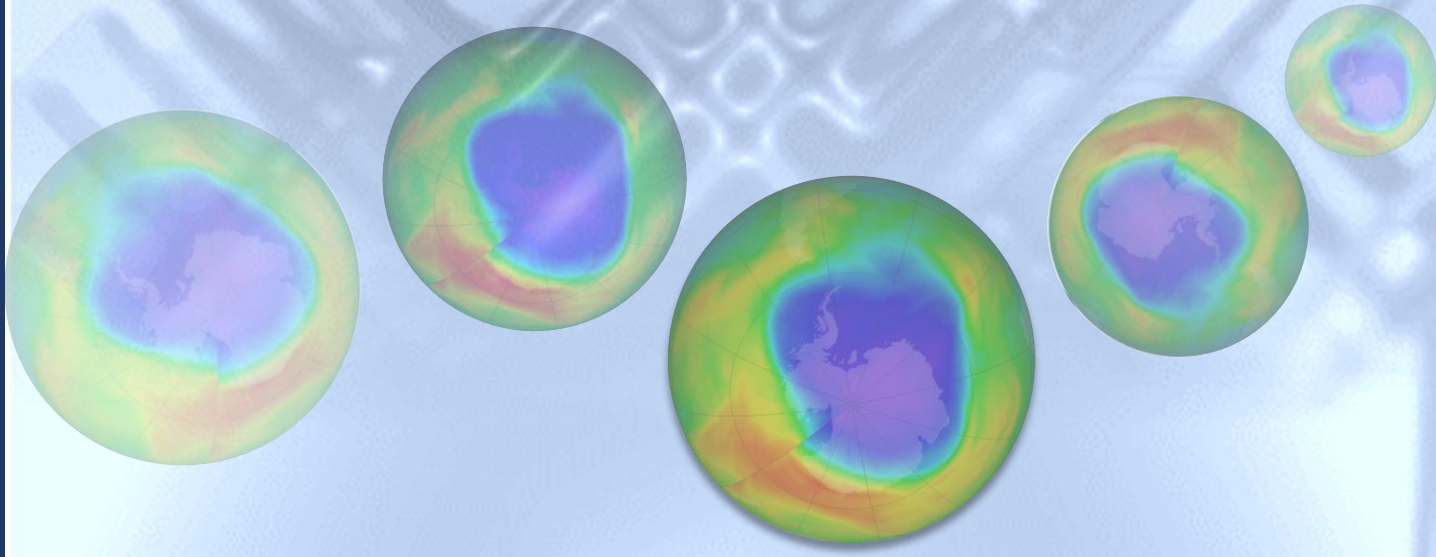


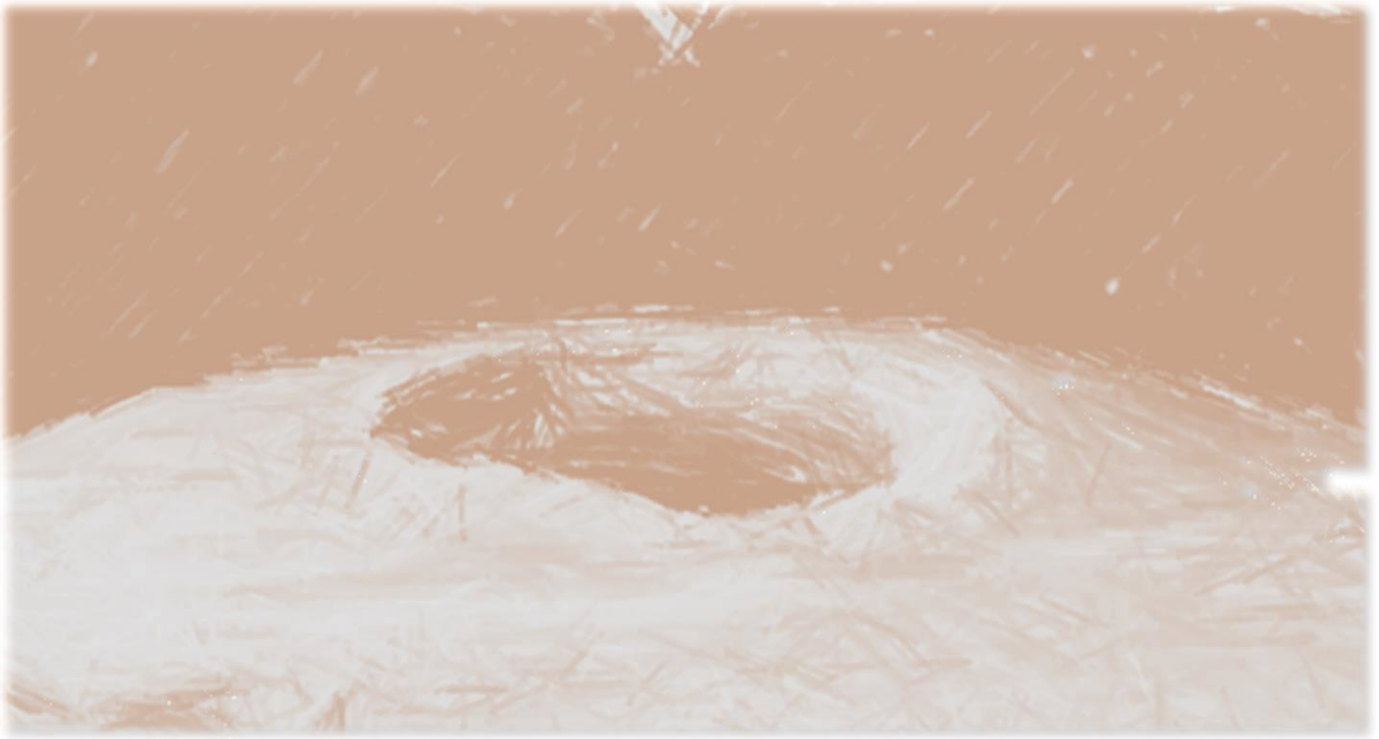


OZONO ESTRATOSFÉRICO Y RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

BOLETÍN AÑO 2019

Dirección Meteorológica de Chile
Subdepartamento de Climatología y Meteorología Aplicada





Índice

	Pág.
1. Resumen.....	3
2. Introducción.....	4-5
3. Monitoreo del agujero de ozono antártico.....	6-7
4. Consecuencias del agotamiento del ozono en la radiación UV.....	8
5. Observaciones generales.....	9
6. Anexo.....	10
7. Referencias.....	10

¿Cómo comunicarte con nosotros?

Sitio web: www.meteochile.gob.cl/climatologia Correo: servicios_climatologicos@meteochoile.cl

Información importante

Los datos usados para este boletín son provenientes de satélites de la NASA. Para mayor información se puede visitar <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>. También, información relevante es obtenida de COPERNICUS. Puedes encontrar mas detalles en <https://atmosphere.copernicus.eu/monitoring-ozone-layer>

Boletín diseñado y elaborado por el meteorólogo Juan Crespo.
Boletín editado por la meteoróloga Solángela Sánchez.

© Dirección Meteorológica de Chile - Dirección General de Aeronáutica Civil
Avenida Portales 3450, Estación Central, Santiago.

1. Resumen

Las condiciones físicas y dinámicas ocurridas durante el año 2019, permitieron que el evento de agujero de ozono 2019 registrara dimensiones mínimas históricas y con un cierre muy anticipado a su ciclo habitual (a comienzos del mes de noviembre).

Los valores de mínimo de columna de ozono (Figura 1) se mantuvieron por debajo el promedio 1979-2019 durante agosto, sin embargo, desde septiembre se presentaron anormalmente altos. Las temperaturas en la estratósfera alcanzaron el umbral de formación de Nubes Estratosféricas Polares (NEPs), tanto para las de Tipo I como de Tipo II, entre junio y agosto oscilaron en torno al valor promedio de 1979-2018.

La corriente en chorro polar, principal factor de aislamiento del aire polar y fortalecimiento del vórtice, desde agosto presentó intensidades por debajo de la media, con valores mínimos históricos entre octubre y noviembre. A su vez, el transporte longitudinal de calor en 100 hPa, entre los 45° y 75° S, fue extremadamente intenso durante septiembre, lo que se tradujo en un vórtice muy débil e inestable.

Debido a lo anterior, entre septiembre y octubre ocurre un inesperado calentamiento, alcanzando valores históricos en este período desde que existen registros, **favoreciendo una disminución del área del agujero y anticipando su cierre**. El valor mínimo llegó a 6 millones de Km² aproximadamente en septiembre, cuando lo normal para la fecha es que sobrepase los 20 millones de Km² (Figura 2 y 3). El **Agujero de Ozono 2019 se consagra entonces como uno de los más pequeños y de precoz cierre de los últimos años**.

Pese a que el Agujero de Ozono Antártico del año 2019 fue débil, pequeño y de corta duración, una incursión en septiembre y otra en noviembre provocaron un aumento de entre 1 y 2 unidades de Índice Ultravioleta en ciudades del sur del país.

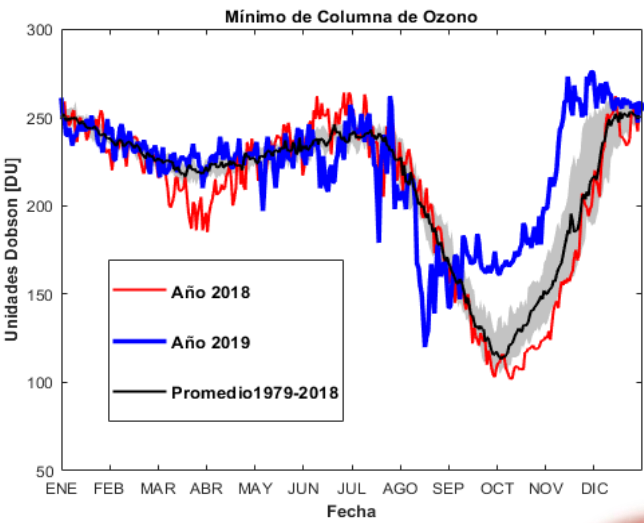


Figura 1. Mínimo de columna de ozono en unidades Dobson (DU). Fuente: NASA.

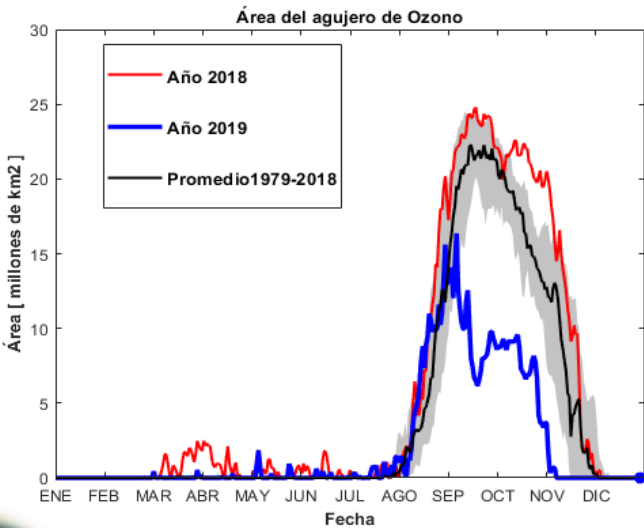


Figura 2. Tamaño del agujero de ozono en millones de km². Fuente: NASA.



Figura 3. Agujero de Ozono el día 15 de septiembre de 2019. Fuente: Programa Copernicus.

2. Introducción

Las observaciones atmosféricas de mediados de la década de 1970, permitieron constatar la disminución primaveral de la capa de Ozono Antártico, denominada en los años siguientes como agujero de la capa de ozono (Figura 4). Las altas concentraciones de clorofluorocarbonos y otros contaminantes atmosféricos agotadores del ozono estratosférico, conocidos como SAOs, fueron los principales responsables de este efecto.

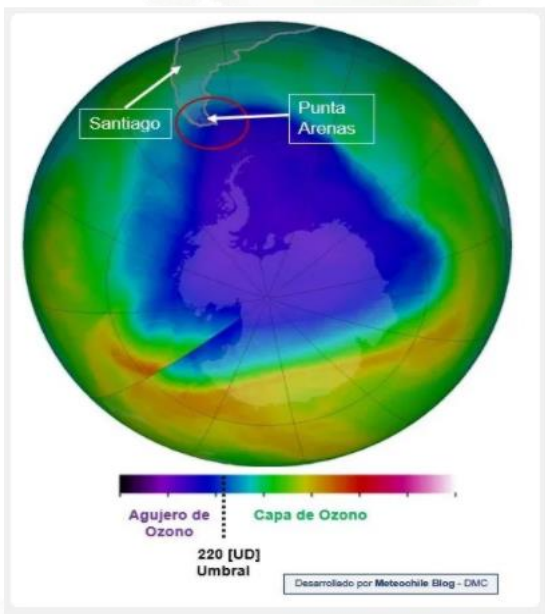


Figura 4. Columna de ozono total. Fuente: NASA.

La pérdida global de ozono estratosférico genera un incremento importante en la incidencia de los Rayos UV y el consiguiente incremento en las afecciones a la piel. En respuesta a este problema, los gobiernos de diferentes países del mundo firmaron en 1987 el Protocolo de Montreal, como un compromiso global basado en normativas para el control del uso de las sustancias químicas nocivas para la capa de ozono. Este acuerdo internacional ha sido exitoso, ya que las medidas aplicadas han permitido avanzar en la recuperación de la capa de Ozono, como se puede constatar en el informe conjunto desarrollado por la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente “Evaluación científica de la disminución del Ozono, año 2014”, donde se prevé una recuperación total alrededor del año 2050.

El protocolo de Montreal ha sido recientemente revisado y modificado en la reunión realizada en Kigali, Ruanda (2016), a través de la llamada “Enmienda de Kigali” que busca reducir los hidrofluorocarbonos (HCFC) al año 2025. Chile ha sido el séptimo país del mundo en ratificar esta enmienda, iniciando su puesta en marcha el 1 de enero de 2019. El presente boletín muestra los resultados de las observaciones realizadas durante el año 2018 por la NASA, el Instituto Real de Meteorología de Holanda (KNMI) y la información de radiación ultravioleta medida por las estaciones Carlos Ibáñez del Campo y Presidente Frei.

Capa de ozono, radiación UV y su interacción

El ozono es un gas inerte, que está presente en forma natural en la atmósfera. Fue descubierto en 1840 por el químico alemán Friedrich Shönbein, por medio de descargas eléctricas en el aire. Su nombre proviene del vocablo griego ὄζειν (ozein), que significa oler. Es de muy baja concentración, solo se pueden observar 3 moléculas de ozono por millón de moléculas de aire.

El ozono posee dos caras, una “buena” y una “mala”. El bueno se concentra en la estratósfera, entre los 10 y los 50 Km, con un máximo alrededor de los 30 km, zona conocida como Capa de Ozono. Esta es responsable de filtrar el 90% de la Radiación Ultravioleta más nociva para la vida en la tierra (Figura 5). El ozono conocido como malo, en tanto, se concentra en la tropósfera, capa atmosférica más cercana a la superficie, representando el 10% restante. A este nivel es un gas tóxico para la salud humana. Se genera esencialmente de la contaminación vehicular.

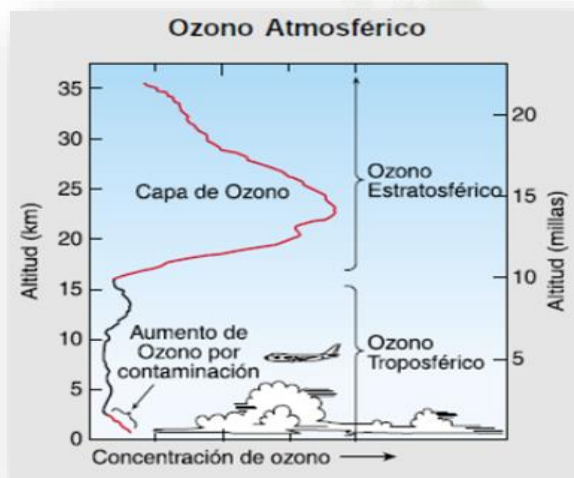


Figura 5. Perfil de ozono atmosférico. Fuente: NOAA.

Formación del ozono

El ozono se forma naturalmente en la estratósfera, a través de una serie de reacciones fotoquímicas en la que los rayos solares ultravioleta rompen la molécula de oxígeno (O₂) para producir 2 átomos de oxígeno (2O). Luego, cada átomo se combina con una molécula de oxígeno para producir una molécula de ozono (O₃) (Figura 6).

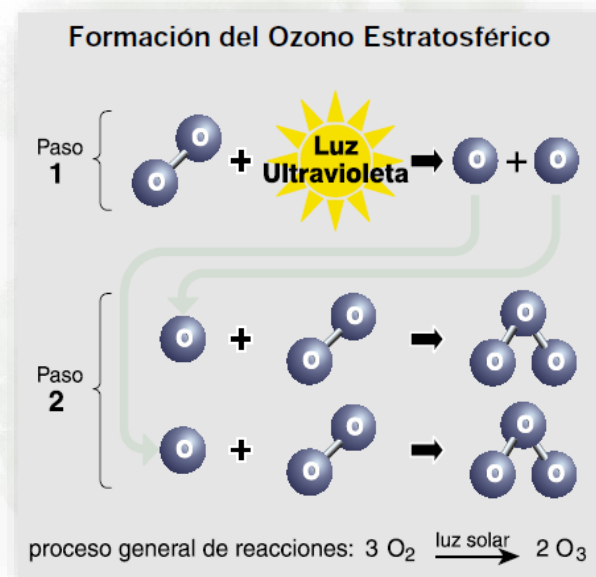


Figura 6. Esquema de formación del ozono atmosférico. Fuente: NOAA.

Estas reacciones se llevan a cabo en forma continua en presencia de radiación ultravioleta; la producción de ozono es balanceada por su destrucción en las mismas reacciones químicas. Este balance está determinado por la cantidad de gases reactivos, compuestos por cloro y bromo principalmente y la efectividad de sus reacciones, que dependen de la intensidad de la radiación solar, ubicación en la atmósfera, temperatura y otros factores. Sin embargo, en la estratósfera existe una gran cantidad de sustancias químicas naturales y generadas por el hombre, principalmente gases compuestos por cloro y bromo, que reaccionan con las moléculas de ozono, destruyéndolas para formar otros compuestos químicos.

Condiciones necesarias para la formación del agujero de ozono

Para que se produzca el agotamiento de la capa de ozono durante la primavera sobre el Polo Sur se necesitan las siguientes condiciones atmosféricas: Presencia de gases halogenados (CFCs, HCFC), aislamiento de la estratósfera polar (vientos intensos alrededor del Polo), bajas temperaturas en la estratósfera (en consecuencia del aislamiento del polo con latitudes mas bajas donde las temperaturas son mas altas) y formación de Nubes Estratosféricas Polares (NEPs, se forman cuando la temperatura baja de los -78° C y son las principales destructoras del ozono (Figura 7).

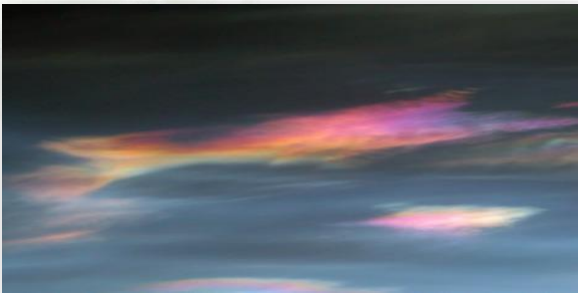


Figura 7. Nubes estratosféricas Polares.

3. Monitoreo del agujero de ozono Antártico.

Temperaturas en la estratósfera

Las temperaturas en la estratósfera polar (Figura 8) superaron su mínimo de invierno a comienzos de septiembre, pero permanecieron por debajo del umbral de -78°C para formación de NEPs* Tipo I sólo hasta fines de septiembre y del Tipo II hasta mediados del mismo mes. En general las temperaturas estuvieron en torno a valores normales hasta agosto. Durante septiembre (ver Anexo) y octubre se registró un repentino calentamiento, permitiendo que los valores se mantuvieran **muy por sobre los valores normales, alcanzando máximos históricos desde que existen registros.**

En noviembre y diciembre esta situación cambió, manteniéndose en torno a valores normales.

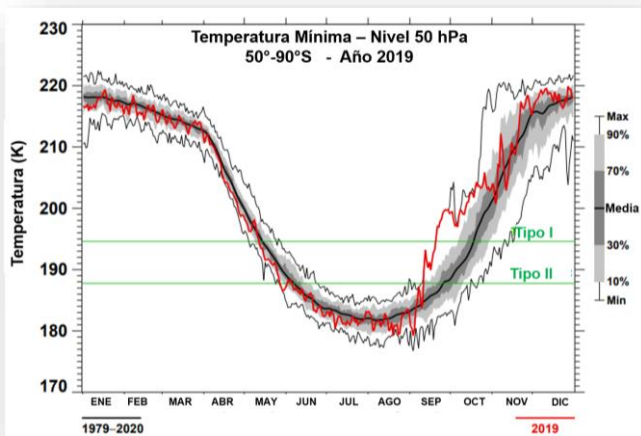


Figura 8. Temperatura mínima registrada entre los 50° y 90°S al nivel de 50 hPa (línea roja). Fuente: NASA-MERRA 2.

Corriente en chorro polar

El continente antártico está rodeado por una fuerte corriente en chorro en la estratósfera (por encima de 12 km o 39.000 pies), que fluye alrededor de la Antártida en el sentido de las agujas del reloj. Esta corriente de chorro aísla el aire sobre la Antártida, del aire en las latitudes medias.

*NEPs: Nubes Estratosféricas Polares

La región polar delimitada por esta corriente en chorro se denomina *vórtice polar antártico*. Un flujo de chorro más intenso produce un mayor aislamiento del aire polar (disminuye la mezcla), razón por la que el aire dentro del vórtice polar antártico es también mucho más frío que el aire de latitudes medias.

Durante el año 2019 (Figura 9) el viento asociado al chorro polar osciló en rangos esperados hasta el mes de julio, pero desde septiembre (ver Anexo) una disminución sostenida en la intensidad **permitió que los registros se mantuvieran por debajo lo normal para la época hasta diciembre,** alcanzando valores históricos en octubre y noviembre desde que se tienen registros.

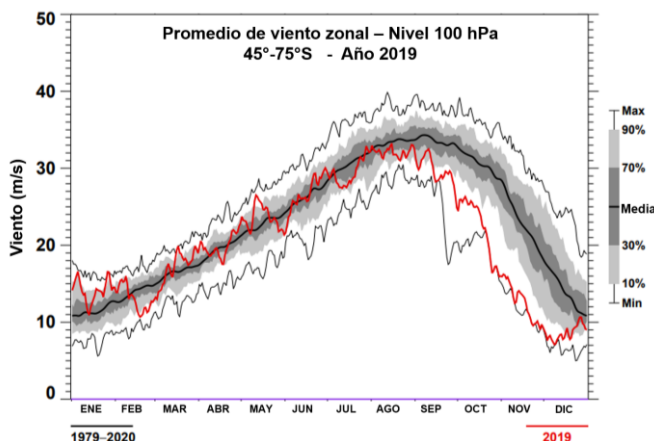


Figura 9. Viento zonal entre los 45° S y 75° S en el nivel de 100 hPa, expresado en m/s. Fuente: NASA

Estabilidad del vórtice polar

El flujo longitudinal medio de calor, entre los 45° S y los 75° S es un indicativo del grado de perturbación de la atmósfera. En la Figura 10, se puede observar que es durante los meses entre octubre y noviembre donde se espera un mayor flujo de calor (valores más negativos); sin embargo, durante el año 2019 ocurrió un desfase, anticipándose el período de máximo flujo entre septiembre y octubre, flujo que además, fue extraordinariamente intenso en septiembre, siendo histórico para la época con un valor de aprox. $-27\text{ K}^{\circ}\text{m/s}$. **Esta situación produjo su gran inestabilidad y debilitamiento.** En general el resto del año el vórtice polar bordeó los valores esperados para su ciclo.

OZONO ESTRATOSFÉRICO Y RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

AÑO 2019

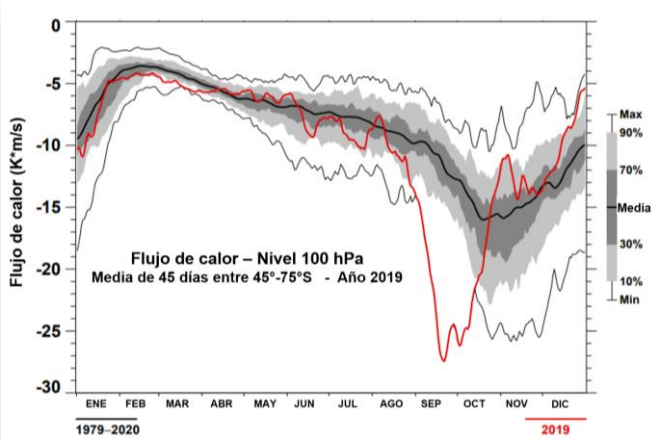


Figura 10. Flujo longitudinal de calor en el nivel de 100 hPa, expresado en K·m/s. Mientras mas negativos los valores, mayor flujo de calor. Fuente: NASA

Déficit de masa de ozono

El déficit de masa de ozono (DMO) corresponde a la cantidad de este gas, en millones de toneladas, que es necesario agregar al agujero para alcanzar el valor umbral de 220 UD. Si bien durante agosto el ciclo de DMO (Figura 11) comenzó con un gran pulso en aumento, fue a comienzos de septiembre cuando una marcada disminución interrumpió su normal ciclo, manteniéndose con valores muy bajos hasta noviembre (siempre valores cercanos al percentil 10). Lo normal es que el DMO alcance aprox. las 26 millones de toneladas, pero durante el año 2019 este valor no superó las 10 millones de toneladas, **consagrándolo como uno de los DMO más bajos desde que hay registros.**

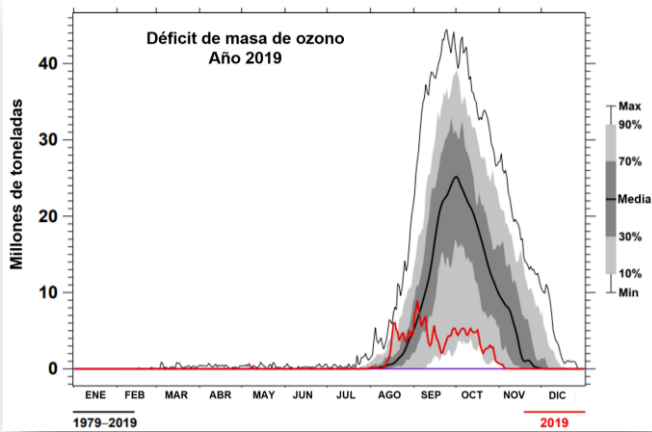


Figura 11. Déficit de masa de ozono, en unidades de millones de toneladas. Fuente: NASA

Área y volumen de NEPs

Desde inicios de septiembre se experimentó una rápida e importante disminución en el área de NEPs del Tipo I al nivel isotrópico de 460 K, llegando a 0 millones de km² antes de terminar el mes. Normalmente este valor se alcanza a mediados de octubre (Figura 12). Los registros de septiembre se posicionaron como **los más bajos alcanzados durante ese período.** El máximo tamaño de NEPs ocurrió en julio con cerca de 27 millones de km².

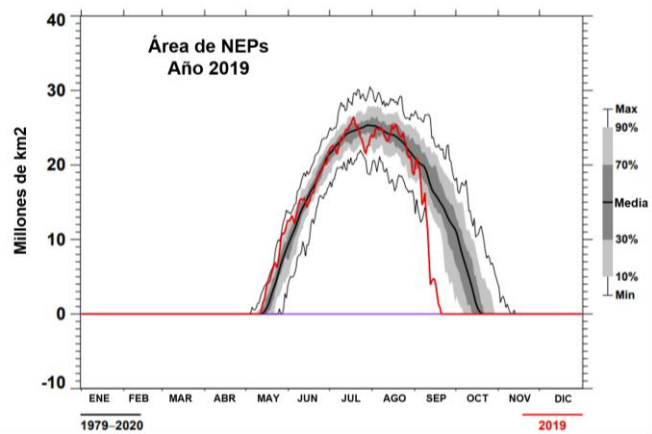


Figura 12. Área de Nubes Estratosféricas Polares Tipo I. Fuente: NASA

Al monitorear el volumen NEPs, se observa que se mantuvo cercano a la media hasta el mes de agosto, disminuyendo a valores por debajo de la media el resto del ciclo. **El volumen máximo se alcanzó el 18 de julio con aproximadamente 315 millones de km³** (Figura 13).

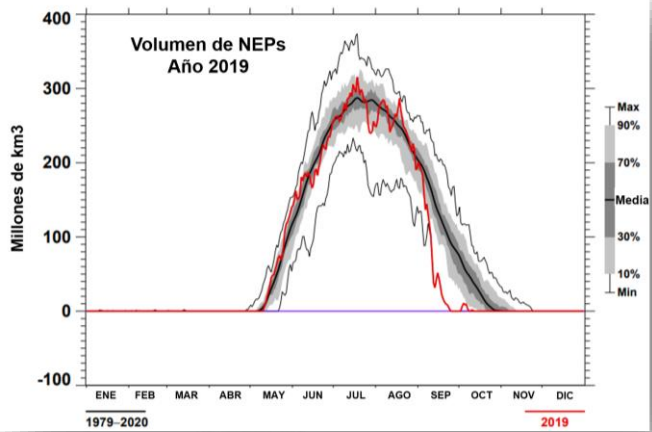


Figura 13. Área de Nubes Estratosféricas Polares, Tipo I. Fuente: NASA

4. Consecuencias del agotamiento del ozono en la radiación UV

La Figura 14 (recuadros color rojo) muestra que durante septiembre una elongación del agujero de ozono observada entre los días 15 y 18, provocó un aumento en los valores de Índice ultravioleta en el sur del país. Esta disminución del ozono generó incrementos del orden de 1 a 2 unidades de Índice UV.

A diferencia del mes de septiembre, la disminución de ozono durante el mes de octubre no tuvo gran impacto en el aumento de los valores de Índice Ultravioleta, los aumentos que se viven en las distintas ciudades del país son más bien asociados a las condiciones naturales para la época, donde los valores de Índice UV aumentaron acorde a la estacionalidad.

Durante el mes de noviembre, la incursión del agujero de ozono los días 9 y 10 al extremo sur del país tuvo un impacto en el aumento de los valores de Índice Ultravioleta en ciudades del sur y extremo sur del país, como Puerto Montt y Punta Arenas (Figura 5, recuadros color azul). A su vez, la disminución de ozono durante noviembre en la Península Antártica, provocó un aumento en el Índice UV de hasta 3 unidades (recuadro color amarillo).

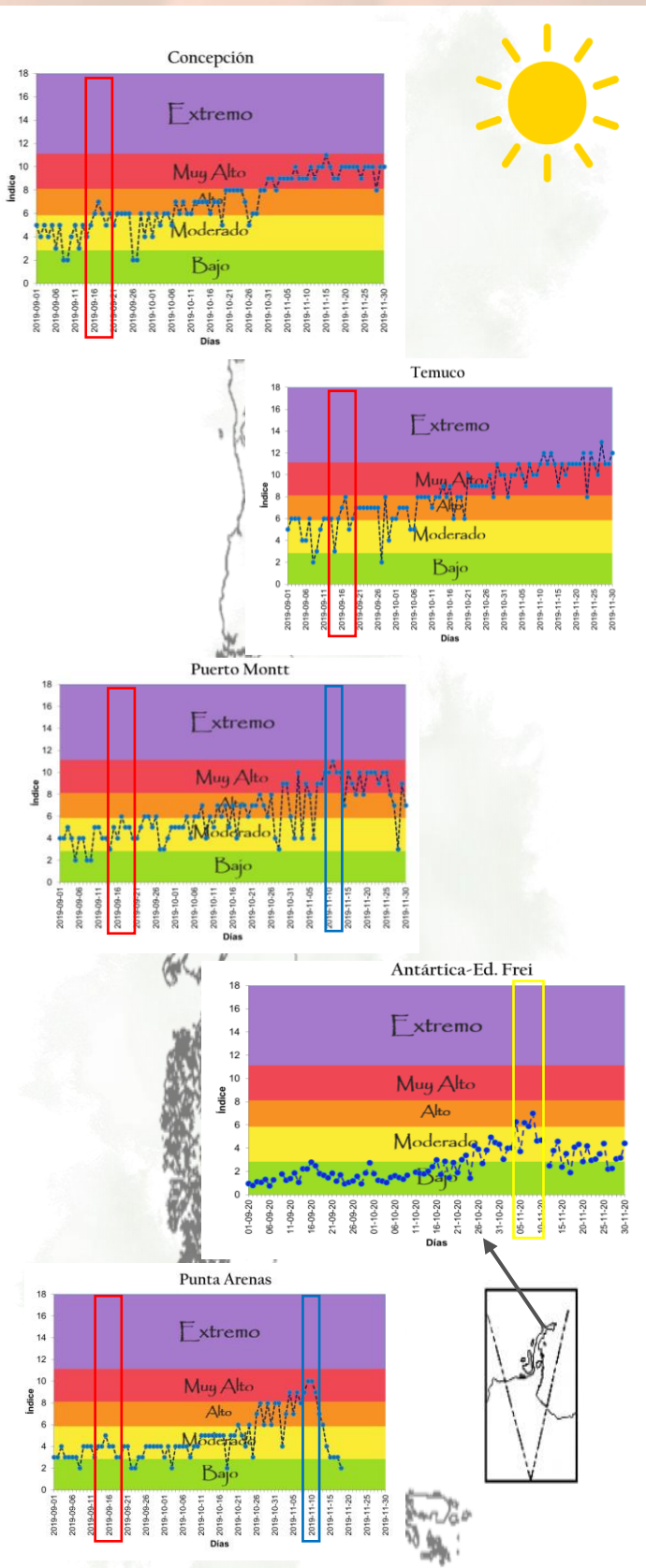
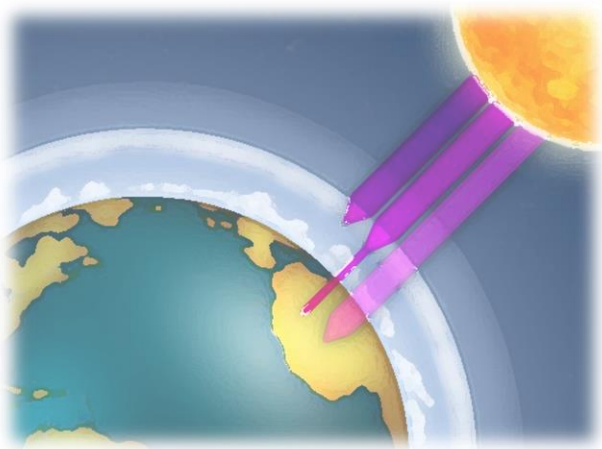


Figura 14. Valores de Índice Ultravioleta durante septiembre a noviembre de 2019 en ciudades del sur del país. Fuente: DMC

5. Observaciones generales

Un inusual calentamiento estratosférico se observó a comienzos de septiembre, el que se denominó Calentamiento Estratosférico Súbito (SSW, por sus siglas en inglés). Las temperaturas estuvieron por sobre los valores normales, incluso registrando valores muy altos en los meses de septiembre y octubre, quedando en los registros históricos. Este calentamiento tuvo gran consecuencia en el ciclo del Agujero de Ozono 2019, permitiendo que su gran desarrollo se detenga, alcanzando un área máxima de sólo 15.6 km² el 1 de septiembre, estableciendo que el año 2019 sea uno de los años con menor crecimiento del Agujero de Ozono de la historia.

La Figura 15 muestra la evolución del agujero 2019, los tonos azules corresponden al área dónde los valores de columna total de ozono están por debajo las 220 DU, umbral que define el área del agujero de ozono.

Entre el 15 y 18 de septiembre y entre el 9 y 10 de noviembre, una elongación del agujero logró posicionarse sobre el sur del país, con algunas consecuencias leves en la radiación ultravioleta. Sin embargo, su débil desarrollo y su rápido y anticipado cierre no permitieron mayores efectos en el país.

Es necesario destacar, que lo que sucedió con el tamaño y el cierre temprano del agujero de ozono, no tiene relación con la tendencia a la recuperación del ozono estratosférico posterior al cumplimiento del Protocolo de Montreal en 1987, sino que es netamente consecuencia del calentamiento atípico de la estratosfera.

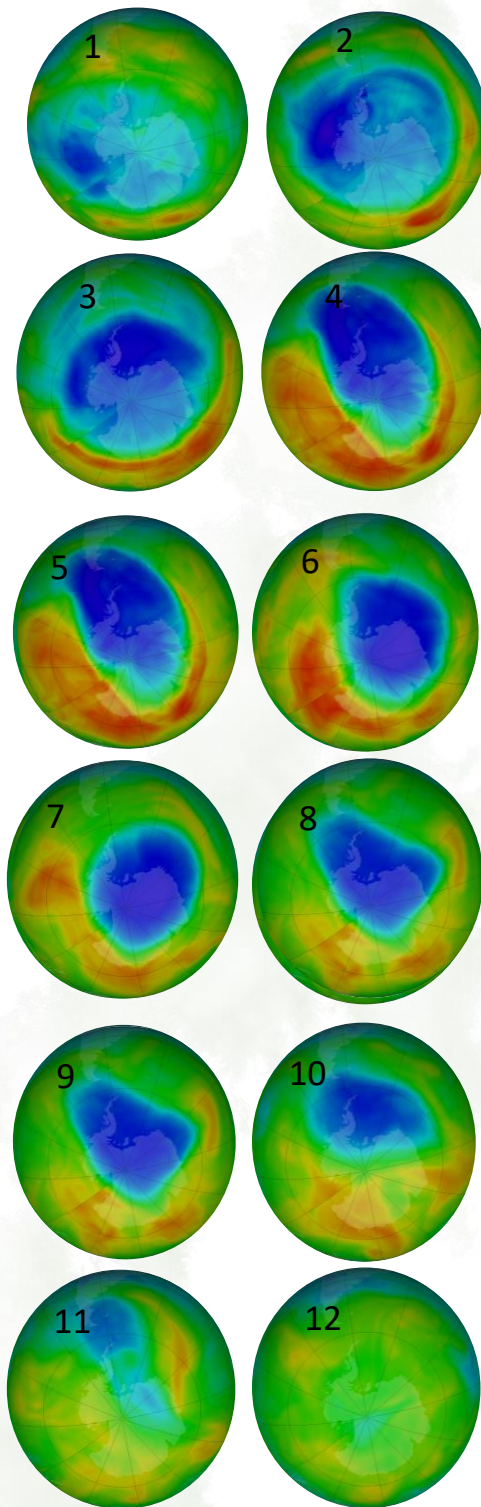
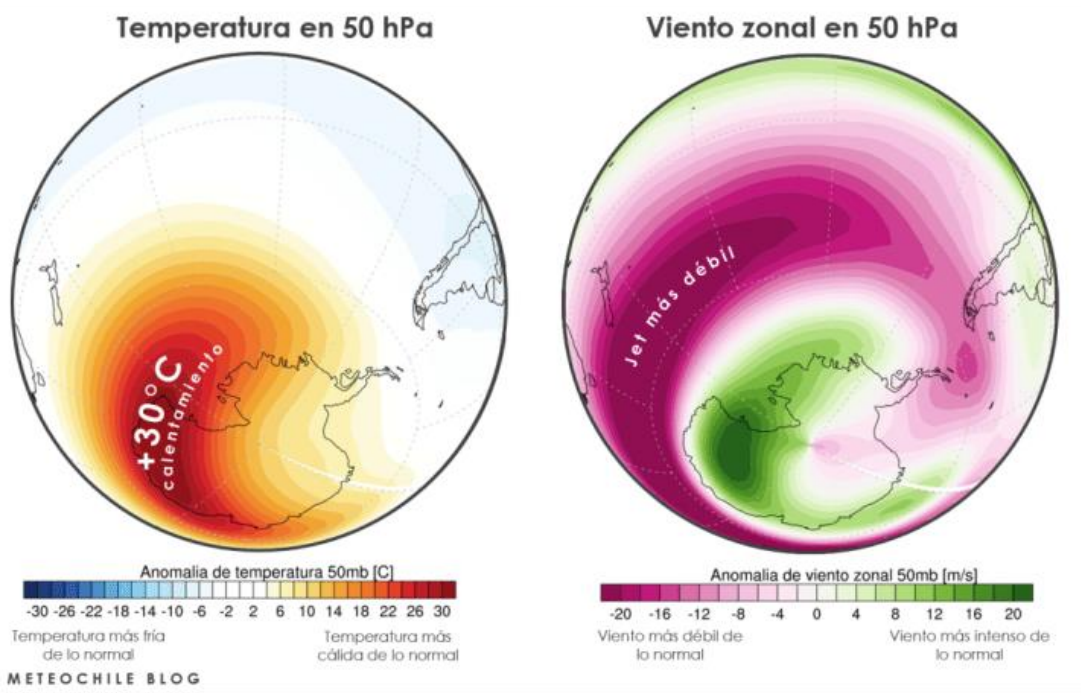


Figura 15. Columna de ozono total para los días 1) 01-agosto, 2) 15-agosto, 3) 30-agosto, 4) 08-septiembre, 5) 15-septiembre, 6) 30-septiembre, 7) 15-octubre, 8) 26-octubre, 9) 27-octubre, 10) 31-noviembre, 11) 10-noviembre y 12) 22-noviembre de 2019. Fuente: NASA.

6. Anexo



Anomalía de temperatura (izquierda) y viento zonal (derecha) a los 50 hPa (18 km de altura aproximadamente) con datos del mes de septiembre de 2019 obtenidos desde reanálisis NCEP/NCAR. Fuente: Meteochile Blog.

7. Referencias

- Fahey, D. *Veinte Preguntas y Respuestas sobre la Capa de Ozono*. Documento basado, en la evaluación científica del agotamiento de ozono 2002, NOAA.
- Ozone Hole Watch. National Aeronautics and Space Administration. Goddard Space Flight Center <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/meteorology/>
- <https://atmosphere.copernicus.eu/monitoring-ozone-layer>
- Red Radiométrica DMC. Datos de Índice UV.
- Total Ozone Mapping Spectrometer-Earth Probe (TOMS-EP), NASA. Datos de columna de ozono diarios.
- <https://blog.meteochile.gob.cl/>