



Servicio
Meteorológico
Nacional

BOLETIN 4 - TEMPORADA DEL AGUJERO DE OZONO 2019

***Gerardo Carbajal Benítez¹, Facundo Orte², Elian Wolfram²,
Eduardo Luccini³ y Fernando Nollas¹.***

*1. Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios.
Dirección del Servicio Meteorológico Nacional.*

2. CITEDEF.

3. CEPROCOR-CONICET.

Octubre, 2019



Ministerio de Defensa
Presidencia de la Nación

INDICE

ANTECEDENTES	3
1. Introducción.	4
2. CONDICIONES METEOROLÓGICAS PREVALECIENTES	5
2.1 Temperaturas.	5
2.2 Área y volumen del NEP	7
2.3 Estabilidad del vórtice.	8
3. OBSERVACIONES DE OZONO	10
3.1 Observaciones Satelitales.	10
3.2 Estaciones en superficie.	12
3.2.1 Estación VAG USHUAIA.	12
3.2.2 Estación Antártica MARAMBIO.	14
3.2.3 Estación Antártica SAN MARTIN.	16
4. ACTIVACIÓN QUIMICA DEL VÓRTICE	17
4.1 Resultados de Modelo.	17
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	22
7. CONCLUSIÓN	23
8. AGRADECIMIENTOS	24
9. BIBLIOGRAFÍA	25

ANTECEDENTES

La estratósfera sobre la región Antártica sufre el deterioro de la capa de ozono año tras año desde la década del '80, es decir, hay una disminución de la columna total de ozono en la estratósfera 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 (Cl_2) y bromo (Br_2), junto con factores meteorológicos que permiten la estabilidad y fortalecimiento 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 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, 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 (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. Por otro lado, el efecto químico del aumento de las concentraciones de óxido nitroso (N_2O), otro GEI, será agotar el ozono estratosférico.

El presente boletín tiene como objetivo iniciar el monitoreo la columna total de ozono en la temporada 2019, desde su inicio hasta su finalización, con la finalidad de contribuir al entendimiento y comprensión del fenómeno del agujero de ozono, así como de informar sobre sus impactos a todas aquellas personas que estén interesadas en conocer la evolución e impacto del agujero de ozono.

1. INTRODUCCIÓN

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 (NEPs).

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 estratósfera, 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 estratósfera. 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 estratósfera (proceso denominado desnitrificación), el cloro y bromo activos pueden destruir muchas más moléculas de ozono antes de ser inhibidos. La formación de nubes de hielo llevará a una pérdida más severa de ozono, que la que causa las 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 estratósfera 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 Boletín 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 (CAMS) 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 Climático de TOKIO, considerado Centro regional de Clima (RII, Asia) por la Organización Meteorológica Mundial (OMM). <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 y la Estación Antártica Marambio, dependientes 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 han estado por debajo del umbral 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**. Las temperaturas diarias mínimas en el nivel de 50 hPa han estado cercanas y oscilando alrededor del promedio correspondiente al período 1979-2018. Se ha suscitado un “evento repentino de calentamiento” en la estratósfera a finales del mes de agosto y las proyecciones muestran que continuará el calentamiento estratosférico, tal como lo muestra la **Figura 1**, e incluso rebasarán el umbral de formación de las NEPs tipo 2. A finales de septiembre las temperaturas bajaron, pero el enfriamiento no alcanzará para la formación de las NEPs. Para las dos primeras semanas de octubre, el agujero de ozono muestra que empieza a tener condiciones normales, y la temperatura mínima a 50 hPa, comienza a tocar la línea del percentil 30-70% de la serie total de 1979 – 2018.

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 del período 1979 a 2018, desde el inicio del mes de abril hasta finales de julio. A inicios de agosto permanece por encima de la media, aunque no significativamente, pero a finales del mismo mes debido al calentamiento repentino de la estratósfera se observa como aumenta la temperatura casi las tres primeras semanas de septiembre, después las proyecciones muestran que oscilen alrededor de las máximas, incluso los primeros días de octubre. Después de las dos primeras semanas de octubre, se confirma que las temperaturas empiezan a alcanzar su nivel normal, acercándose al percentil 30-70% de la serie total de 1979 – 2018.

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 2018. A inicios de julio, se encuentra por arriba de la media, coincidente con la **Figura 2** y contrastando con el año 2018, que a estas fechas, se observaba enfriamientos por debajo de la media. Pero a finales de agosto se observa un calentamiento que alcanza valores muy por encima de los máximos históricos. A mediados de octubre, se muestra condiciones normales y muy cercanas a la línea de temperatura del 2018.

En ambos casos, las predicciones muestran ya condiciones normales para esas fechas.

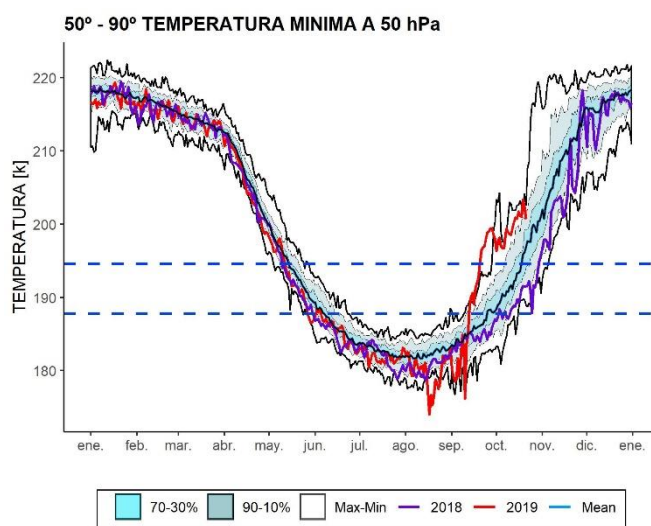


Figura 1. Temperatura mínima promedio a 50hPa, sobre la región de 50° a 90° S. La línea color roja representa la evolución de la temperatura mínima para el año 2019, la línea morada representa la temperatura para el año 2018, mientras que la línea azul oscuro representa la temperatura media para el periodo 1979-2018. 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).

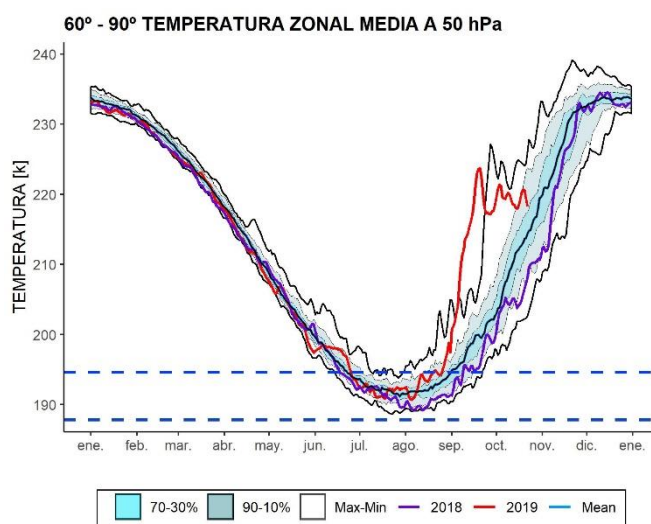


Figura 2. Temperatura zonal media a 50hPa, sobre la región de 60° a 90° S. La línea color roja representa la evolución de la temperatura zonal media para el año 2019, la línea morada representa el mismo parámetro para el año 2018, la línea azul oscuro representa la media para el periodo 1979-2018. Las 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).

En la **Figura 4**, este calentamiento repentino ya se observa desde el 19 de agosto al nivel de 10 hPa y se muestra a partir del 23 de agosto a una altura de 30 hPa. Del 13 al 18 de septiembre. Durante el primer día se observa que el calentamiento continua, sobre todo en la Península Antártica y se propaga hasta el este del continente antártico (Temperatura a 30hPa) Actualmente, ese calentamiento estratosférico se ha diluido. A la altura de 10 hPa, los 8 días primeros de octubre, se observan condiciones normales.

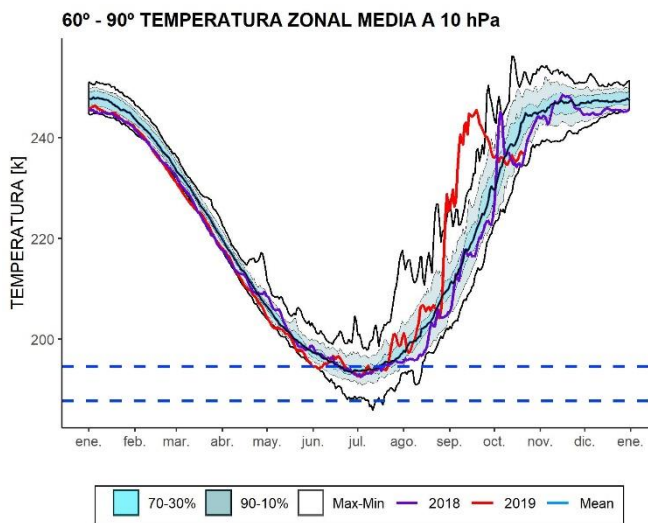


Figura 3. Temperatura zonal media a 10hPa, sobre la región de 60° a 90° S. La línea color roja representa la evolución de la temperatura zonal media para el año 2019, la línea morada representa la temperatura para el año 2018, la línea azul oscuro es la media para el periodo 1979-2018. Las líneas externas 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).

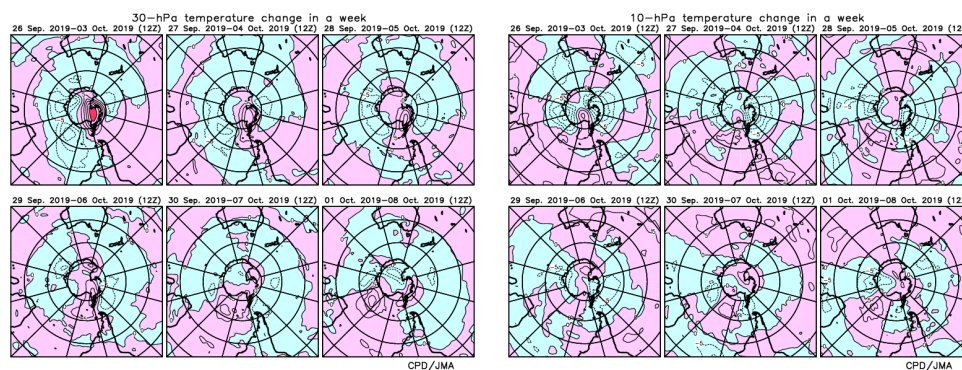


Figura 4. Cambios de temperatura en una semana a un nivel de 30 hPa (Izquierda) y 10 hPa (Derecha). El contorno tiene intervalos de 5°C. Las áreas sombreadas de color rosa y azul claro, indican calentamiento y enfriamiento, respectivamente. El sombreado rojo indica calentamiento para valores superiores a 25° C. Fuente: Tokio Climate Center, <http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/clisys/STRAT/>

2.2 Área y Volumen del NAT

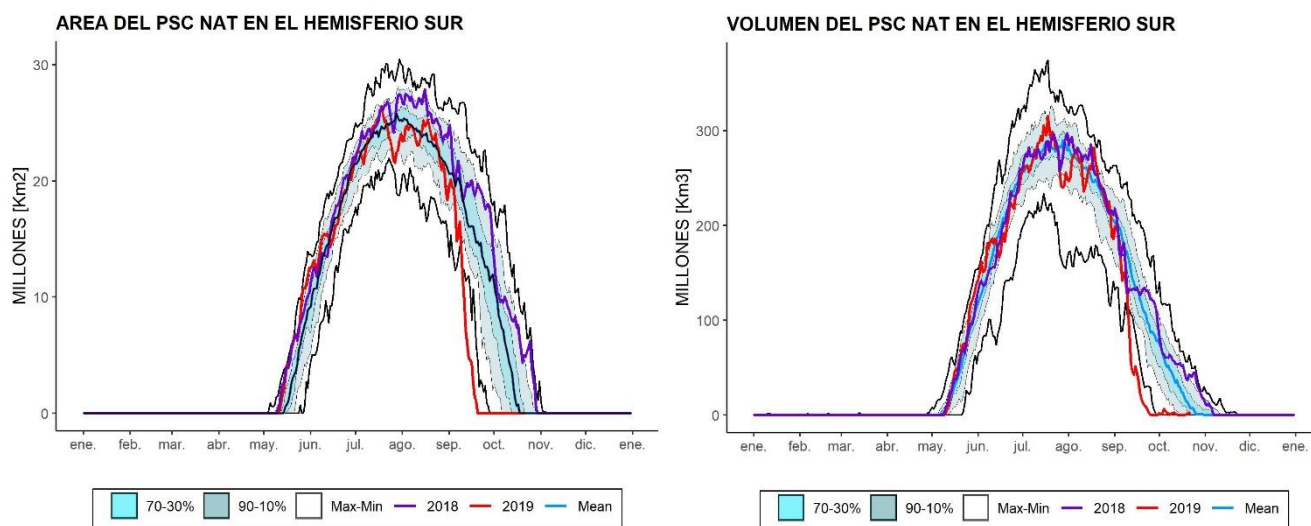
Desde la aparición de las primeras dos semanas de mayo hasta la última semana del mes de julio, el área de las PSC NAT se incrementa y oscila sobre el valor medio del periodo 1979-2018. Posteriormente, del 19 al 26 de julio se observa una caída vertiginosa y el día 27 de julio inicia su recuperación, respecto a la media del periodo 1979-2018. Después ha permanecido por debajo del valor medio del periodo 1979-2018.

A mediados de Agosto, el área de las PSC NAT permanece inferior con respecto al valor medio. El 18 de julio el área de las PSC NAT alcanzó el valor máximo con 26.07 millones de km², lo cual es un poco inferior a los 28,2 millones de km² alcanzados en el 2015, que ha sido uno de los máximos históricos. Aproximadamente, el día 19 de septiembre, el área de las PSC NAT se diluye, es decir muy pocas y pequeñas nubes son detectadas y por lo tanto, muy poco reservorio de sustancias destructoras de ozono, la fecha es anticipada a la media, que es aproximadamente el 17 de octubre.

El volumen de las PSC NAT se incrementa a partir de la primera parte del mes de mayo, y oscila alrededor de la media del periodo 1979 a 2018, hasta el mes de julio. El 18 de julio alcanza su valor máximo con 281.64 de Km³. Luego, los valores oscilan alrededor de la media (1979 - 2018). Del mismo modo que el volumen, se va diluyendo hasta alcanzar el

volumen cero, a partir del día 26 de septiembre, día muy lejano de la media que muestra que el volumen de las nubes se diluyen totalmente (31 de octubre).

El área o volumen con temperaturas lo suficientemente bajas para la existencia de PSC NAT, 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_3 .



Figuras 5 y 6. Serie de tiempo del Área y volumen de las nubes estratosféricas polares (NAT), sobre la región Antártica, donde la temperatura están suficientemente bajas para la formación de ácido nítrico trihidratado (NET tipo I) en el nivel isentrópico de 460 K. La línea color roja representa la evolución del tamaño y volumen de la PSC NAT para el año 2019, la línea morada representa el mismo parámetro para el año 2018, la línea azul oscura representa la media para el periodo 1979-2018. Las líneas externas negras, son los máximos y mínimos históricos durante el periodo 1979 – 2018. Las líneas sombreadas en azul de adentro hacia afuera, son los percentiles de 70 – 30% y de 10 – 90%.

Debido al enfriamiento temprano de la estratosfera, la destrucción repentina de las PSC NAT puede ser la razón por la cual el agujero de ozono tiene una aparición temprana, tal como se describe más adelante. Pero, debido al calentamiento repentino de la estratósfera, provoca que las PSC NAT inhiban y reduzcan su formación, tal como se muestra en la **Figura 5 y 6**. Tanto el área y volumen de las PSC NAT, tienen una disminución considerable, e incluso por debajo de los valores mínimos históricos.

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 7a** 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 mayor a la media del periodo 1997 -2018. Pero, de abril a junio la intensidad disminuye, aunque no demasiado. Luego, desde el inicio de junio al presente, se observa una actividad de ondas mayor que la media del periodo 1979 – 2018. Las predicciones muestran que la actividad de ondas que transportan calor se incrementa considerablemente y con ello se produce el aumento de temperatura en la estratósfera. Las proyecciones muestran una alta actividad de

ondas que se estará incrementando con el paso de los días. Es muy probable que esta actividad de ondas sea la responsable del calentamiento repentino en la estratósfera observada en las **Figuras 1, 2, 3 y 4**. Las predicciones muestran que la actividad de onda continua, inclusive hasta los inicios del mes de octubre. Después de las dos primeras semanas de octubre, las condiciones de flujo de calor, empiezan a alcanzar la normalidad, acercándose a la línea de la media histórica (1979-2018)

Mientras que en la Figura 7b se muestra la evolución de la onda total, que es la responsable de transportar calor a la estratosfera a lo largo del tiempo en el Hemisferio Sur y muestra un periodo máximo entre finales de agosto y mediados de septiembre con un valor igual o superior a $27 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

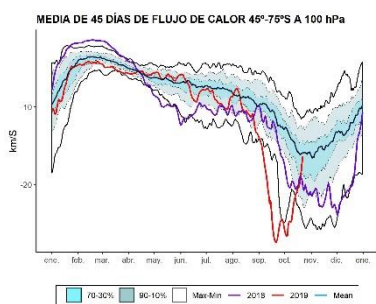


Figura 7a. Serie de tiempo del flujo de calor meridional promediado sobre la región entre 45-75°S. La curva roja muestra los datos para 2019 (actualizado hasta el 30 de septiembre). Note que un gran número negativo significa un gran flujo de calor. Los valores cercanos a cero significan un flujo de calor pequeño. La línea azul oscura representa la media para el periodo 1979-2018. 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%, finalmente la línea morada representa al año 2018.

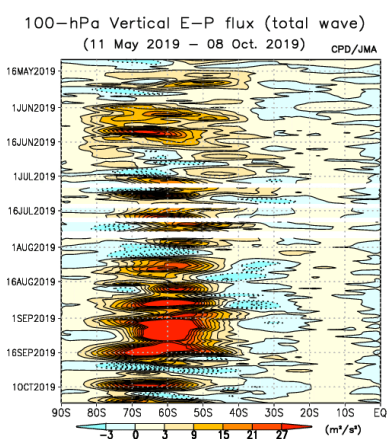


Figura 7b. Sección transversal de la componente vertical del flujo E-P flux a una altura de 100-hPa en el Hemisferio Sur. El intervalo de los contornos es $6 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (más alto que $3 \text{ m}^2/\text{s}^2$) y $3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ (más bajo que $3 \text{ m}^2/\text{s}^2$). Desde el día 11 de mayo hasta el 8 de Octubre. Fuente: Tokio Climate Center, <http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/clisys/STRAT/>

La **Figura 8** se muestra los mapas de vorticidad potencial (PV) en el nivel isentrópico de 485 K ($\sim 19 \text{ km}$ de altura) para la fecha del 16, 17, 18 Y 19 de octubre durante los años 2019 al 2018 y 2015 (de arriba hacia abajo). Se incluye el año 2015 debido a que en esos años se presentó uno de los tres agujeros de ozono más grandes registrados en la historia.

A pesar de la formación temprana del agujero de ozono y la presencia de un vórtice estable, además fortalecido, el calentamiento repentino y la actividad de la ondas hacen que el borde se debilite y alcance aproximadamente los niveles de los años anteriores y muy probablemente que tienda a debilitarse más con el paso de los días, tal como muestran las proyecciones de temperatura. Se aprecia que, para lo que va del año, el vórtice es más débil que el 2018 y 2015, además de ser más chico. Lo que muestra una vez más, el vórtice debilitado.

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 9** muestra las columnas de ozono mínimas tal como han sido medidas por el instrumento GOME-2 a bordo del MetOp en comparación con su media histórica 1979 - 2018. Se aprecia que en los primeros días de agosto hay una tendencia a disminuir el ozono, es decir a la destrucción del mismo, que casi alcanza al mínimo histórico, muy probablemente debido a una estratosfera muy fría y la persistencia de las PSC NAT que son reservas que contienen sustancias destructoras de ozono. Pero al final del mismo mes, hay una recuperación del ozono, debido a la poca formación de las NEP, que son reservas de las sustancias destructoras de ozono. A mediados de agosto e inicios de octubre, muestra una recuperación de la cantidad de ozono muy atípica, coherente con la disminución casi total de las PSC NAT que son reservas de las sustancias destructoras de ozono, siendo fluctuaciones constantes, hasta el día de hoy.

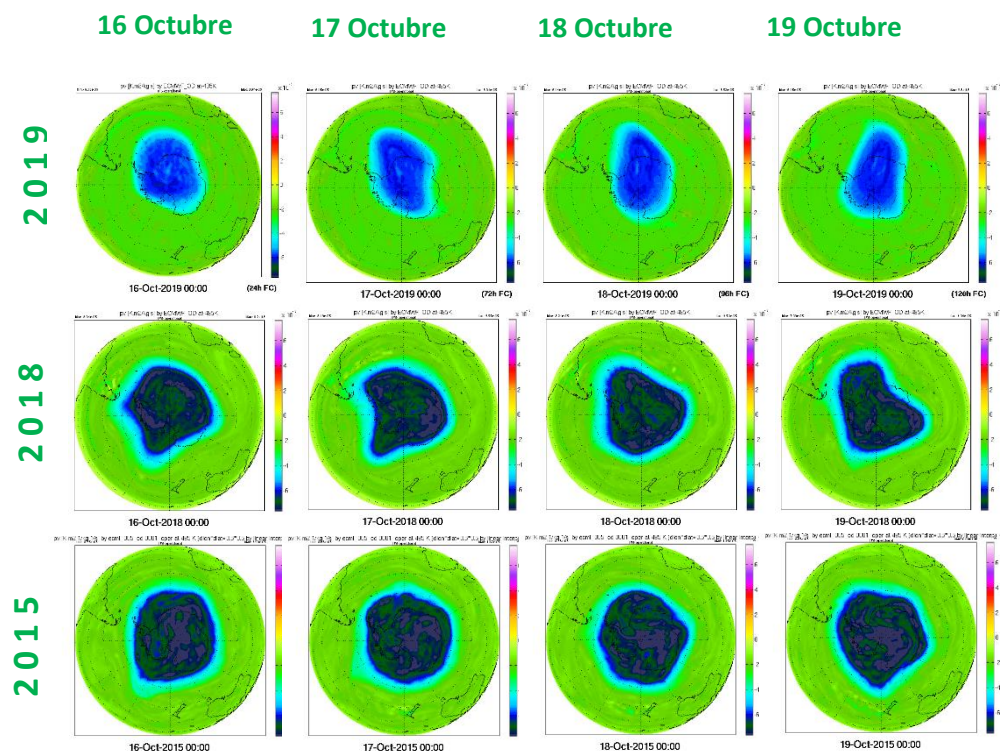


Figura 8. Mapas de vorticidad potencial (PV) a una altura isentrópica de 485 K, para los días 27, 28, 29 y 30 de septiembre del 2015, 2018 y 2019, respectivamente. Los valores negativos más cercanos a cero, indican un vórtice débil (tono de color más claro).

La **Figura 10** muestra los mapas de las columnas de ozono de las observaciones del satélite OMI donde se observa la situación del agujero de ozono para el 27 de septiembre de cada año, desde el 2008 hasta el 2019. Durante la el día 27 de septiembre, tal es el caso de los años 2006 y 2015, donde se presentaron agujeros de ozono dentro de los 5 más grandes. Se observa que la formación, pese a la apertura temprana del agujero de ozono, se encuentra aparentemente en niveles muy bajos, es decir el agujero de ozono es más pequeño que el de los otros años.

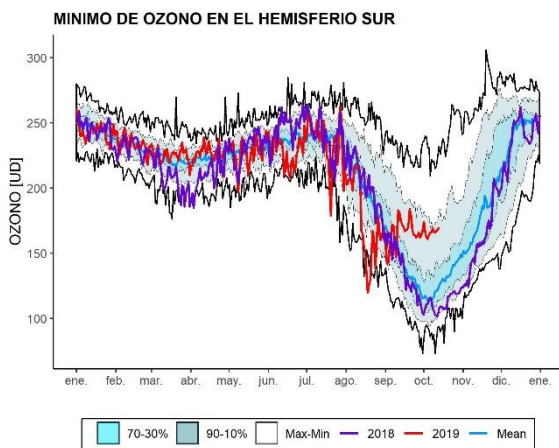


Figura 9. Mínimo diario de la columna total de ozono en el Hemisferio Sur observado por GOME-2, y en el pasado por SCIAMACHY. La línea roja muestra las observaciones de GOME-2 para el año 2019, la línea morada representa al año 2018. El pronóstico para los siguientes días muestra que el mínimo de ozono continuará creciendo. La figura está adaptada desde un gráfico provisto por el Instituto Holandés de Meteorología (KNMI).

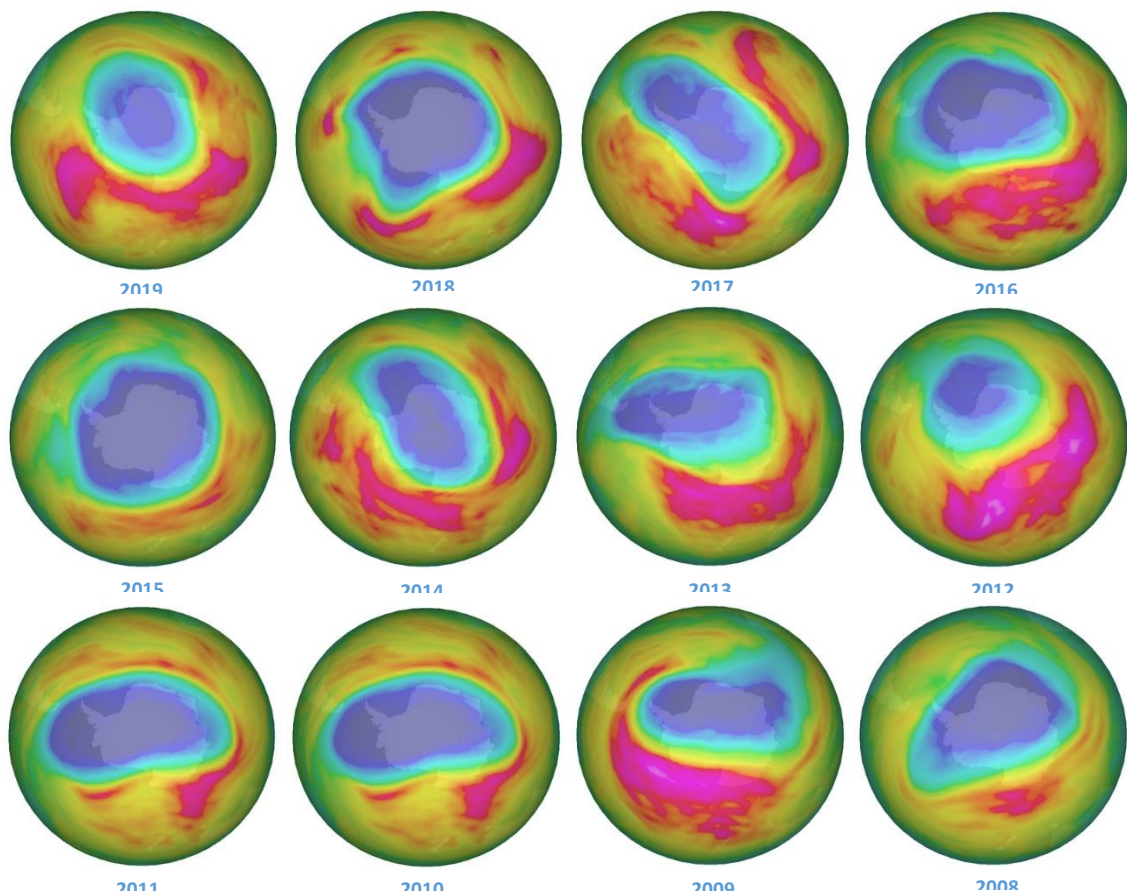


Figura 10. Mapas de columna total de ozono del 16 de octubre, para cada año (2008 al 2019) incluido el 2006. Los mapas son obtenidos del OMI.

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 ($67^{\circ} 07' 48''$ 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 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 11](#), se muestra la evolución de la columna total de ozono para el año en curso, comparado con su media histórica (1994-2018). Algunos días faltantes debido a que se realizó una campaña de calibración (Intercomparación)

En la [Figura 11](#) se observa que los datos oscilan fuertemente alrededor del valor medio, debido a la alta variabilidad que hay en la zona, que es típico del paso de masas enriquecidas con ozono y que circundan al vórtice polar. En otras palabras, puede pasar masas de aire con mucho ozono o pasar masas de aire con muy poco ozono, produciendo dicha variabilidad. Durante los primeros días del mes de septiembre (3 al 10 y del 14 al 16), la ciudad de Ushuaia, estuvo prácticamente todos los días bajo el agujero de ozono, pero después, la segunda quincena, muestra valores muy altos, indicativo del paso de masas de aire muy rico en ozono y circundando a un pequeño agujero de ozono.

Los valores medios mensuales muestran una tendencia a caer, durante el mes de septiembre, tal como se ha observado, si regresamos a la [Figura 11](#), donde se observa que permanece por debajo del mínimo histórico (periodo 1994-2018).

En la [Figura 12](#) se muestra los perfiles de ozono durante los ozonosondeos, y se observa alguna pérdida de ozono entre los 15 y 19 Km de altura, para el día 03/09/2019 (187.71 UD), aunque el perfil aún está bien definido y se mide ozono total de 272 UD para el día 28/08/2019 entre la integración y el residual. Para los días 9 y 16 de septiembre (2017 y 182 UD, respectivamente), se observa un perfil disminuido (paso del agujero de ozono) pero no en su totalidad, lo que muestra que es un agujero débil.

Es importante mencionar que la temperatura en la estratosfera es fría durante los dos primeros ozonosondeos y después se observa el calentamiento en los días siguientes (9 y 16 de septiembre) Por lo tanto se puede concluir que aún no pasa el agüero de ozono por la Patagonia sur.

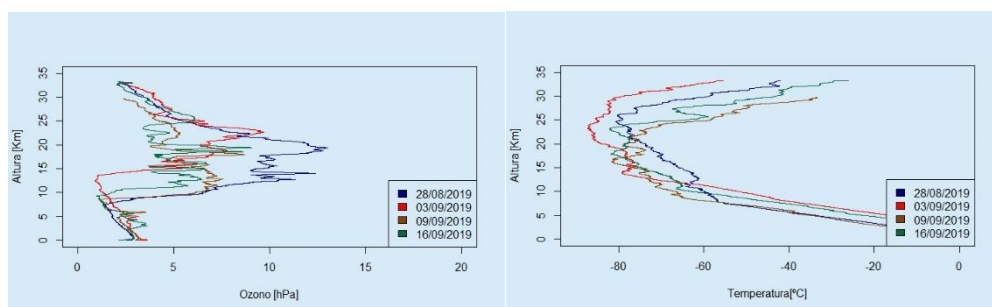
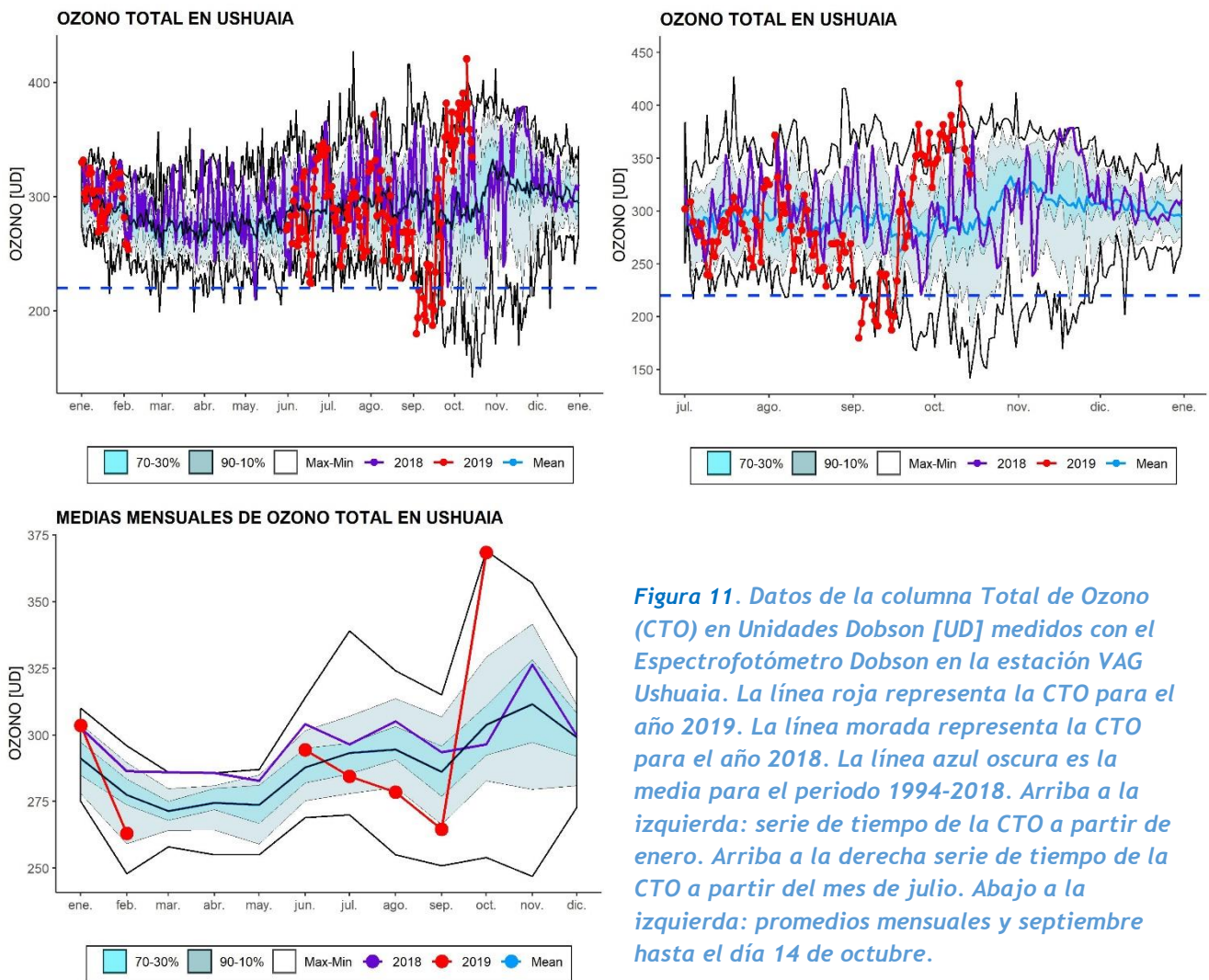


Figura 12. Ozonosondeo realizado en la Estación VAG de Ushuaia los días 28 de agosto y 3 de septiembre del 2019 (lado izquierdo). Perfil de las temperaturas (lado derecho)

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 (#D099), pero sus datos aún no están disponibles, hay un espectrofotómetro Brewer en convenio entre el instituto Antártico Argentino (IAA) y el Instituto Checo de Meteorología.

En convenio entre el SMN y el Instituto Finlandés de Meteorología (IFM) se mantiene el programa de ozonosondeos. Los sondeos se efectúan aproximadamente dos veces por semana durante el período de disminución del ozono, es decir, en temporada de agujero de ozono.

El espectrofotómetro Dobson (#D099) 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 histórica (1994-2018). Algunos días faltantes, se deben a que se realizó una campaña de calibración (Intercompración) y el Dobson tuvo que estar en Buenos Aires.

La [Figura 13](#), también muestra que desde mediados del mes de agosto hasta la penúltima semana de septiembre, los valores han permanecido por debajo del agujero de ozono, indicativo que agujero de ozono estuvo por encima de la península antártica durante varios días, casi de forma permanente. La última semana de septiembre y hasta el 15 de octubre, ya muestra valores muy por arriba del umbral de los 220 UD, indicativo que el agujero se movió y masas de aire rico en ozono circundan el agujero y a la estación antártica Marambio.

En la [Figura 14](#), se muestran los perfiles de ozono para ocho distintos días del año. El día 21/08/2019 ya se observa una disminución de ozono, con respecto a los días de mayo (286.95 UD) y junio (321.43 UD), un perfil más acotado y menos espeso, pero aún conserva la forma y conforme el agujero siga en crecimiento, se observara una deformación y pérdida del perfil en los ozonosondeos. La medición de ozono total es 210.28 UD (ozono residual = 18.54 UD + ozono integrado = 191.74). Para el día 28/08/2019 ya hay una perdida más sustancial, el perfil muestra ya varios mordiscos. El valor medido de ozono total es de 200.31 UD. Se destaca que los cuatro últimos ozonosondeos, ya están por debajo de los 210 UD, es decir que la estación Antártica Marambio, ya está por debajo del Agujero de ozono. Se nota también, el calentamiento progresivo en el perfil de las temperaturas de la estratosfera (4, 9, 19 y 24 de septiembre). Mientras que para el día 5/10/2019 el perfil muestra que está en una situación normal para la misma fecha que años anteriores.

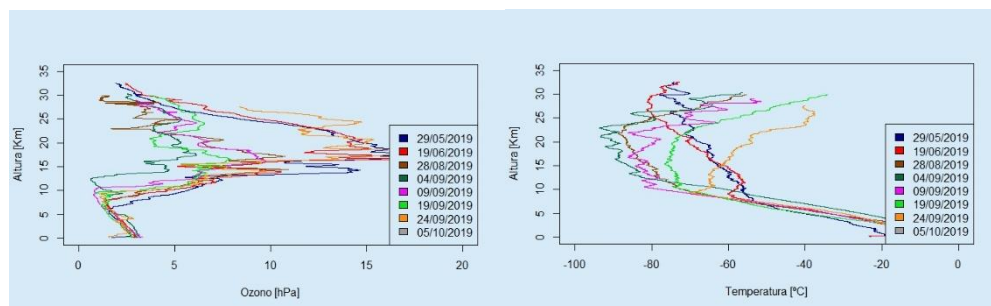
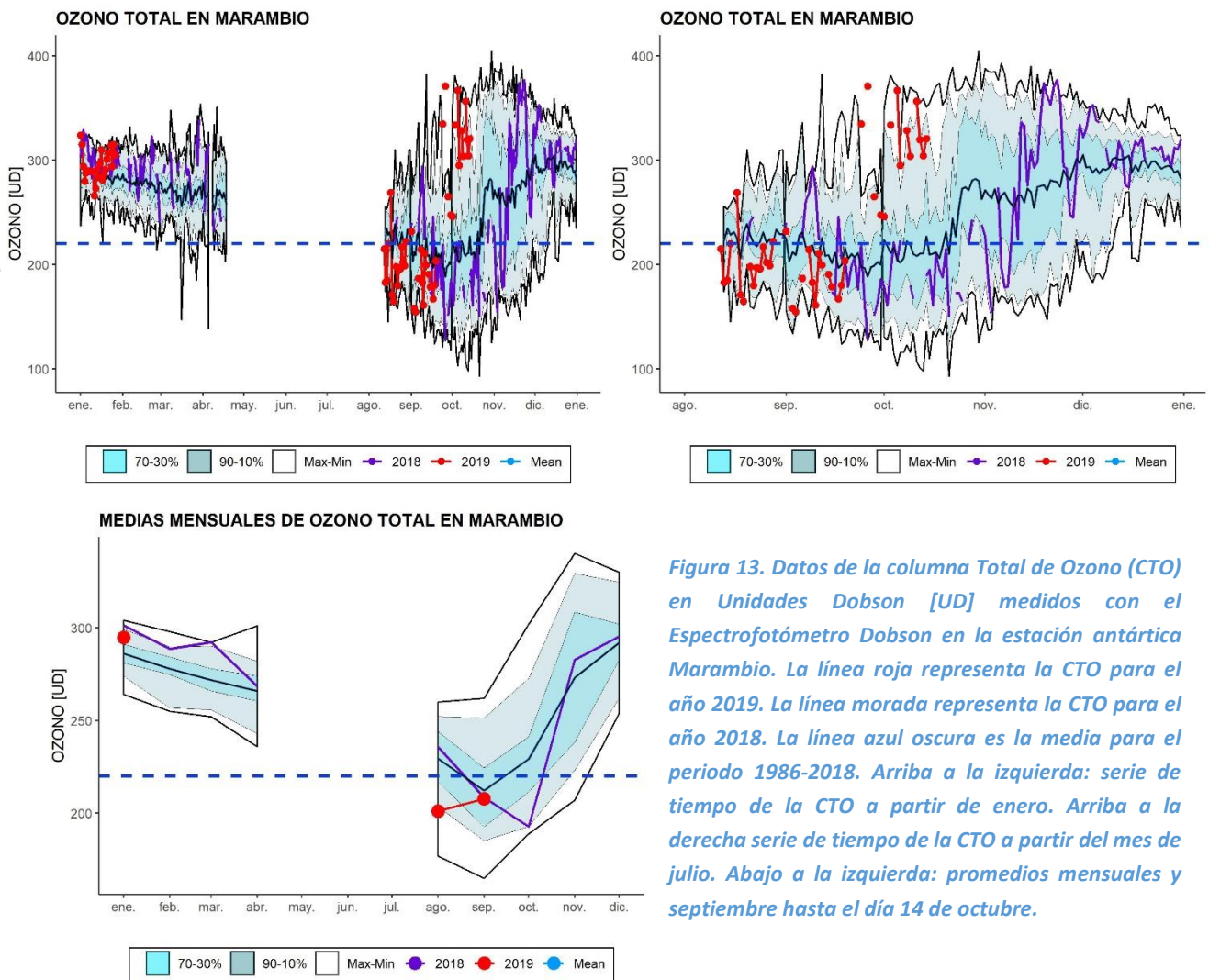


Figura 14. Se muestran los perfiles de cuatro días, los primeros dos, aún no presentan pérdida ozono, pero el último de la fila ya denota dicha pérdida.

3.2.3 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, hay un Espectrofotómetro Brewer en 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 15**, se muestra la evolución de la columna total de ozono para el año en curso, comparado con su media (2016-2018). Al tener registrado 3 años completos (2016 a 2018) y el año en curso, solo se presenta la media, máximos y mínimos, y lo que llevamos edl 2019.

En la **Figura 15** se observa que los últimos días de agosto y los primeros días de septiembre, los valores permanecen bajo el umbral de los 220 UD (menores a ese valor, agujero de ozono) por lo que es consistente con lo sucedido en Marambio. El agujero de ozono permaneció estacionario durante todos esos días y posteriormente, los últimos días de septiembre se presentan valores altos, que indican que agujero se movió y masas de aire rico en ozono circundan al agujero y a la península antártica.

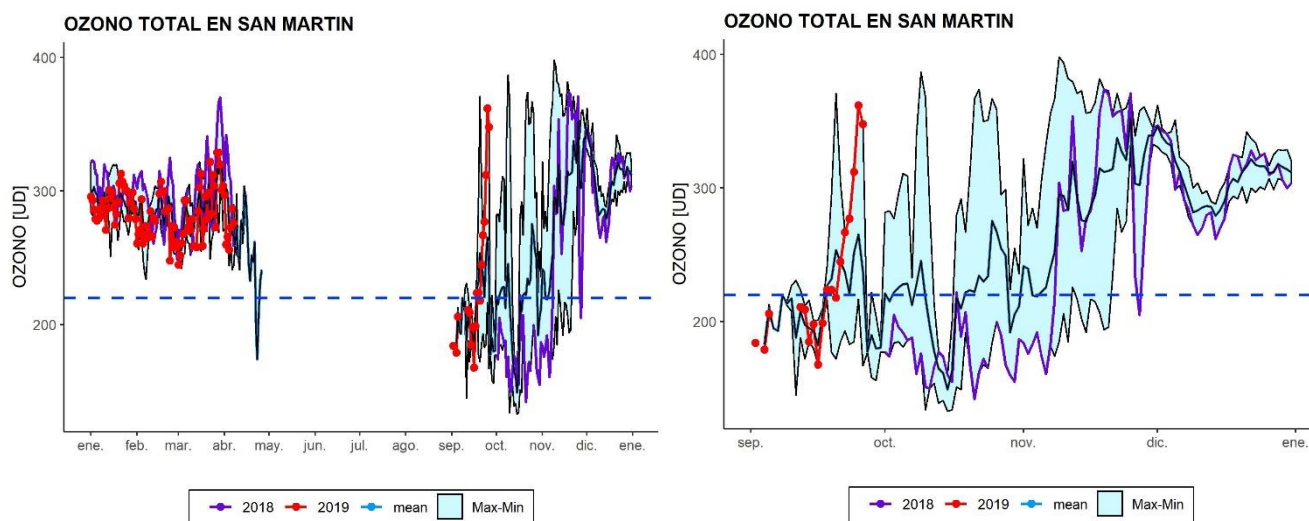


Figura 15. Datos de la columna Total de Ozono (CTO) en Unidades Dobson [UD] medidos con el Espectrofotómetro Brewer en la estación antártica de San Martín. La línea roja representa la CTO para el año 2019. La línea morada representa la CTO para el año 2018. La línea azul oscura es la media para el periodo 2016-2018. A la izquierda: serie de tiempo de la CTO a partir de enero. Arriba a la derecha serie de tiempo de la CTO a partir del mes de julio.

4. ACTIVACIÓN QUÍMICA DEL VÓRTICE

4.1 Resultados del Modelo.

La **Figura 16** muestra la progresión de las cuatro especies principales desde el 1 de junio hasta el 1 de octubre 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 estratósfera. La versión usada en esta edición ha sido originalmente desarrollada dentro del marco del programa GSEPMOTE 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: O_3 , H_2O , HNO_3 , HCl , ClO , $(ClO)_2$, $HOCl$ y N_2O . La 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.

Se puede apreciar a partir de la **Figura 16** como el ácido nítrico gaseoso (HNO_3) es removido gradualmente, comenzando desde el mes de mayo y junio (ver Boletín 2), cuando las temperaturas PSC NET se asentaron y continuando hasta junio y julio. La remoción del HNO_3 se encuentra esencialmente completa el 1 de agosto, pero esa remoción se ve disminuida para el día 1 de octubre, debido a que se concentra en un área más pequeña, que se va diluyendo con el paso de los días. La remoción temprana 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 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 agotado totalmente. La conversión extensa del HCl ya ha tenido lugar el 1 de Junio, 1 de julio y el 1 de agosto, todo el vórtice se encuentra esencialmente vacío de HCl para el día 1 de octubre.

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 ($2Cl_2O_2$). El dímero reacciona fácilmente en la presencia de luz solar. El ClO estará presente en las partes del vórtice iluminadas por el sol, mientras que las áreas oscuras serán llenadas con ($2Cl_2O_2$), 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 16**. Los primeros signos de activación son ya visibles desde el 1 de junio. El grado máximo de activación tiene lugar durante el mes de agosto y septiembre, pero se observa una casi finalización para el primero de octubre.

En la última fila de la **Figura 16** se muestra la razón de mezcla del ozono en el nivel de 50 hPa. Hasta el día 1 de agosto, no hay indicación de disminución del ozono, pero el 1 de septiembre se puede apreciar que alguna destrucción ha tenido lugar adentro del vórtice a esa altura y empezó la formación del agujero de ozono, aunque muy débil debido a el calentamiento repentino en la estratosfera antártica.

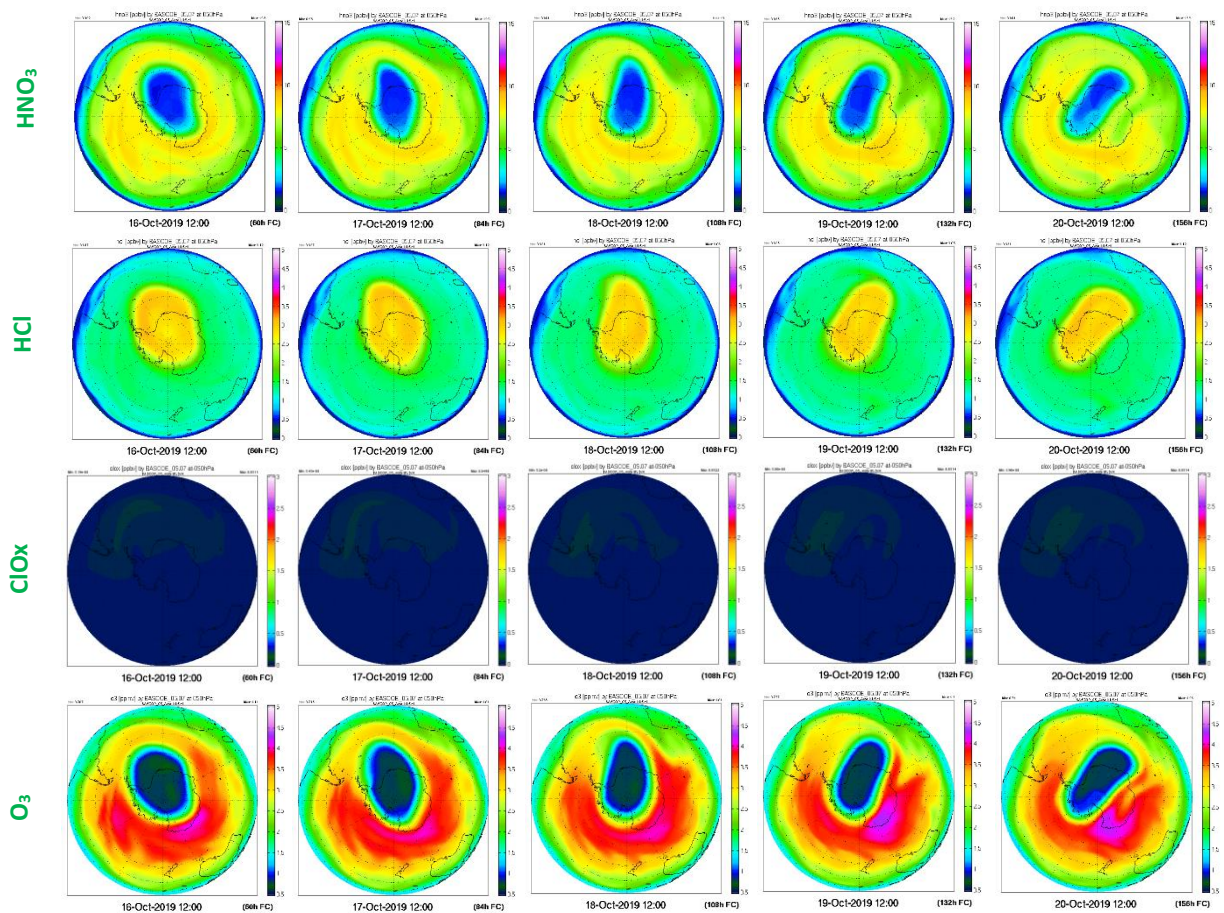


Figura 16. Resultados del modelo de asimilación BASCOE a 50 hPa. Este modelo se usa como parte del proyecto macc-II, ahora el NRT. [Análisis de ozono y especies relacionadas con el ozono \(http://macc.aeronomie.be/4_NRT_products/5_Browse_plots/1_Snapshot_maps/index.php?src=BASCOE&spc=o3&l=at-050hPa\)](http://macc.aeronomie.be/4_NRT_products/5_Browse_plots/1_Snapshot_maps/index.php?src=BASCOE&spc=o3&l=at-050hPa). La primera fila (arriba) muestra la relación de mezcla del ácido nítrico (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 ($\text{ClO}_x = \text{ClO} + 2\text{Cl}_2\text{O}_2$). 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 17a y 17b** 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 el pasado). Un gráfico similar basado en datos del instrumento OMI.

En dichas figuras, se muestra el inicio y crecimiento del agujero de ozono, que a inicios fue muy similar al del año pasado, pero después de la segunda semana de agosto se ha acercado a la curva que representa la media (1997 – 2018). Esto significa que el agujero tiene una aparición temprana, pero las proyecciones, hasta el momento, muestran que su desarrollo se hace más paulatino y probablemente no se desarrolle como a un ritmo similar como el de otros años.

El día 8 de septiembre, el agujero de ozono, alcanza tamaño máximo, con apenas 16,36 millones de m², mientras que la media para ese día es de 19,55 millones de m², es decir, el 16.3% más pequeño que la media, pero posteriormente hay una reducción del tamaño y se espere que se reduzca aún menos que el mínimo histórico. Hasta mediados de octubre, se mantiene fluctuando entre los mínimos históricos del periodo 1979 -2018. Pero en la figura 17b, las proyecciones muestran una disminución del tamaño y es muy probable que para este año, el agujero de ozono, se cierre antes de lo normal.

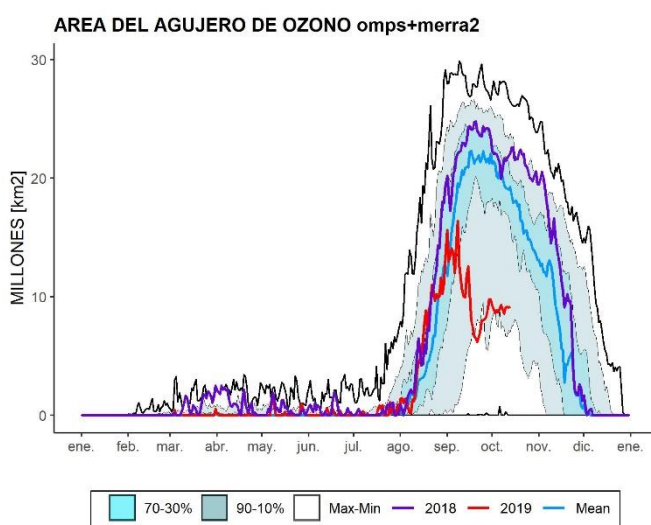
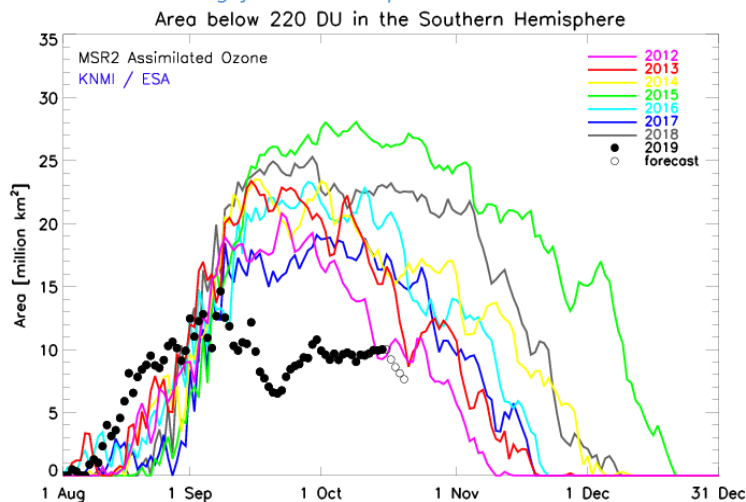


Figura 17a. Área (millones de km²) donde la columna total de ozono es menos de 220 unidades Dobson. El año 2019 es mostrado en rojo (hasta el 6 de septiembre). El año 2018 se muestra en morado. La línea azul fuerte es el promedio de 1979-2018. El área sombreada azul agua representa los percentiles 30 a 70 y el área sombreada en azul transparente representa los percentiles 10 a 90. El área de agujero de ozono el 3 de septiembre es 13.48 millón de km². 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 17b. El área de agujero de ozono para desde los años 1997 a 2018. 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.



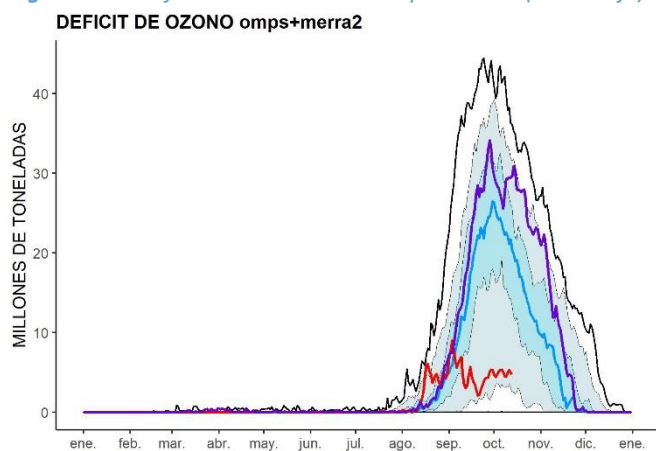
00

5.2 Déficit de masa de ozono.

El déficit de la masa de ozono se define como la cantidad de ozono medida en megatones 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 18a y 18b 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 está muy separado a la derecha a la curva de la media (1979-2018) lo que significa un déficit temprano que otros años, pero después se observa una recuperación parecida al del año pasado y a la media. Posteriormente, no hay tanta destrucción debido a la poca formación de las PSC NET, por lo tanto muy poca pérdida de ozono. A la fecha de hoy (mediados de octubre) se observa que el déficit ha sido casi constante y de muy poca pérdida de ozono. En la Figura 18b se observa que el déficit tiene a disminuir, concordante con el cierre del agujero de ozono.

Los datos del KNMI y de la NASA son muy parecidos y en ambos casos se muestra una tendencia a ir acercándose a los otros años, y a la media (1979 - 2018)

Figura 18a. Déficit de masa de ozono para 2019 (curva roja). La línea color morado, representa el año 2018. La línea azul



fuerte es la media del periodo 1979-2018. 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 periodo 1979 – 2018. 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

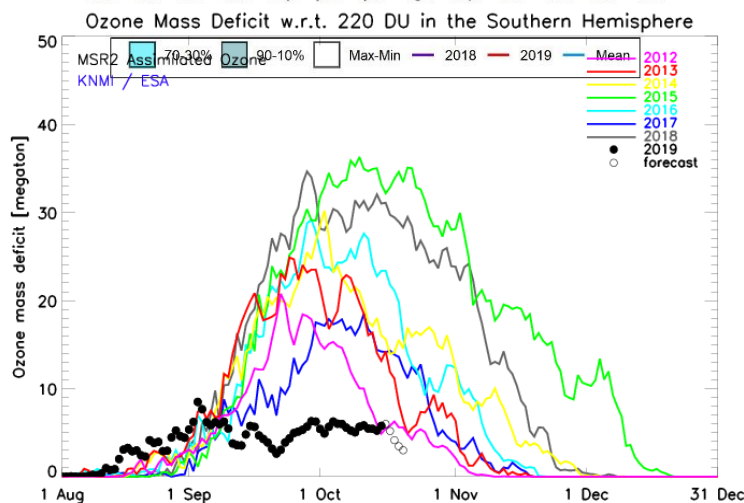


Figura 18b. Déficit de masa de ozono para 2019 (curva roja y puntos negros (pronóstico de 5 días). Algunos otros años seleccionados con una baja sustancial de ozono se muestran para ser comparados.. Los círculos abiertos representan el pronóstico para los siguientes cinco días. La línea gris gruesa es la media de 1979-2018. Este gráfico es producido por la OMM y está basado en datos del sitio web del TEMIS del KNMI.

6. RADIACIÓN UV.

Uno de los mayor impactos de la formación del agujero de ozono es la filtración de la radiación UV a la superficie, pero a latitudes tan bajas no es un factor decisivo, de tal manera que se esperan índices de UV, IUV = 2 y 3, bajos a moderados. Ver [Figura 18 y 19](#), donde se muestran dos escenarios de predicción para los días 17, 18, 19 y 20 de octubre.

En ambos casos los valores IUV, no superan el valor de 3. La [Figura 19](#) muestra el caso donde es libre de nubes, mientras que la [Figura 20](#), incluye la nubosidad.

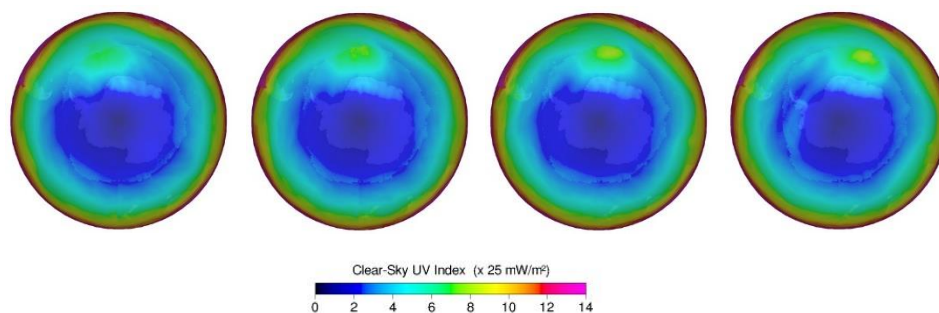


Figura 19. Mapas de proyección de la radiación UV para los 17, 18, 19 y 20 de octubre. Los mapas son tomados del Tropospheric Emission Monitoring Internet Service (TEMIS) – eesa.

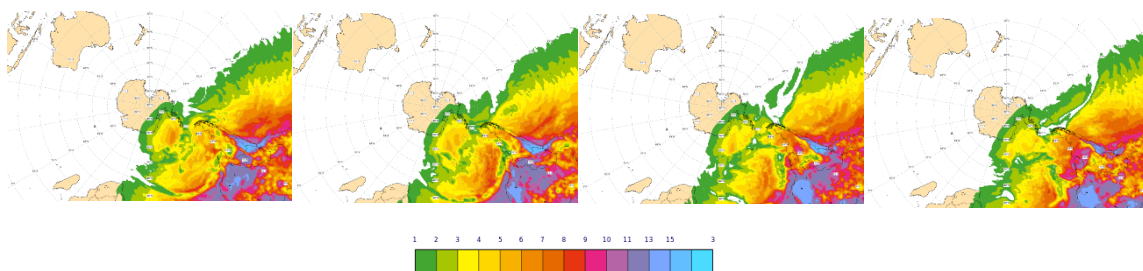


Figura 20. Mapas de proyección de la radiación UV para los días 30 de septiembre, 1, 2 y 3 de octubre. Los mapas son tomados del Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) UV index forecasts.

7. CONCLUSION

La actividad de destrucción y a la vez formación del agujero de ozono, ha iniciado tempranamente, debido a un vórtice fortalecido y una estratosfera fría, que favorece la formación de la PSC NET I y II y con la primera luz del sol empiezan a liberar las especies cloradas para la destrucción de ozono.

Las proyecciones de la actividad de onda, se muestran intensas e incluso en las proyecciones para los próximos días, de tal manera que favorece el calentamiento de la estratosfera y se da un fenómeno poco usual en latitudes Antárticas, que es un “calentamiento súbito de la estratosfera”, común en el hemisferio norte, debido a la generación y transporte de ondas, que llevan el calor a la estratosfera, debido a la gran cantidad de masa continental. En el año 2002, se presentó una situación similar y como resultado fue un agujero de ozono muy pequeño y deformado.

En base a la situación anterior, se observa la temperatura en la estratosfera continua en aumento y consecuentemente, no hay más PSC NET, es decir, poca y nada de liberación de sustancias destructoras de la capa de ozono. De tal manera que el tamaño del agujero de ozono es mucho menor que el de otros años y se espera que continúe la reducción.

Las estaciones de medición con ozonosondas, muestran una destrucción de ozono, pero no muestran dicha destrucciones como en años anteriores, mientras que los perfiles de temperatura muestran un calentamiento en la estratosfera y a esas temperaturas es muy poco favorable para la formación de las PSC NET, por lo tanto la destrucción de ozono sería a través de sustancias residuales y esto puede traer como consecuencia, un cierre temprano del agujero de ozono, siendo proyectado como el más pequeño desde que se tiene registro.

En la medición con los espectrofotómetros Dobson y Brewer en la Antártida, muestran en que un periodo de tiempo, que el agujero de ozono ha sido estacionario y consecuentemente con una alta variabilidad, con valores por debajo del umbral de los 220 UD a mediados de septiembre y altos valores en estas dos primeras semanas de octubre.

Las proyecciones de temperatura, transporte de onda y muy pocas sustancias destructoras de ozono, ya están dentro de lo normal, pero al haber poca destrucción de ozono, se muestran que el agujero se empieza a cerrar y es muy probable que se cierre antes de lo normal (inicios y/o mediados de noviembre)

El tamaño y cierre del agujero de ozono para este año, no es un indicativo de las tendencias a disminuir su tamaño, debido al cumplimiento del Protocolo de Montreal, sino se debe a un calentamiento atípico de la estratosfera, debido al transporte de calor, desde la troposfera hacia la estratosfera, a través de ondas atmosféricas, poco común en el Hemisferio Sur.

El informe final se presentará aproximadamente (o antes) **del día 30 de noviembre 2019.**

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 al instituto Antártico Argentino (IAA) dependencia de la Dirección Antártica Argentina (DNA), especialmente al Ing. Héctor Ochoa por la gentileza y aporte de datos de la Estación Antártica san Martín.

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 por su dedicación a hacer de manera excelente, las actividades (Ing. Lino Fabián Condori, Emiliano Petruzzi y Gonzalo gambarte)

Se agradece al Servicio Meteorológico Nacional, Argentina.

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