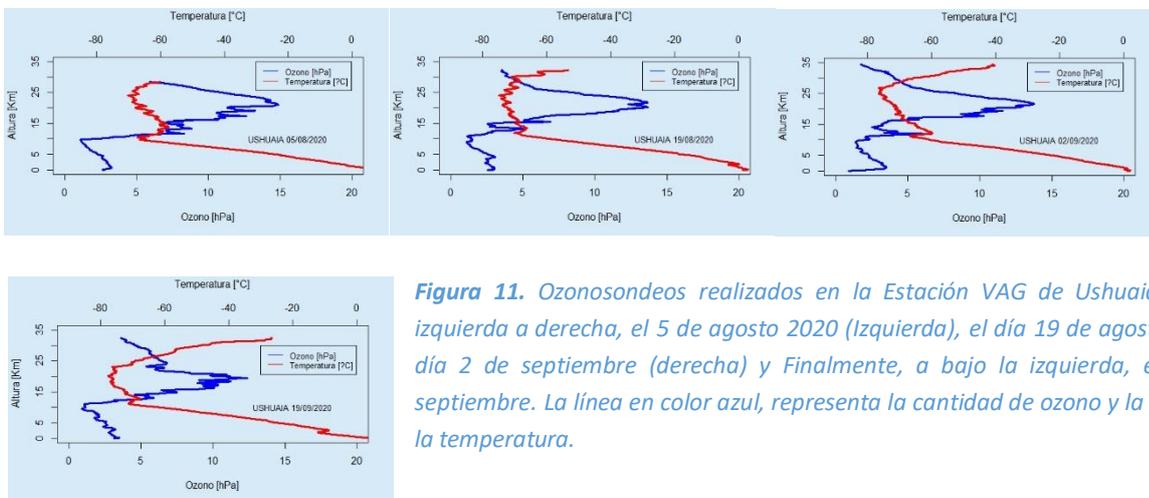
El espectrofotómetro Dobson (D131) mide todos los días y en la **Figura 10**, se muestra la evolución de la columna total de ozono para el año en curso, comparado con su media histórica (1994-2019).

En la **Figura 10** Se presentan los datos diarios. Arriba a la izquierda, inicia en el mes de agosto, arriba a la derecha, es la serie completa de lo que va del año 2020. Se aprecia que a partir del mes de septiembre, hay valores muy altos que superan los máximos históricos. Debido a que en la zona, es típico del paso de masas enriquecidas con ozono y que circundan al vórtice polar, es decir el vórtice esta fortalecido y no permite que las masas de aire con ozono penetren, de tal manera que Ushuaia al estar en el límite del vórtice, reciba esas masas de aire ricas en ozono. Abajo a la izquierda se presentan los promedios mensuales y se observa que durante septiembre (hasta el día 21) es mayor que el máximo histórico del periodo 1995 a 2019.

En la **Figura 11** se muestra 4 perfiles de ozono producidos por los ozonosondeos realizados el 5, 19 de agosto, 2 y 16 de septiembre. Se observa alguna pérdida de ozono entre los 15 y 19 Km de altura, aunque el perfil está bien definido, debido a que aún el agujero de ozono no ha pasado. El día 5 de agosto, se mide ozono total de 306 UD entre la integración de ozono y el valor residual de ozono, mientras que el espectrofotómetro Dobson mide 292 UD. Mientras que el día 19 de agosto se mide 251.7 UD, en tanto el espectrofotómetro Dobson mide 241,7 UD. Mientras que el día 2 de septiembre, la integración de la ozonosonda muestra un valor de 239,4 UD y es Dobson 241 UD. Finalmente, el día 16 de septiembre, la ozonosonda muestra un valor de 242,4 UD y el Dobson 245,8 UD.



**Figura 10.** Datos de la columna Total de Ozono [UD] con el Espectrofotómetro Dobson en la estación VAG Ushuaia. La línea roja representa el año 2020, la línea morada representa al año 2019, la línea azul fuerte es la media del periodo 1994-2018. Arriba a la izquierda; es la serie de tiempo de ozono total a partir de junio. Arriba a la derecha; es la serie de tiempo completa, de enero a febrero. Abajo a la izquierda son los promedios mensuales y agosto hasta lo que llevamos hoy.



**Figura 11.** Ozonosondeos realizados en la Estación VAG de Ushuaia, arriba; de izquierda a derecha, el 5 de agosto 2020 (Izquierda), el día 19 de agosto (Centro), día 2 de septiembre (derecha) y Finalmente, a bajo la izquierda, el día 26 de septiembre. La línea en color azul, representa la cantidad de ozono y la línea roja, es la temperatura.

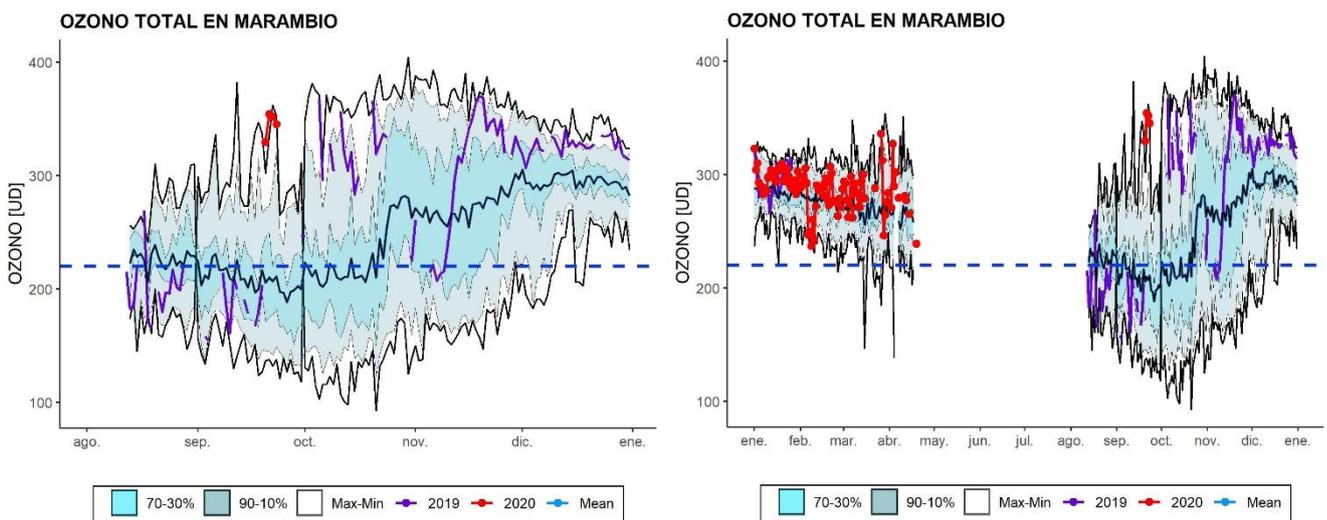
### 3.2.2 Estación Antártica MARAMBIO.



La estación Antártica Marambio se encuentra en la península Antártica y forma parte de la red de medición de ozono total de programa VAG de la OMM. El ozono total se mide con espectrofotómetro Dobson, pero sus datos aún no están disponibles.

En convenio entre el SMN y el Instituto Finlandés de Meteorología (IFM) se mantiene el programa de ozonosondeos. Dichos sondeos se efectúan aproximadamente dos veces por semana durante el período de Agujero de Ozono. Pero aún no están disponibles.

El espectrofotómetro Dobson (#D099) mide todos los días, excepto durante el invierno polar (abril a septiembre) o debido a situaciones complicadas que impidan la medición, como vientos fuertes, lluvia, caída de Nieve, etc. Este año inicia tarde las mediciones debido a las inclemencias del tiempo, hasta el 30 de septiembre, por lo que solo se presentan 3 valores. En la **Figura 12**, se muestra la evolución de la columna total de ozono para el año en curso, comparado con su media histórica (1994- 2019). La medición con el espectrofotómetro Dobson, deberá iniciar los primeros días de diciembre.



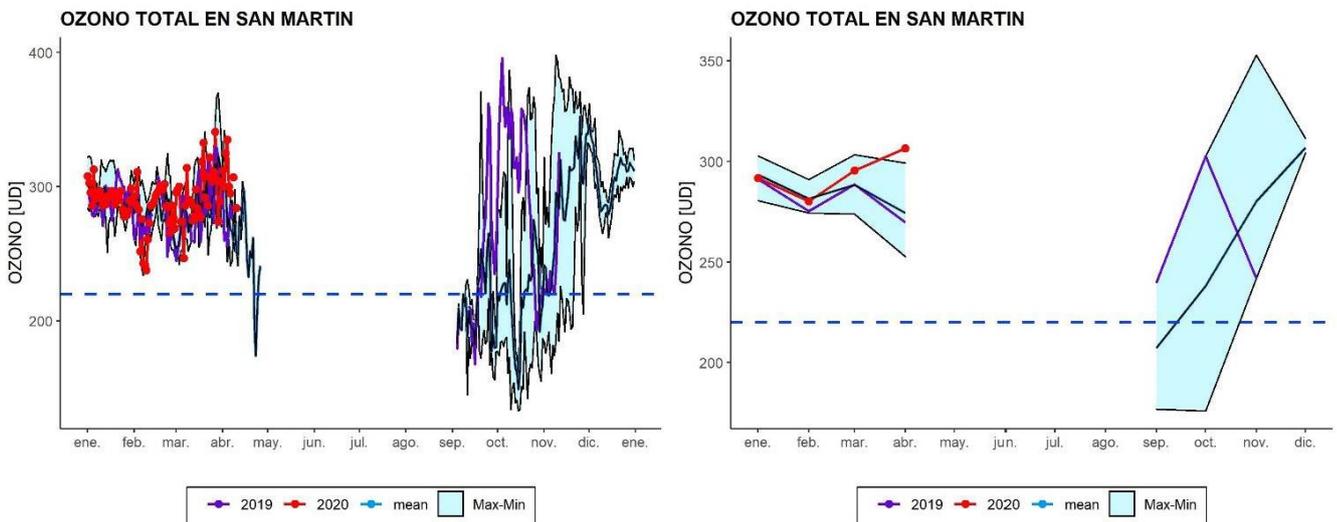
**Figura 12.** Datos de la columna Total de Ozono [DU] con el Espectrofotómetro Dobson en la estación Antártica Marambio. La línea roja representa el año 2020, la línea morada representa al año 2019, la línea azul fuerte es la media del periodo 1986-2019. A la izquierda; es la serie de tiempo de ozono total diario a partir de agosto y la derecha; es la misma serie, pero inicia en enero.

### 3.3.3. Estación Antártica San Martín.



La estación Antártica San Martín se encuentra en la península Antártica y forma parte de la red de medición de ozono total de programa VAG de la OMM. El ozono total se mide con espectrofotómetro Brewer pero sus datos aún no están disponibles debido a que en esta temporada hay condiciones extremas de nieve y viento que impiden el buen funcionamiento del equipo. El Espectrofotómetro Brewer se encuentra bajo un convenio entre el instituto Antártico Argentino (IAA) y el Instituto Italiano de Meteorología.

El espectrofotómetro Brewer mide todos los días, excepto durante el invierno polar (abril a agosto) o debido a situaciones complicadas que impidan la medición, como vientos fuertes, lluvia, etc. En la **Figura 13**, se muestra la evolución de la columna total de ozono para el año en curso, comparado con su media (2016-2019). Al tener registrado 4 años completos (2016 a 2019) y el año en curso, solo se presenta la media, máximos y mínimos, y lo que llevamos del año 2020. En la **Figura 13** se observa a la izquierda, los datos diarios de ozono total hasta el último día de abril.



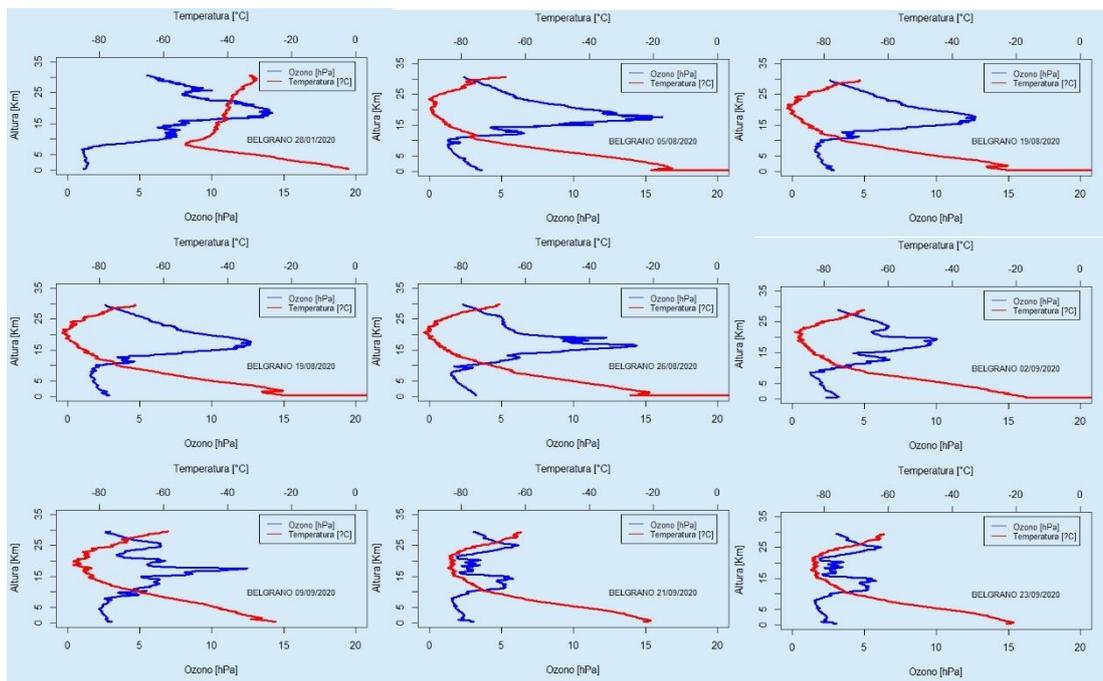
**Figura 13.** Datos de la columna Total de Ozono (CTO) en Unidades Dobson [UD] medidos con el Espectrofotómetro Brewer en la estación Antártica de San Martín. La línea roja representa el ozono para el año 2020. La línea morada representa la CTO para el año 2019. La línea azul oscura es la media para el periodo 2016-2019. A la izquierda: serie de tiempo diaria de la CTO a partir de enero. Arriba a la derecha serie de tiempo promedios mensuales de la CTO a partir del mes de enero.

### 3.3.4 Estación Antártica Belgrano II.



La estación Antártica Belgrano II se encuentra situado en Nunatak Bertrab en la Bahía Vahsel sobre la Costa Confin en la Tierra de Cotas 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 pero sus datos aún no están disponibles. El Espectrofotómetro Brewer es un convenio entre el instituto Antártico Argentino (IAA) y el Instituto Italiano de Meteorología.

El Espectro fotómetro Brewer de Belgrano II, aun no inicia el programa de medición, debido a la intensa caída de nieve y vientos muy fuertes, pero se han logrado 8 lanzamientos de ozonosondeos, los cuales se presentan en la [figura 14](#).



*Figura 14. Gráficos de 8 perfiles de ozono en la Estación Antártica Belgrano.*

La Figura 14 son ocho gráficos, donde el primero de arriba a la izquierda, corresponde al 28 de enero del 2020, mientras que los siguientes 4 corresponden al mes de agosto, donde se observa que aún no hay destrucción significativa de ozono, pero los últimos 3 del mes de septiembre, ya se observa una disminución y específicamente, el día 21 y 23 de septiembre y hay una destrucción notable en el perfil de ozono, indicativo que el agujero de ozono se encuentra presente.

## 4. ACTIVACIÓN QUÍMICA DEL VÓRTICE

### 4.1 Resultados del Modelo.

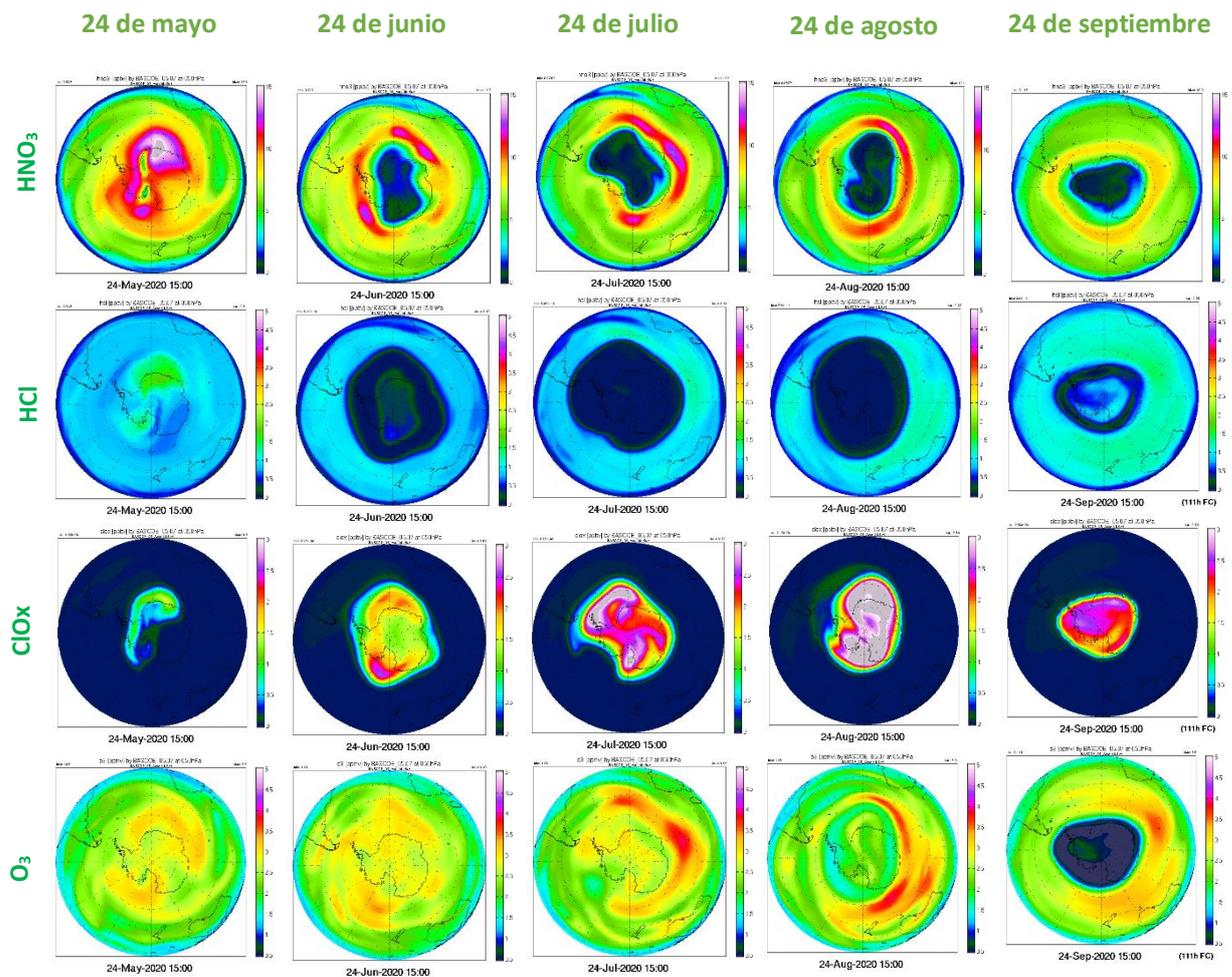
La **Figura 15** muestra la progresión de las cuatro especies principales, que son reservorios dentro de las NEP, para la destrucción de ozono en la estratosfera. Los mapas son en el nivel de 50 hPa para los días 24 de cada mes (mayo a septiembre). Los gráficos han sido realizados a partir de la salida 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, así como especies relacionadas con el mismo para la estratosfera. La versión usada en esta edición ha sido originalmente desarrollada dentro del marco del programa GSEPMOTE de la Agencia Espacial Europea. El sistema de asimilación de datos BASCOE asimila el conjunto de datos offline (nivel-2. V3.3) obtenidos del instrumento Aura-MLS. A pesar de haber sido suministrado en poco y días más tarde que la corriente NRT, el conjunto de datos offline incluye varias especies:  $O_3$ ,  $H_2O$ ,  $HNO_3$ ,  $HCl$ ,  $ClO$ ,  $(ClO)_2$ ,  $HClO$  y  $N_2O$ . Anterior información acerca de los proyectos MACC del modelo BASCOE con referencias, 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)

Se puede apreciar a partir de la **Figura 15** como el ácido nítrico gaseoso ( $HNO_3$ ) es removido gradualmente, comenzando en mayo cuando las temperaturas NEP se asentaron y continuando hasta junio y julio. La remoción del  $HNO_3$  se encuentra esencialmente completa el 24 de septiembre, dentro del vórtice, pero la concentración mayor se encuentra en límite del vórtice. La remoción de  $HNO_3$  gaseoso es una indicación de que este compuesto se condensa en la forma de nubes estratosféricas polares (ácido nítrico trihidratado;  $HNO_3 \cdot 3H_2O$ ).

Al mismo tiempo, el ácido clorhídrico ( $HCl$ ) es removido, dado que reacciona con nitrato de cloro ( $ClONO_2$ ) y forma cloro activo. Se puede apreciar como el ácido clorhídrico (segunda fila) está disminuyendo, puesto que es convertido en partículas NEP. La conversión extensa del  $HCl$  ya ha tenido lugar el 24 de julio y el 24 de agosto, todo el vórtice se encuentra esencialmente vacío de  $HCl$ . El 24 de septiembre, se observa que la concentración aumenta, muy probablemente debido al enfriamiento de la estratosfera y a la presencia de NEP que se extienden en área y volumen.

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 ( $Cl_2O_2$ ). El dímero es fácilmente descompuesto 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  $(ClO)_2$ , el cual no es observado por el Aura-MLS, pero es calculado por el modelo BASCOE. Observando la suma del monómero y dímero ( $ClO + 2Cl_2O_2$ ) se puede obtener una mejor impresión del grado de activación del cloro. Esto se muestra en la tercera fila de la figura. Los primeros signos de activación son ya visibles desde el 23 de julio. El grado máximo de activación tiene lugar durante del mes de agosto, pero el 24 de septiembre, se observa un crecimiento en la concentración de este compuesto, muy probablemente al enfriamiento estratosférico y las NEP presentes en el vórtice.

En la última fila se muestra la razón de mezcla del ozono en el nivel de 50 hPa. Hasta julio no hay indicación de disminución del ozono, pero el 24 de agosto se puede apreciar que alguna destrucción ha tenido lugar dentro del margen del vórtice. Finalmente, el 24 de septiembre, ya muestra destrucción de ozono a ese nivel. De continuar las proyecciones de una estratosfera muy fría, que incluso las temperaturas sean más bajas que las mínimas históricas, se presentará para octubre una agujero de ozono muy intenso y probablemente grande en tamaño.



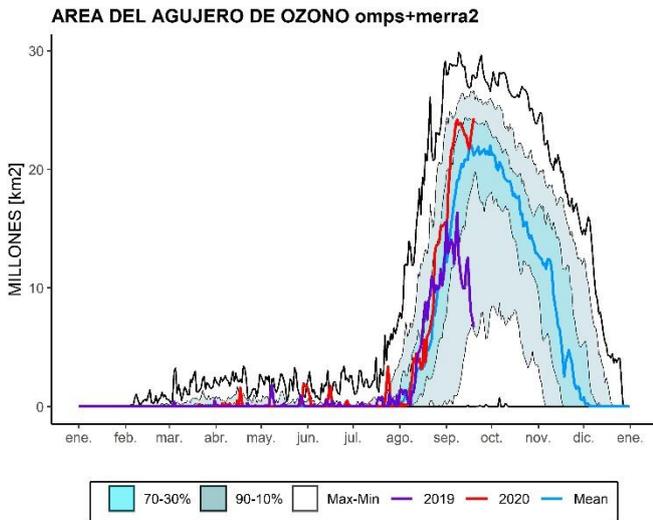
*Figura 14. Resultados del modelo de asimilación BASCOE a 50 hPa. Este modelo se usa como parte del proyecto macc-II, ahora el NRT Análisis de ozono y especies relacionadas con el ozono ([http://macc.aeronomie.be/4\\_NRT\\_products/5\\_Browse\\_plots/1\\_Snapshot\\_maps/index.php?src=BASCOE&spc=o3&l=at-050hPa](http://macc.aeronomie.be/4_NRT_products/5_Browse_plots/1_Snapshot_maps/index.php?src=BASCOE&spc=o3&l=at-050hPa)). La primera fila (arriba) muestra la relación de mezcla del ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ). La segunda fila muestra la relación de mezcla para el ácido clorhídrico (HCl). La tercera fila, muestra la relación de mezcla para el óxido de cloro y su dímero ( $\text{ClOx} = \text{ClO} + 2\text{Cl}_2\text{O}_2$ ). La última fila (abajo) muestra la relación de mezcla del ozono.*

## 5. El Agujero de ozono

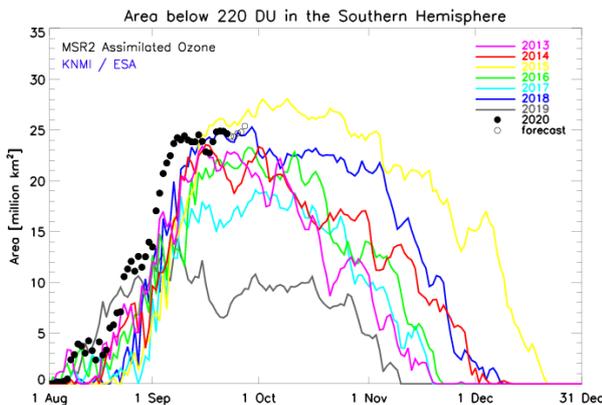
### 5.1 El área del agujero de ozono

En la **Figura 16a y 16b** se muestra el área de la región en la que el ozono total es menor a las 220 UD (Definido por la comunidad científica como Agujero de Ozono) tal como es deducida por el instrumento GOME-2 a bordo del Metop (y SCIAMACHY en el Envisat).

En la **Figura 16a y 16b** se muestra el inicio y crecimiento del agujero de ozono, muy similar al del año pasado, pero superior al de la media (1997 – 2018). Esto significa que el agujero tiene una aparición temprana, situación que se observa en el gráfico del déficit de ozono, iniciando la destrucción.



*Figura 16a.* Área (millones de km<sup>2</sup>) donde la columna total de ozono es menos de 220 unidades Dobson. El año 2020 es mostrado en rojo (hasta el 19 de septiembre). El año 2019 se muestra en morado. La línea azul fuerte es el promedio de 1979-2019. 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 área de agujero de ozono el 28 de agosto es 15.2 millón de km<sup>2</sup>. El gráfico está hecho en la SMN basado en datos descargados del sitio web de Vigilancia del ozono de la NASA, los cuales están basados en datos de NOAA/NCEP.

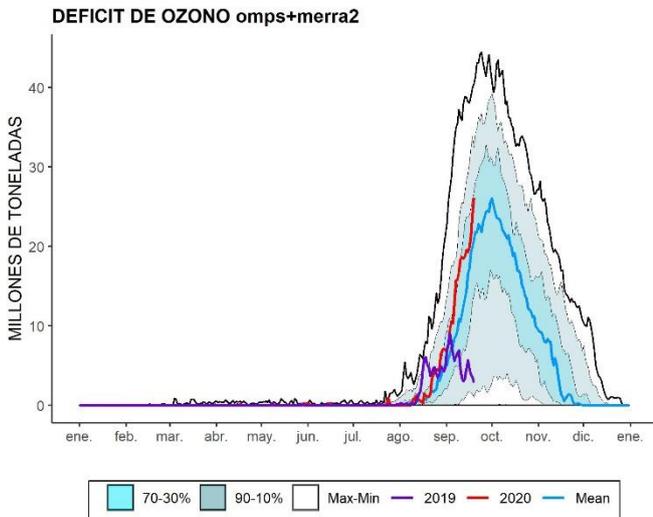


*Figura 16b.* El área de agujero de ozono desde los años 2013 a 2020. La línea punteada y en color negro, representa el área actual del agujero de ozono y los puntos vacíos, representan la proyección y se nota que a inicios de septiembre, el tamaño puede llegar arriba de los 25 millones de Km<sup>2</sup>. El área de agujero de ozono es el área de la región donde el ozono total está por debajo de las 220 UD. Los datos son provistos por KNMI y están basados en los datos de los satélites GOME-2 y SCIAMACHY.

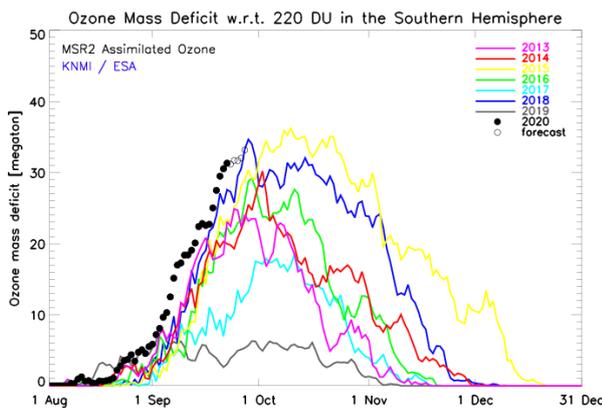
## 5.2 Déficit de masa de ozono.

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. La **Figura 16a** y la **Figura 16b** se muestra el déficit de la masa de ozono, tal como es deducido del GOME-2 Y OMI, respectivamente. El desarrollo de este parámetro está muy separado a la derecha a la curva de la media (1979-2019) lo que significa un déficit temprano que otros años.

Los datos del KNMI y de la NASA son muy parecidos y en ambos casos se muestra una tendencia a ir acercándose, la **Figura 16b** muestra que el tamaño del agujero de ozono del 2020, ya supero al del 2018 y tiende a alcanzar al del año 2015. Si la estratosfera continua enfriándose y con gran extensión en área y volumen de las NEP, es muy probable que se incremente más que el del 2015, y sea aún más intenso.



*Figura 17a. Déficit de masa de ozono para 2020 (curva roja). La línea color morado, representa el año 2019. La línea azul fuerte es la media del período 1979-2019. Las líneas sombreadas en azul es el percentil de 30% y 70%, mientras que las líneas sombreadas con azul claro y transparente es el percentil de 10% y 90%. Finalmente, las líneas externas en negro son los máximos y mínimos históricos del período 1979 – 2019. Este gráfico es producido por el SMN basado en datos descargados del sitio web de Vigilancia del ozono de la NASA, los cuales están basados en datos*



*Figura 17b. Déficit de masa de ozono para 2020. La curva con puntos negros, muestran la actualidad y los puntos vacíos son pronóstico de 5 días. Algunos otros años seleccionados con una baja sustancial de ozono se muestran para ser comparados. La línea gris gruesa es la media de 1979-2019. Los datos son provistos por KNMI y están basados en los datos de los satélites GOME-2 y SCIAMACH*

## 6. RADIACIÓN UV.

Uno de los mayores impactos de la formación del agujero de ozono es la filtración de la radiación UV. Para lo que va del año, ya se formó consistentemente el agujero de ozono, de tal manera que los Índices de radiación Ultravioleta, se mantienen dentro de lo bajo (1 y 2).

Observamos en la **Figura 18**, los índices de UV (IUV) y el ozono total, proyectados hasta el 28 de septiembre. La tabla de arriba a la izquierda corresponde a Ushuaia, donde no se espera que los IUV no superen el 4 (Moderado), debido a que no se espera que pase el agujero de ozono hasta antes del 28 de septiembre. En la tabla arriba a la derecha, corresponde a la Estación Antártica Marambio, los IUV no superarían 4 (Moderado) salvo el día 27 de septiembre que apenas es 4.1 (Todavía moderado), pese a que el agujero de ozono estará presente a partir del día 25 con valores inferiores a 220 UD. La tabla de la abajo a la izquierda, corresponde a la Estación Antártica San Martín, donde ya se encuentra presente el agujero de ozono, pero los valores de IUV apenas rebasan el valor de 3 (moderado). Finalmente, la tabla de abajo a la derecha, corresponde a la Estación Belgrano II, donde el agujero de ozono está presente todos los días, pero los valores de IUV no superan el valor de 1 (Bajo) salvo el día 28 de septiembre que proyecta un IUV de 1 (bajo).

Date	UV index	ozone column
23 Sep 2020	2.6	317.3 DU
24 Sep 2020	3.3	269.9 DU
25 Sep 2020	3.4	269.7 DU
26 Sep 2020	3.1	295.8 DU
27 Sep 2020	3.2	289.4 DU
28 Sep 2020	2.9	325.0 DU
grid cell centre data: lon, lat = -68.375, -54.875 elevation = 228 ( $\pm$ 299) m		

Date	UV index	ozone column
23 Sep 2020	1.6	347.9 DU
24 Sep 2020	2.7	226.2 DU
25 Sep 2020	3.3	198.9 DU
26 Sep 2020	3.4	199.6 DU
27 Sep 2020	4.1	179.3 DU
28 Sep 2020	3.5	204.3 DU
grid cell centre data: lon, lat = -56.375, -61.125 elevation = 0 ( $\pm$ 0) m		

Date	UV index	ozone column
23 Sep 2020	1.8	195.1 DU
24 Sep 2020	2.4	160.9 DU
25 Sep 2020	3.2	134.3 DU
26 Sep 2020	3.1	141.6 DU
27 Sep 2020	3.1	146.0 DU
28 Sep 2020	3.1	151.4 DU
grid cell centre data: lon, lat = -67.125, -68.125 elevation = 144 ( $\pm$ 217) m		

Date	UV index	ozone column
23 Sep 2020	0.6	159.6 DU
24 Sep 2020	0.7	144.7 DU
25 Sep 2020	0.8	138.5 DU
26 Sep 2020	0.9	131.0 DU
27 Sep 2020	0.9	135.0 DU
28 Sep 2020	1.0	142.3 DU
grid cell centre data: lon, lat = -34.625, -77.875 elevation = 232 ( $\pm$ 52) m		

**Figura 18. Valor de Índice UV y de ozono total proyectados a 5 días. Arriba a la Izquierda, Estación VAG Ushuaia. Arriba a la derecha es la Estación Antártica Marambio. Abajo a la izquierda es la Estación Antártica San Martín. Abajo a la derecha, es la Estación Antártica Belgrano II.**

## 7. CONCLUSIONES

La actividad de destrucción de ozono en la estratosfera, ya está presente. Con temperaturas mínimas proyectadas a finales de septiembre que rebasan los valores mínimos históricos del periodo 1979 a 2019, es decir una estratosfera extremadamente fría, de tal manera que formación de las NEP I y NEP II continúan con su desarrollo hasta el día de hoy, así como su superficie y volumen, están proyectadas a un crecimiento que supere los máximos históricos del periodo 1979 a 2019. Las proyecciones de la actividad de onda, muestran una actividad baja y superior a la media de acuerdo al periodo 1979 – 2019.

Las estaciones de medición de San Martín y Belgrano II ya muestran valores de ozono total, debajo de los 220 UD, indicativo de la presencia del Agujero de ozono, mientras que los valores de IUUV no superan los 4 (Moderado) en términos generales. En tanto que Marambio, hasta finales del mes de septiembre se espera el paso del agujero de ozono y con IUUV que no superan el valor de 4 (moderado). Finalmente, en Ushuaia no se espera aún el paso del Agujero de ozono y los valores de IUUV, no superan el 4 (moderado).

Debido a lo prestado a finales de septiembre, se espera que agujero de ozono, sea muy intenso y de gran extensión.

**El siguiente boletín se actualizará el aproximadamente el día 8 de octubre 2020.**

## 8. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Oficina de Asimilación y Modelo Global (GMAO) de la NASA (MERRA).

Se agradece al Centro Europeo para Pronósticos del Tiempo de Medio Alcance (ECMWF), Instituto Noruego para Investigación del Aire (NILU) y a la Agencia Espacial Europea (ESA).

Se agradece a Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS).

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

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

Se agradece al Instituto Finlandés de Meteorología, por el soporte de las ozonondas 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 Petrucci y Sr. Gonzalo Gambarte.**

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

Se agradece a los observadores Antárticos de San Martín del Laboratorio LASAN: **Sr. Nahuel Leandro Solís Etchegoin y Ezequiel Peschiera.**

Se agradece a los observadores Antárticos de Belgrano II del Laboratorio LABEL; **Sr. Pablo Signorelli, Sr. Guillermo Maidana y Sr. Ezequiel Molina.**

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Geir Braathen, "Boletín de Ozono Antártico", Editado por la WMO.
- Newman (NASA), E. Nash (SSAI), R. McPeters (NASA), S. Pawson (NASA) National Aeronautics and Space Administration - Goddard Space Flight Center - NASA Ozone Watch.
- Veefkind, J.P., J.F. de Haan, E.J. Brinksma, M. Kroon and P.F. Levelt, Total Ozone from the Ozone Monitoring Instrument (OMI) Using the DOAS technique, IEEE Trans. Geo. Rem. Sens., 2006, Vol. 44, No. 5, 1239-1244, doi:10.1109/TGRS.2006.871204.
- H. J. Eskes, R. J. van der A, E. J. Brinksma, J. P. Veefkind, J. F. de Haan, and P. J. M. Valks, Retrieval and validation of ozone columns derived from measurements of SCIAMACHY on Envisat, Atmos. Chem. Phys. Discuss, 5, 4429-4475, 2005.
- Valks, P.J.M., J.F. de Haan, J.P. Veefkind, R.F. van Oss and D.S. Balis, TOGOMI: An improved total ozone retrieval algorithm for GOME, XX Quadrennial Ozone Symposium, 1/6/2004-8/6/2004, C.S. Zerefos (Ed), 2004, Athens, University of Athens, 129-130.

- E. Botek, S. Chabrilat, Y. Christophe (BIRA-IASB) "Report on 2014 Antarctic ozone hole studies" MACC-III project (Monitoring Atmospheric Composition and Climate - III) 2014.
- Scientific Assessment of Ozone Depletion 2018 – Executive Summary – WMO UNO environment, NOAA, NASA, European Commission.
- Manuel Gil Ojeda "El ozono estratosférico" Tethys, 3, 47–58, 2006. DOI:10.3369/tethys.2006.3.06.
- Carbajal Benítez Gerardo, Facundo Orte, Elian Wolfram, Eduardo Luccini y Fernando Nollas. Boletines 1, 2, 3, 4 e Informe Final del Agujero de Ozono 2019.
- 
- Carabajal Benitez, Gerardo; Cupeiro Manuel; Sánchez Ricardo; Agüero Juan Daniel; Barlasina María Elena y Nollas Fernando. Caracterización de la Columna Total de Ozono medido con el Espectrofotómetro Dobson en cuatro estaciones en la Argentina. ISBN 978-987-1323-36-4
- 

LINK de datos:

<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/SH.html>

<https://atmosphere.copernicus.eu/>

<http://www.temis.nl/uvradiation/nrt/placenames.html>