

Abril 2023
vol. 04

**BOLETÍN MENSUAL
VIGILANCIA DEL OZONO
ATMOSFÉRICO EN EL
OBSERVATORIO DE
VIGILANCIA ATMOSFÉRICA
MARCAPOMACocha**



Introducción

La capa de ozono se encuentra dentro de la atmósfera terrestre y tiene la función de ser una capa protectora que preserva la vida del planeta Tierra, haciendo las veces de escudo contra la radiación proveniente del sol llamado UV o radiación ultravioleta, absorbiendo gran parte de ella. Se encuentra a una distancia de la superficie de la tierra de 15 a 50 kilómetros de altura en mayor concentración, aunque cercano al suelo también está presente.

Debido a los productos generados por los humanos y llamados halocarbonos, la disminución en la concentración de ozono se ha acelerado, en los últimos 30 años, en comparación a su ritmo natural. Esto provoca el adelgazamiento de la capa y la generación de los mal denominados agujeros de ozono, con lo cual la tierra pierde protección contra la radiación solar. El paso de la radiación solar más intenso provoca en la vida humana enfermedades como el cáncer a la piel o las cataratas en los ojos, así como la reducción del sistema inmunológico.

Debido a estos procesos que ocurren en la atmósfera el Perú, como país miembro del Protocolo de Montreal, viene reduciendo poco a poco el consumo de los productos químicos que destruyen la capa de ozono y además por intermedio del SENAMHI viene monitoreando el estado de la capa de ozono en la región central del país con la finalidad de alertar a la comunidad científica nacional e internacional sobre su variabilidad temporal y posible deterioro así como su relación con los cambios climáticos que se vienen registrando en el mundo.

.....

ANTECEDENTES

El SENAMHI cuenta con el Observatorio de Vigilancia Atmosférica (OVA) Marcapomacocha, ubicada en la sierra central del país (provincia de Yauli y departamento de Junín), asimismo, se encuentra a una altitud de 4,479 metros sobre el nivel del mar, a una latitud de 11°24'18"S y longitud de 76°19'31"O. Es una de las pocas estaciones a nivel mundial cercanas a la línea ecuatorial y en un medio natural megadiverso. A nivel sudamericano conjuntamente con las estaciones VAG de Natal (Brasil) y Chacaltaya (Bolivia) son las que reportan información continua de las propiedades físicas y químicas de la atmósfera en esta parte del continente.

Las actividades del OVA Marcapomacocha se enmarcan en las mediciones de la concentración de ozono total atmosférico en forma diaria realizadas con el Espectrofotómetro Dobson el cual contribuye con el Programa de Vigilancia de la Atmósfera Global - VAG de la Organización Meteorológica Mundial - OMM. Otras variables como la radiación ultravioleta, radiación solar global y parámetros meteorológicos también se vienen midiendo en dicho observatorio.

Con las mediciones realizadas desde 1964 en el Perú, se ha podido conocer el estado y evolución del espesor de la capa de ozono sobre el territorio peruano y en general sobre la porción de la atmósfera tropical sobre el continente sudamericano.

En el futuro el OVA Marcapomacocha también podrá realizar mediciones de dióxido de carbono (CO₂) (gas de efecto invernadero) y carbono negro (hollín).

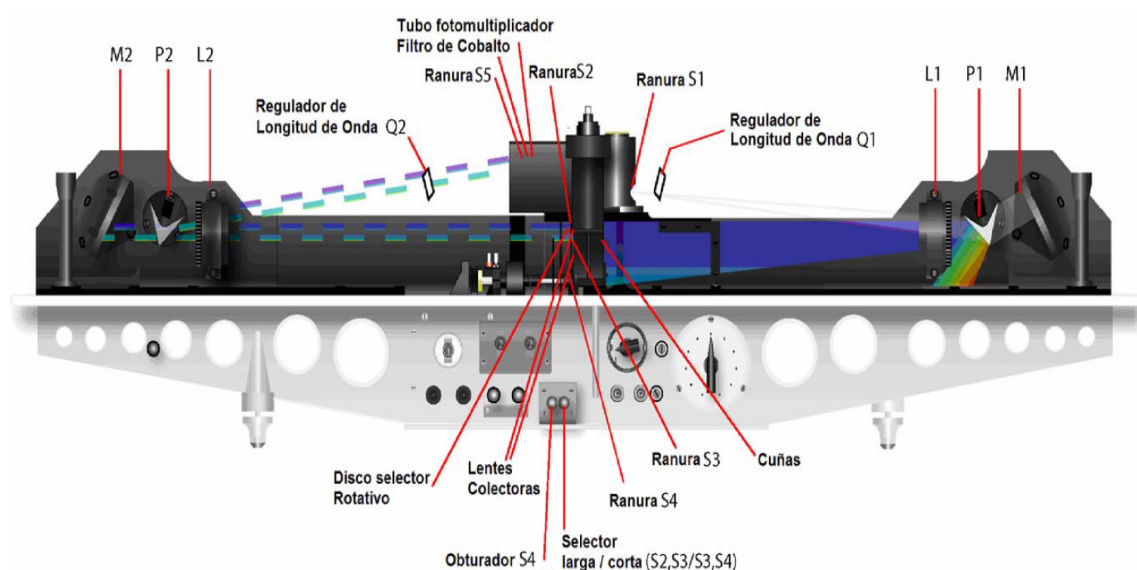
I.- CÁLCULO DEL OZONO ATMOSFÉRICO Y FUNCIONAMIENTO DEL ESPECTROFOTÓMETRO DOBSON

1.- MEDICION EN SUPERFICIE

El instrumento que permite medir las concentraciones de ozono total atmosférico se denomina Espectrofotómetro Dobson. Aunque las mediciones se realizan en forma indirecta porque lo que se mide son las intensidades relativas, de un par de longitudes de ondas (LDO), seleccionadas de antemano, siendo estas generadas y emanadas por el Sol o simplemente por el Zenith del cielo.

Su funcionamiento se basa en que la luz ingresa al instrumento a través de una ventana que se encuentra en la parte superior del mismo y después de su reflexión en un prisma incide en una ranura S1 (Figura 1) la cual consiste en un lente de cuarzo que hace que la luz sea paralela, un prisma que descompone la luz y un espejo que refleja la luz haciéndola volver al prisma y las lentes de tal manera que forma un espectro en el plano focal del instrumento. Las longitudes de onda que están involucradas se aíslan por medio de las ranuras S2, S3 y S4.

FIGURA N° 1
Funcionamiento del Espectrofotómetro Dobson



En la base o parte inferior del espectrofotómetro se encuentran dos palancas de obturación. La palanca S4 que se encuentra a la izquierda, se utiliza solamente cuando se realizan las pruebas, test o calibraciones al espectrofotómetro y deben ser introducidas en el instrumento, cuando se realicen las mediciones de ozono.

La selección de las longitudes de onda A, B, C o D cuando se efectúen las medidas de ozono se logra rotando las palancas a las posiciones Q1 y Q2 de acuerdo a la tabla Q propia del instrumento.

La cuña óptica se encuentra dentro del instrumento frente a la ranura S3. La posición de la cuña óptica se controla a través de un disco graduado que se encuentra en la parte superior del instrumento.

En cualquier posición del disco, la intensidad de la luz que pasa a través de la cuña óptica se reduce, la cual es determinada durante la calibración del instrumento.

Las intensidades relativas de las dos longitudes de onda en las cuales se efectúan las observaciones pueden obtenerse a partir de la lectura de la posición de equilibrio del disco y las tablas de calibración provistas con el instrumento.

2.- MEDICION DESDE SATÉLITE

Uno de los satélites que mide en forma continua la concentración de ozono es el satélite AURA el cual dispone de cuatro instrumentos para la medición de la tropósfera superior, estratósfera y mesósfera. El instrumento de monitoreo de ozono (OMI) continúa los 34 años de observación del ozono que comenzaron con el detector ultravioleta de retrodispersión (Backscatter Ultraviolet Detector, BUV) en 1970 y el espectrómetro de representación de la distribución de ozono total (Total Ozone Mapping Spectrometer, TOMS), en 1978. El OMI mide la luz solar reflejada y retrodispersada en las porciones ultravioleta y visible del espectro. Las capacidades hiperspectrales del instrumento (recopilación y procesamiento de la información a lo largo de todo el espectro electromagnético) mejoran la precisión y exactitud de las cantidades de ozono total.

II.-RESULTADOS.

Cabe mencionar que el mes de abril ha presentado características térmicas menores al mes pasado, debido a factores de circulación atmosférica en el hemisferio austral, como producto del establecimiento de la estación astronómica de otoño. Los sistemas atmosféricos, a nivel de alta tropósfera, que gobiernan el tiempo sobre nuestro país, como la Alta de Bolivia y la Zona de Convergencia Intertropical, se van desplazando hacia el norte para dar paso a otros sistemas característicos de la temporada. Cabe resaltar que en la región norte del país se han registrado aún procesos convectivos ocasionados principalmente por el sobrecalentamiento del agua de mar afectando también a la costa central. Algunos de estos procesos pueden tener incidencia en las propiedades físicas de la alta tropósfera y baja estratósfera.

Un parámetro que conviene resaltar y que influye en el comportamiento del ozono es la denominada Oscilación Quasi Bienal (QBO siglas en inglés) el cual domina la variabilidad de la estratósfera ecuatorial (16 - 50 km) y fácilmente puede verse como regímenes de vientos del este y del oeste que se propagan hacia abajo, con un periodo variable que puede estar entre los 28 meses. Su estudio es inseparable de los movimientos de las ondas atmosféricas que lo impulsan y modulan. Los efectos de la QBO no se limitan a la dinámica atmosférica. Los componentes químicos como el ozono, vapor de agua, óxido nitroso, ácido clorhídrico y el metano, se ven afectados por los cambios de circulación inducidos por la QBO (mezcla de ozono estratosférico por la circulación secundaria).

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, es importante tener en cuenta que esos regímenes de circulación, así como el establecimiento de la estación de otoño interactúan entre sí en las diferentes capas de la atmósfera. Siendo así, se analiza la capa de 70 hPa dado de que es representativa de la baja estratósfera. En ella se ha podido observar, según el Modelo GFS, que los flujos de aire han sido muy variables. Si bien es cierto, se han registrado vientos del oeste en un porcentaje bajo, también es cierto que en ocasiones los vientos del este tuvieron presencia. En la mayor parte del mes, los vientos no tuvieron un comportamiento característico debido probablemente al reacomodo paulatino de sistemas atmosféricos por el cambio de estación. Los vientos del norte fueron inhibidos en este periodo. Esta variabilidad en los flujos de viento permitieron que las concentraciones de ozono disminuyan dado de que no se encontró sistema alguno que pueda alimentar de este gas hacia latitudes tropicales, especialmente sobre nuestro país. A esto hay que agregar que el potencial de reacciones fotoquímicas también empieza a disminuir por efecto de la estacionalidad en el hemisferio sur. Durante el mes, los sistemas anticiclónicos sobre América del Sur casi no se registraron, permitiendo que los flujos sean bastante aleatorios en el tiempo. La no

.....

presencia de sistemas anticiclónicos sumó para que en este mes, se registren concentraciones de ozono atmosférico menores al mes pasado. Figura 2.

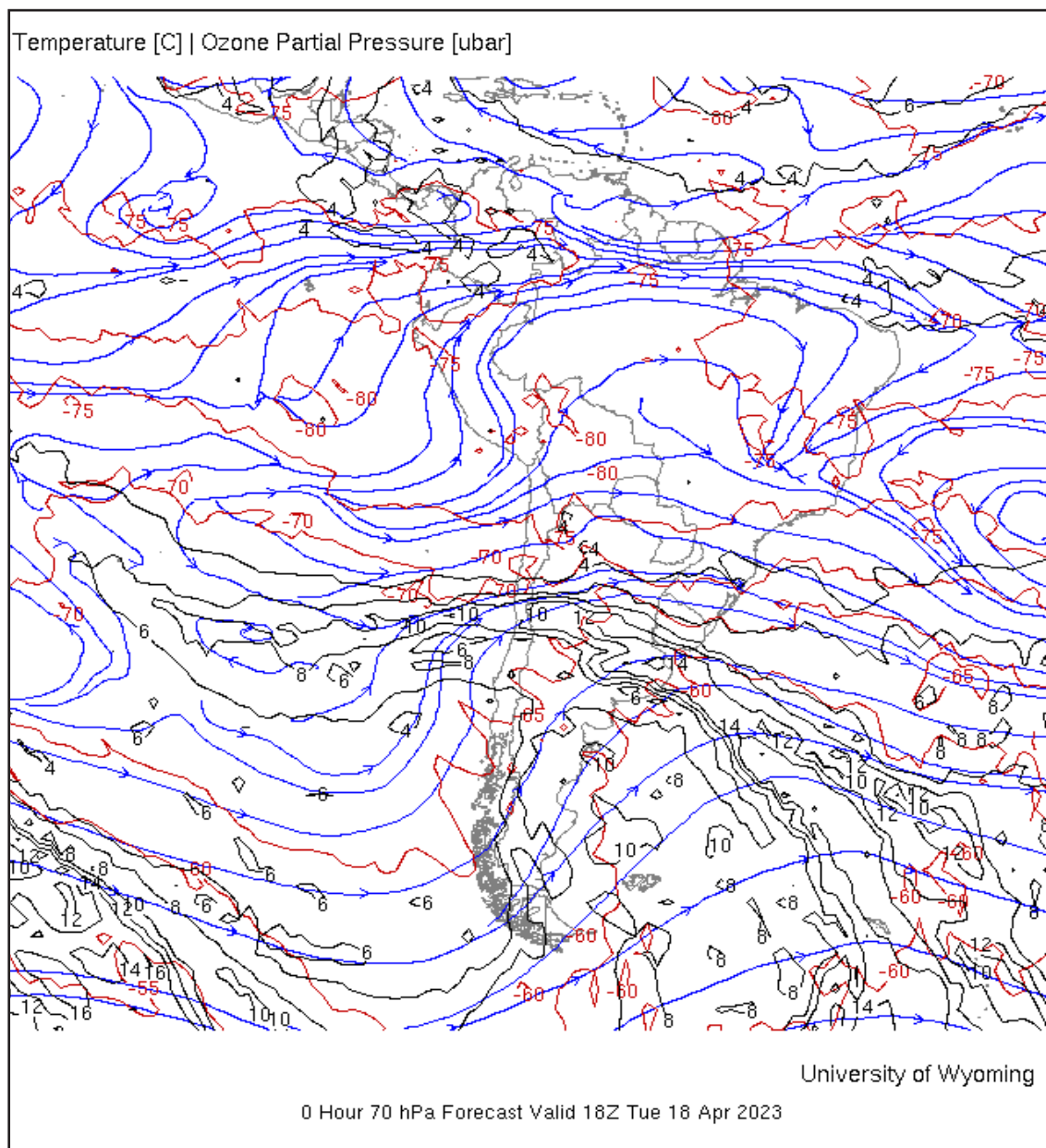
Con el fin de reforzar lo descrito a nivel de baja estratósfera, podemos mencionar que, de la vigilancia realizada en el mes de abril a nivel de superficie, en el OVA Marcapomacocha se observó que el comportamiento horario de la concentración de ozono atmosférico en general, estuvo oscilando entre 237.3 UD y 248.5 UD (UD = Unidades Dobson), valores inferiores a lo registrado en el mes anterior.

Se debe señalar que en las primeras horas del día las concentraciones de ozono son relativamente altas debido a la nula actividad fotoquímica durante la noche y a medida que transcurren las horas hasta llegar al mediodía los valores empiezan a disminuir para luego en horas de la tarde volver a incrementarse. A veces el comportamiento es algo variable tanto en la mañana como en la tarde, pero siempre con la misma tendencia (disminuye y luego aumenta).

Este proceso físico, se enmarca en que durante las mañanas la incidencia de la radiación ultravioleta es baja, por ende las concentraciones de ozono son relativamente altas (debido al ozono residual), a medida que la intensidad de la radiación ultravioleta se incrementa en forma paulatina hacia el mediodía, donde los valores son altos (en los meses de primavera y verano son mayores), permite una reducción del ozono y en horas de la tarde a medida que el sol va llegando al ocaso (disminución de la intensidad de la radiación solar) las concentraciones de ozono vuelven a incrementarse. Este comportamiento horario también va a depender de otros factores como los ambientales (efectos residuales de ozono del día anterior a nivel de tropósfera) y meteorológicos (transporte de ozono de y hacia otras latitudes). Un punto importante a remarcar es el proceso de formación y destrucción del ozono por efectos fotoquímicos, mientras que la intensidad de la radiación solar se incrementa, dicha actividad será mayor y viceversa. En el periodo analizado, la intensidad de la radiación ultravioleta ha continuado registrando una disminución en forma ligera con respecto al mes anterior, en ese sentido las reacciones fotoquímicas han sido menores al mes anterior con una tendencia a continuar disminuyendo permitiendo que las concentraciones de ozono también lo hagan.

FIGURA N° 2

Flujos de masas de aire quasi meridionales



Por otro lado, el comportamiento de la concentración de ozono atmosférico promedio diario mensual multianual (2000-2020) del mes de abril oscila entre 240.9 UD y 245.0 UD aproximadamente (Figura 3), mientras que los medidos en el mes de abril del presente año, oscilaron entre 238.5 UD y 247.2 UD. En la figura se aprecia que los valores registrados en el presente mes, estuvieron un 60% por encima de sus valores climáticos y el otro 40%, por debajo.

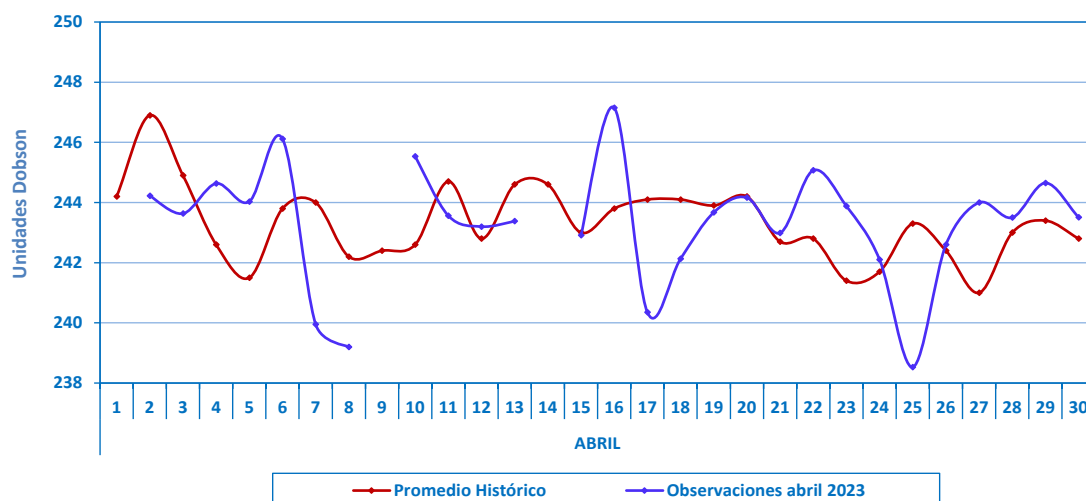
Cuando se comparan ambas series se ha observado un comportamiento algo variable, con valores que en algunos momentos se acercan a sus normales y en otros más bien alejándose (por encima y por debajo), lo cual puede

atribuirse a los procesos tanto físicos como químicos, así como a los cambios en la circulación atmosférica. La tendencia de las concentraciones de ozono sobre nuestro país, con respecto al mes de marzo fue a una ligera disminución a lo largo del mes, debido a factores térmicos, así como de mezcla y de circulación atmosférica aleatoria debido al cambio de estación.

En la estratósfera, la temperatura y las concentraciones de ozono van de la mano, de acuerdo a ello, se puede mencionar que, en el mes de abril, en la baja y alta estratósfera las temperaturas han estado por debajo de sus valores normales (disminuyeron y por ende también el ozono), En la estratósfera media las temperaturas han estado en condiciones neutras.

FIGURA N° 3

Comportamiento temporal de la concentración de ozono atmosférico en el OVA Marcapomacocha. Abril 2023.



Es importante conocer también la variación temporal multianual de la concentración de ozono (climático) y poder relacionarlos con los procesos que generan los diferentes sistemas atmosféricos que gobiernan sobre nuestro país. En el OVA Marcapomacocha se presentan dos picos, uno en el mes de marzo con un valor de 244.5 UD y el otro, mucho mayor, en el mes de setiembre con un valor de 251.3 UD. Por otro lado, los valores bajos de ozono se registran climáticamente en los meses de enero con valores de 242.2 UD y otro entre los meses de mayo y junio con valores de 240.9 UD y 240.8 UD respectivamente. El promedio mensual de ozono en el presente mes fue de 243.3 UD superior en 0.1 UD al promedio mensual multianual (243.2 UD).

Se debe tener presente que, en la región tropical durante los meses del otoño

.....

austral, vale decir abril hasta julio, las concentraciones de ozono disminuyen, por efectos fotoquímicos (cada vez la intensidad de la radiación ultravioleta es menor y su capacidad de formación de ozono también lo es) así como también por efectos térmicos y por la circulación atmosférica en la capa estratosférica (presencia de vientos variables). En cuanto a la circulación de los vientos, a nivel vertical, desde la tropósfera hacia la estratósfera permite el traslado de cantidades de ozono los cuales a lo largo de los meses lo van redistribuyendo hacia latitudes mayores (Circulación Brewer-Dobson), lo cual permite el déficit de ozono atmosférico en latitudes bajas (mucho más en estos meses). Cabe remarcar que esta circulación está conducida por ondas atmosféricas lo cual puede ser acelerada por el cambio climático repercutiendo en la distribución global de las concentraciones de ozono.

Al igual que la información de superficie, lo que proviene de los satélites es muy importante ante la falta de cobertura por parte de los primeros. En ese sentido, al realizar la comparación de los datos de ozono atmosférico provenientes de los satélites AURA (Plataforma OMI) y SUOMI (Plataforma OMPS) con lo registrado en superficie, se observó un desfase entre ellos. Con respecto a la información proveniente del AURA/OMI, durante el 62% de días del mes de abril los valores de ozono diario medidos estuvieron por encima de lo registrado por el Espectrofotómetro Dobson. Para el caso de SUOMI/OMPS, ocurre que durante el 52% de días del mes estuvieron por encima de lo registrado en superficie. Figura 4.

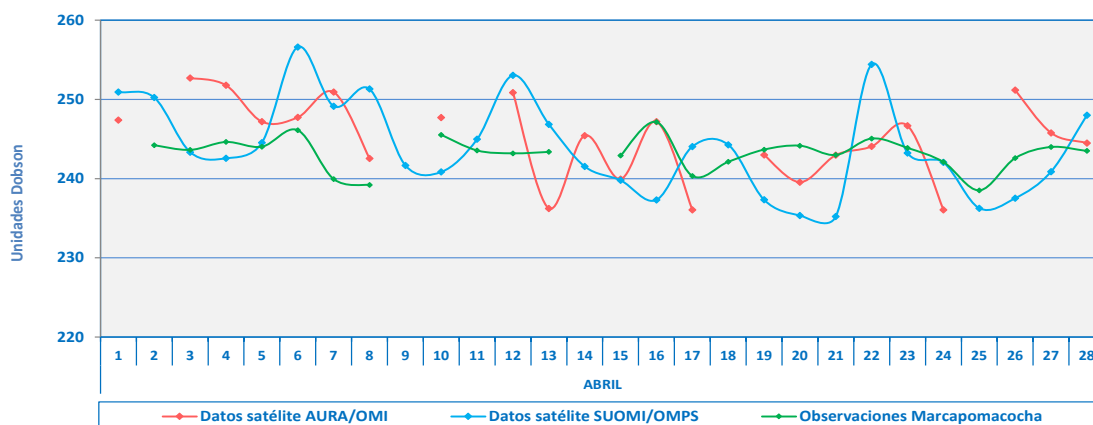
De este análisis podemos decir que la información proveniente de estos dos satélites continua estando mayormente por encima de lo registrado en superficie. Existen días donde las diferencias entre los valores registrados por el satélite y el medido en superficie, son bastante altas en el orden de 1 a 12 UD.

Cabe mencionar, que la tendencia de las concentraciones de ozono medidos en superficie ha sido relativamente estable en el tiempo mientras que los medidos con los satélites, variable.

La tendencia, de acuerdo a la climatología, es que las concentraciones de ozono continúen disminuyendo en el mes de mayo.

FIGURA N° 4

Comparación de información proveniente de los satélites AURA y SUOMI con lo registrado en superficie, en el OVA Marcapomacocha.



Perfil Vertical de Ozono Atmosférico

Debemos saber que el 10% de la concentración de ozono se encuentra en la tropósfera y el otro 90% en la estratósfera. Es importante monitorear el comportamiento vertical de este gas en diferentes niveles de la atmósfera para conocer su variabilidad en el tiempo y poder relacionarlos con posibles cambios en los sistemas atmosféricos característicos de la región. En los últimos 30 años aumentaron, mucho más, las sustancias agotadoras de ozono, así como los gases de efecto invernadero los cuales tienen efecto en el comportamiento del ozono principalmente en la baja estratósfera debido a los efectos de la dinámica atmosférica, así como de las reacciones fotoquímicas.

Según la OMM (Organización Meteorológica Mundial), desde el año 2000 hasta el 2020 se han observado por medio de mediciones del perfil vertical de la atmósfera y el desarrollo de modelos numéricos, una disminución en las concentraciones de ozono (~2% por década) en la estratósfera baja de la región tropical (20°S – 20°N), asimismo en la estratósfera media algo parecido para finalmente en la estratósfera superior un aumento de 2% por década.

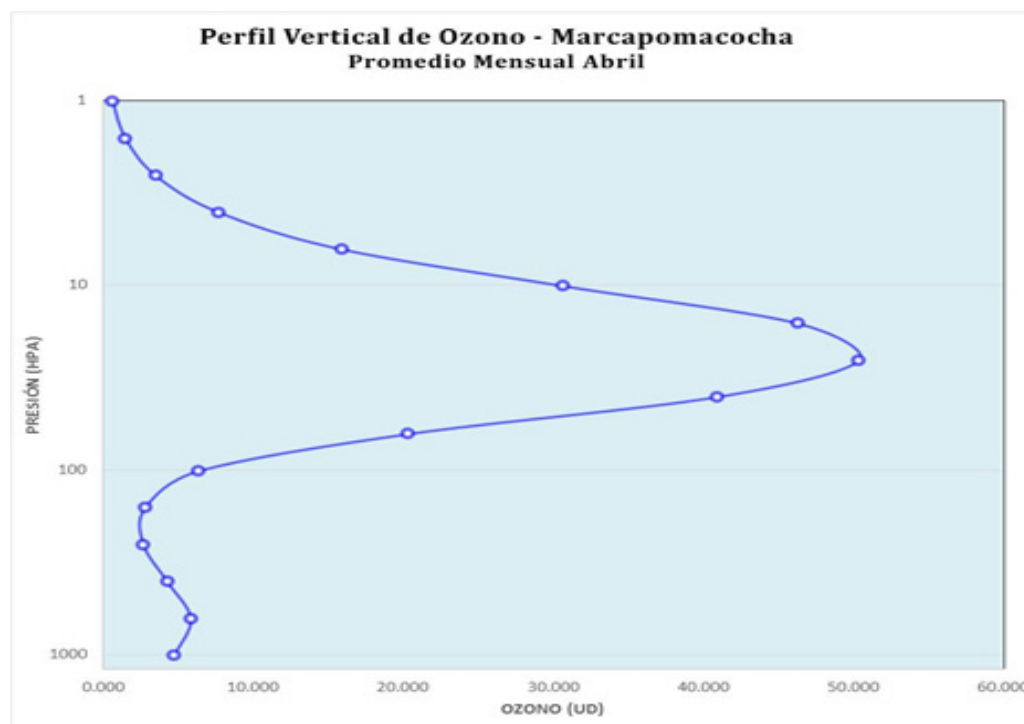
De acuerdo a ello, en la figura 5 se puede observar el comportamiento característico del perfil vertical de ozono para el mes de abril en la estación Marcapomacocha.

A nivel de tropósfera generalmente, las concentraciones de ozono disminuyen con la altura, para luego a nivel de estratósfera sufrir un incremento ostensible debido al incremento de la temperatura. En la estratósfera alta empiezan

a disminuir en forma paulatina. El gráfico presentado es remarcar que las mayores concentraciones de ozono se registran en esta segunda capa de la atmósfera.

FIGURA N° 5

Perfil Vertical de Ozono



Según información de perfil vertical de ozono atmosférico para un día típico del mes de abril (día 12) 2023 obtenida por Metop-C/GOME-2, muestra para el hemisferio norte concentraciones altas con valores superiores a 35 UD entre la baja y media estratósfera (el área de cobertura de estas concentraciones altas, disminuyó con respecto al mes pasado). Cabe mencionar que dicho hemisferio se encuentra en la estación de primavera, registrándose aún concentraciones altas de ozono, pero como se dijo anteriormente, con menor cobertura de área. En la región tropical (latitudes bajas) las concentraciones de ozono son bajas con respecto a marzo, pero siempre en la estratósfera media, todo ello debido a circulaciones regionales (Brewer-Dobson) y al efecto térmico. La altura de las concentraciones relativamente altas (18 UD a 23 UD) de ozono en latitudes bajas (en ambos hemisferios), continua registrándose entre los 40 hPa y 10 hPa, mientras que, en latitudes altas del hemisferio sur, la altura de las concentraciones altas se dio entre los 70 hPa y 20 hPa.

Para el caso de nuestro país, concentraciones altas han continuado registrándose entre los 40 hPa y 20 hPa con valores entre 15 UD y 23 UD (inferiores al mes pasado).

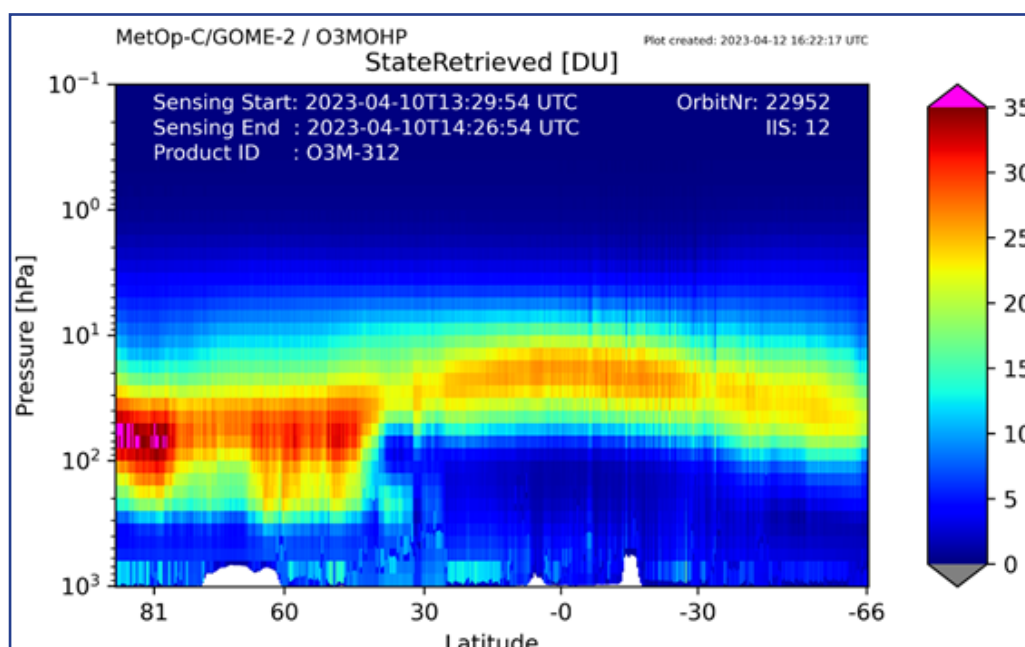
En los primeros niveles de la atmósfera (tropósfera) las concentraciones de ozono son bajas (oscilan, generalmente, entre 1 UD y 10 UD), esto se debe a los efectos residuales de la formación del ozono del día anterior, así como también a otros procesos.

Debe considerarse que la forma que adquiere la distribución vertical es típica en la atmósfera, sabiendo que las concentraciones pueden variar de acuerdo a la latitud, estación astronómica, condiciones meteorológicas, así como al efecto que tienen los gases de efecto invernadero, especialmente en la estratósfera baja. Figura 6

En latitudes medias y altas del hemisferio norte (40°N - 80°N), continúan observándose concentraciones de ozono altos (28 UD a 38 UD) comparados a los de latitudes bajas (debido a procesos de circulación atmosférica), con la diferencia de que la altura de esas mayores concentraciones, se encuentran más bajas, (200 hPa a 30 hPa) características que son debidas principalmente a la baja densidad del aire en esa parte de la atmósfera como producto de las bajas temperaturas.

FIGURA N° 6

Perfil Vertical de Ozono según GOME-2



RELACIÓN DE MEZCLA DEL OZONO

Para entender mejor la variabilidad en las concentraciones de ozono es importante considerar la cantidad de mezcla de este gas que pueda existir en capas altas de la atmósfera. El término relación de mezcla permite conocer la cantidad o masa de las moléculas de ozono contenido en el aire medido en gramos de ozono por kilogramo de aire seco (g/kg). Otras definiciones permiten considerar también el término kg/kg.

Esta variable está influenciada por la circulación de las masas de aire los cuales pueden transportar concentraciones altas o bajas de ozono a las regiones en capas entre la baja y media estratósfera.

Según la información obtenida por el Análisis Retrospectivo de la Era Moderna para Investigación y Aplicaciones, versión 2 (MERRA-2 por sus siglas en inglés) es un análisis atmosférico global nuevo producido por la NASA. El objetivo de este análisis es proporcionar un registro detallado de la atmósfera global e incorporar aspectos adicionales del sistema climático como el ozono.

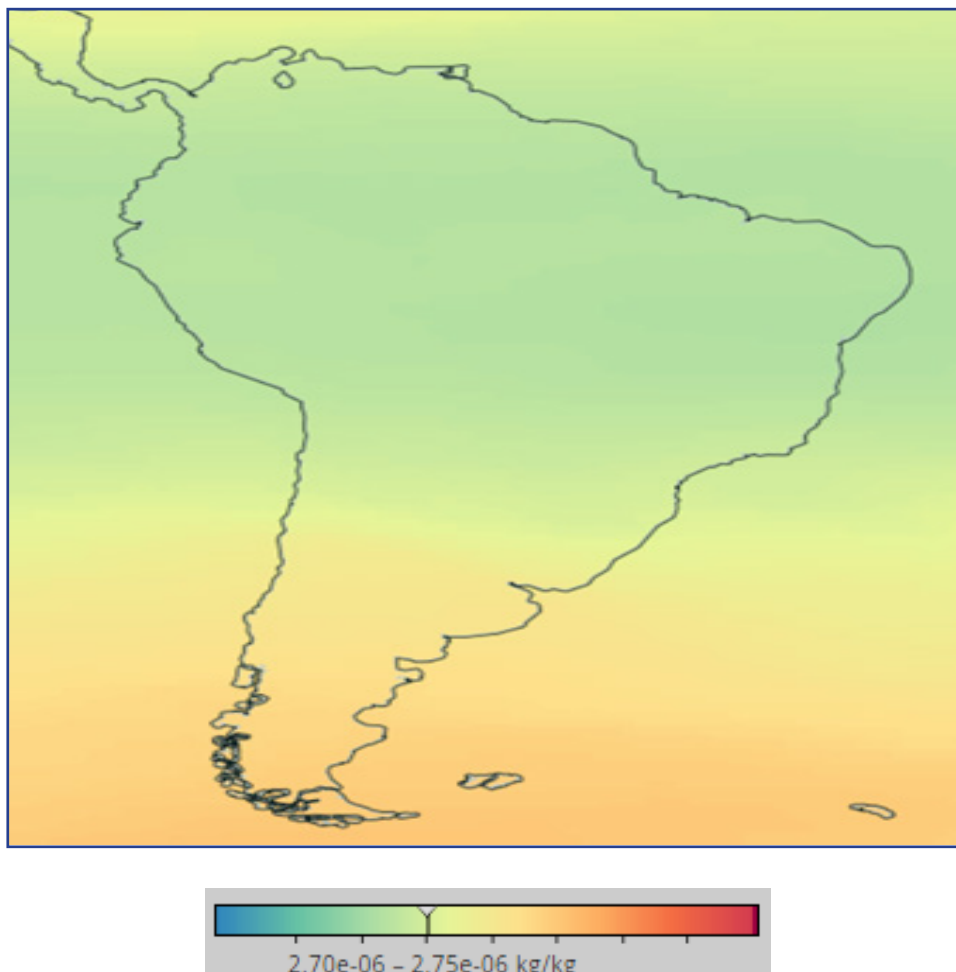
Para el análisis, se considera el nivel de 50 hPa como una capa intermedia entre la baja y media estratósfera.

La figura 7 muestra el comportamiento mensual (abril) de la relación de mezcla de ozono para Sudamérica. Para el caso específico de Perú se observan valores entre 2.20×10^{-6} a 2.30×10^{-6} kg/kg. Los valores de mezcla son bajos que los obtenidos en el mes pasado, dándonos a entender que al disminuir la mezcla haya una menor concentración de ozono sobre nuestras latitudes, debido al efecto térmico así como la variabilidad de la circulación de los vientos en niveles bajos de la estratósfera.

En latitudes medias las relaciones de mezcla también disminuyen con valores de 3.20×10^{-6} a 3.90×10^{-6} kg/kg debido a cambios en la circulación atmosférica (efectos de la circulación Brewer-Dobson).

FIGURA N° 7

Relación de Mezcla de Ozono a 50 hPa. Abril 2023 (MERRA-2)



VAPOR DE AGUA

La estratósfera es una capa relativamente seca comparada con la tropósfera, solo se ha podido registrar que, en la capa baja de la misma, hay poca humedad.

Se vuelve a recalcar, que durante los días 13 y 15 de enero de 2022, se registró una erupción volcánica en el mar del Pacífico Sur, emitiendo grandes cantidades de aerosoles a la atmósfera. Tanta fue la potencia de la erupción que llegó hasta alturas que sobrepasaron la estratopausa, inyectando partículas y gases como el SO_2 (dióxido de azufre), HCl (cloruro de hidrógeno o ácido clorhídrico) y vapor de agua. Es bastante probable que sus efectos se vean con el transcurrir de los meses.

Tanto el vapor de agua como los aerosoles permiten la reflexión de la radiación

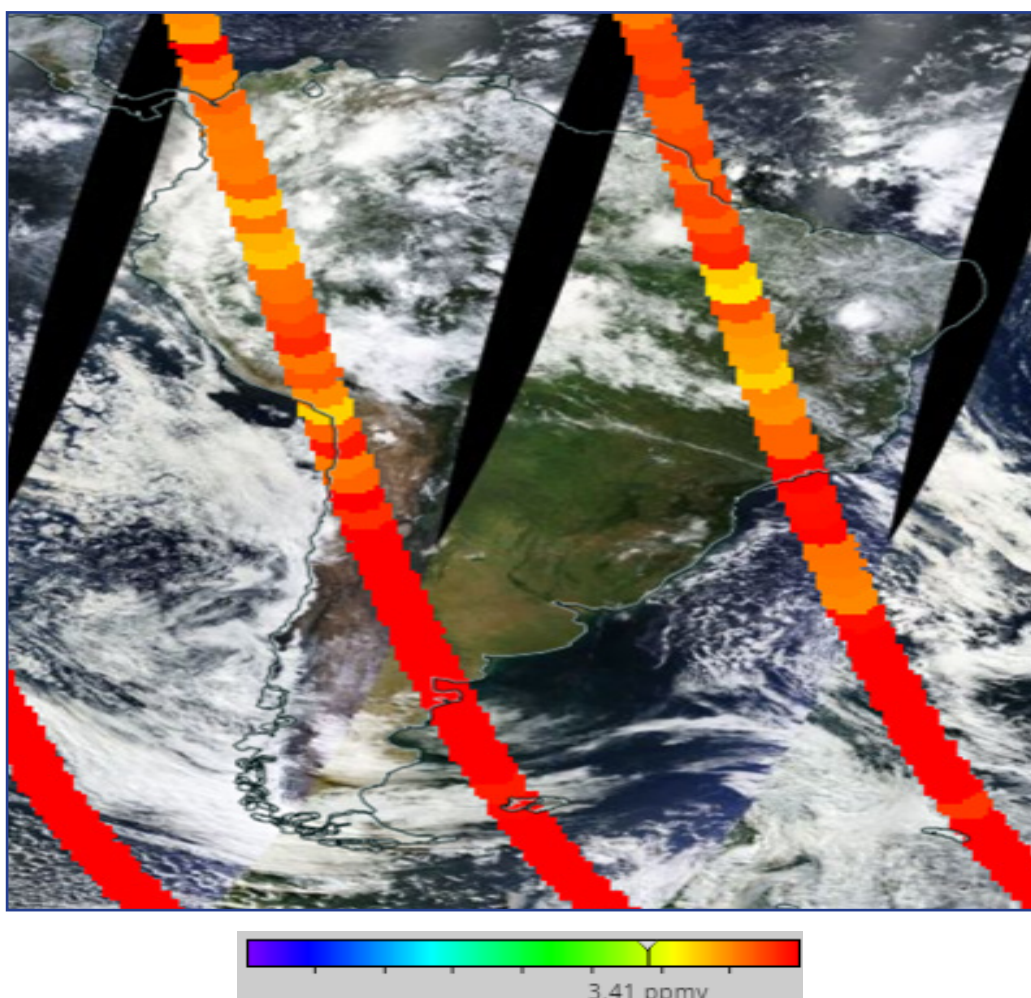
solar directa al espacio, si estos existieran en cantidades considerables permitiría un enfriamiento en la superficie de la tierra.

El vapor de agua genera calentamiento en la estratósfera y esto permitiría un cambio en las concentraciones de ozono y por ende su impacto a nivel de tropósfera.

En la figura 9 se observa un mapa con concentraciones de vapor de agua a nivel de 46 hPa (límite entre la estratósfera baja y media) para un día típico del mes (20 abril 2023). En ella se observa sobre Perú, concentraciones de vapor de agua relativamente bajas en el sur del país con valores de 3.78 ppmv, mientras que en la sierra central valores entre 4.20 ppmv y 4.30 ppmv. En el lado oriental norte, concentraciones entre 4.40 ppmv y 4.60 ppmv. En la región central y norte se registraron las mayores concentraciones de vapor de agua debido al sobrecalentamiento del agua de mar afectando a Perú y Ecuador.

FIGURA N° 8

Vapor de Agua a 46 hPa

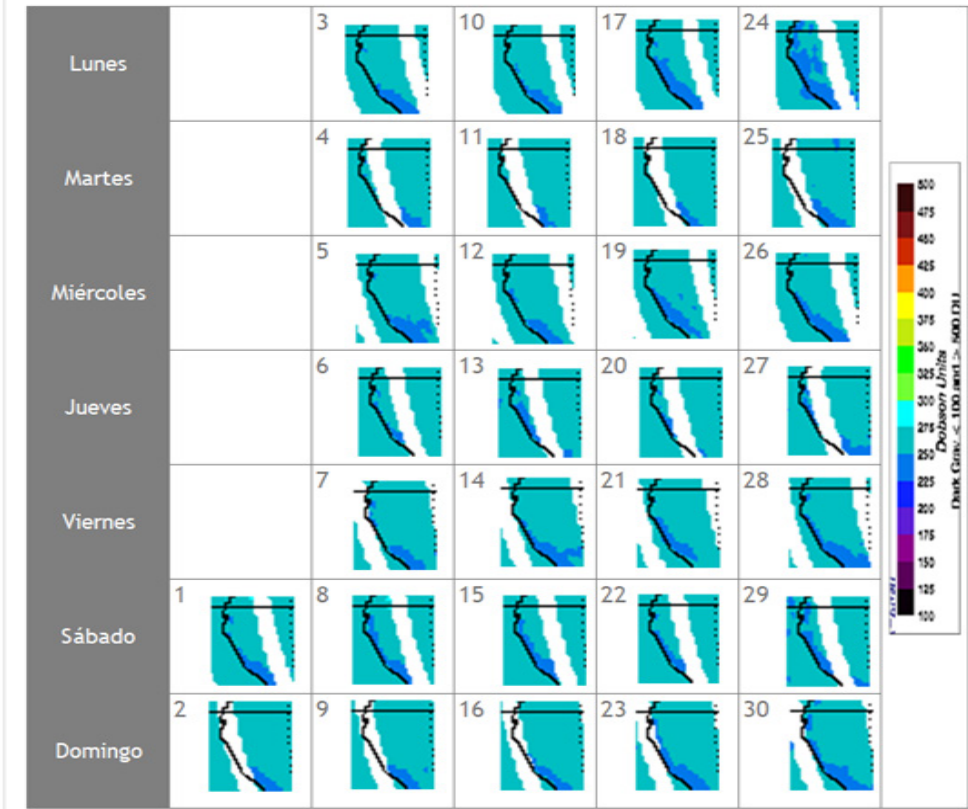


COMPORTAMIENTO TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE OZONO SOBRE EL PERÚ

En cuanto al análisis de los mapas en forma diaria provenientes de la plataforma OMI del satélite AURA de la National Aeronautics and Space Administration – NASA (Figura 8), podemos mencionar que, para el caso de nuestro país, las concentraciones de ozono atmosférico, que muestra el mapa, fueron ligeramente menores comparados al mes anterior, especialmente en la región central y sur del país. En todo el mes las concentraciones de ozono oscilaron entre 225 UD y 275 UD.

En gran parte de la costa, las concentraciones de ozono oscilaron entre 225 UD y 250 UD, que en comparación del mes pasado fueron inferiores. La cobertura de estas concentraciones relativamente bajas, se incrementó. Asimismo, la región sur del país, estuvo más afecto a esta disminución, especialmente la región andina. En otras regiones del país como la selva, las concentraciones de ozono oscilaron entre 250 UD y 275 UD.

FIGURA N° 9
 Mapa diario del ozono total atmosférico para el mes de abril 2023



TEMPERATURA EN LA BAJA ESTRATOSFERA

Finalmente es importante considerar que lo que pase en la atmósfera baja tiene, a veces, su impacto en la atmósfera alta o viceversa, y para poder entender la variabilidad del ozono atmosférico es importante conocer cómo es el comportamiento temporal de la temperatura en dichos niveles. Por ello se requiere analizar lo que pasa en la atmósfera alta y ver el comportamiento de las temperaturas en la estratósfera baja aproximadamente en los 70 hPa.

El que la temperatura aumente o disminuya en la estratósfera va a depender de las concentraciones de sustancias que agotan el ozono, así como de la estacionalidad y la circulación atmosférica.

En la Figura 10 se muestra la distribución temporal de la temperatura desde el mes de enero 2022 hasta el mes de abril 2023, al nivel de 70 hPa y entre las latitudes 25°S – 25°N.

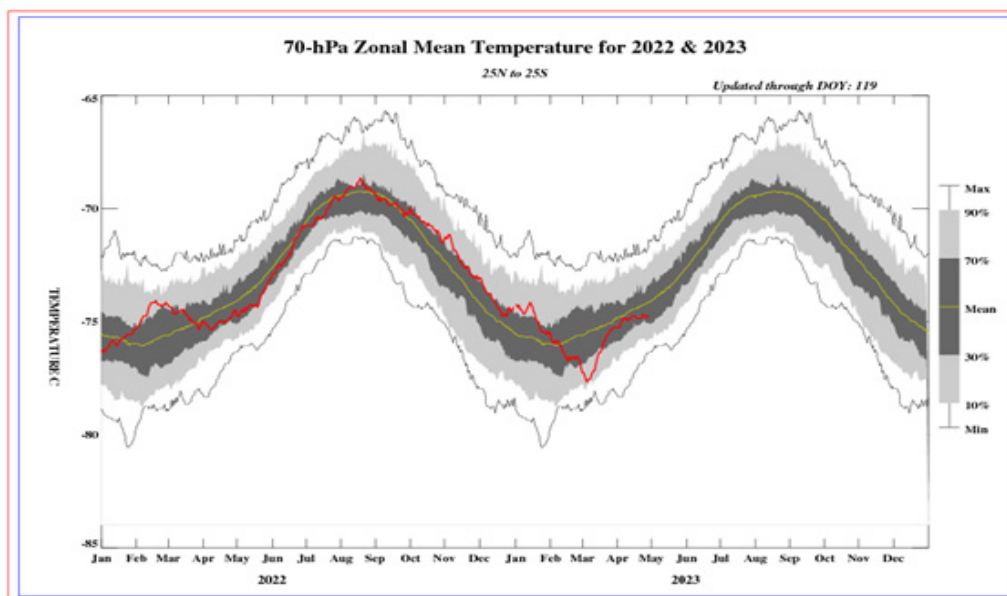
Durante los días de registro, la temperatura en ese nivel (línea de color rojo), se acercó a sus valores climáticos durante las dos primeras décadas del mes, permitiendo un ligero incremento en el régimen térmico, mientras que en la tercera década, empezó a alejarse permitiendo un mayor enfriamiento del aire. De acuerdo al comportamiento térmico del aire en ese nivel, disminuyeron las concentraciones de ozono. En este mes las temperaturas disminuyeron en las capas bajas y altas de la estratósfera, mientras que en la capa media se mantuvieron algo similares a sus valores climáticos.

La variabilidad de la concentración de ozono en ese nivel asociado a los cambios en la temperatura es una consecuencia del movimiento de traslación de la tierra con respecto al sol, así como a procesos de transferencia radiativa y reacciones fotoquímicas. Se suma también, el proceso de la circulación Brewer-Dobson, así como a circulaciones de viento regionales a nivel de alta atmósfera. Por otro lado, hay que destacar el impacto que tiene la emisión de sustancias agotadoras de ozono hacia la atmósfera por parte del factor antropogénico. Se debe tener presente que, por lo general, un aumento (físico) de la temperatura en la atmósfera alta, está ligada con un aumento de las concentraciones de ozono y viceversa, los cuales tienen causales, valga la redundancia, físicos y químicos. El valor promedio mensual (1979-2017) de la temperatura en este nivel y para este mes es de -73.5°C, menor en valor numérico al mes pasado (físicamente “más cálido”). La temperatura calculada en este mes, fue de -74.5°C. Como se observa, una disminución de la temperatura de la masa de aire el cual permite que sea más frío. Debe recordarse que, durante el año, climáticamente se presentan dos mínimos de ozono, uno en el mes de enero y el otro entre los meses de mayo y junio (tal como se ha descrito en párrafos anteriores). En el presente mes, como

ya anteriormente se ha mencionado, el promedio mensual registrado en superficie fue de 243.3 UD, ligeramente menor al mes anterior.

FIGURA N° 10

Comportamiento de la temperatura en la baja estratósfera para el mes de abril 2023



Fuente: National Weather Service, Climate Prediction Center (Web Site)

El comportamiento de temperaturas en el nivel de 70 hPa considerando todo el hemisferio sur en un día típico de marzo, es mostrado en la Figura 11 en donde se aprecia que las temperaturas en el continente Antártico han registrado valores en el orden de -50°C , debido al inicio de la estación de otoño. A partir de ahora las temperaturas en dicho continente empezarán a disminuir por factores atmosféricos (circulación atmosférica) y astronómico (mayor establecimiento de la estación de otoño).

Cabe remarcar que la posición de la tierra con respecto al sol (inclinación con respecto al plano ecuatorial) juega un papel importante en los procesos físico-químicos de la atmósfera. Asimismo, es importante señalar que el aumento de la temperatura en la región tropical, se debe a una moderada mezcla de aire con contenido de ozono proveniente de otras latitudes.

En la región tropical o latitudes bajas, las temperaturas en este mes, en la atmósfera alta (baja y media estratósfera) vienen registrando valores cercanos a sus normales climáticas, mientras que en la estratósfera alta están por debajo de sus valores normales.

FIGURA N° 11
Comportamiento de la temperatura en 70 hPa para el hemisferio sur (18 abril 2023)



III.-CONCLUSIONES

1. El mes de abril se caracteriza porque climáticamente las concentraciones de ozono sobre nuestro país (los medidos en superficie) empiezan a disminuir. En el presente mes el valor registrado fue de 243.3 UD como valor promedio. Esta ligera disminución tuvo como causa la baja de temperatura en 70 hPa, así como a una menor mezcla de masas de aire en la estratósfera baja.
2. En cuanto a la variación temporal (promedio diario) de la concentración de ozono durante el mes, medidos con el espectrofotómetro Dobson en el OVA Marcapomacocha, oscilaron entre 238.5 UD a 247.2 UD, siendo ligeramente menores al mes pasado. Esto, en cierta manera implica que el régimen térmico ha presentado un decremento.
3. Con respecto a la distribución vertical del ozono, en el OVA Marcapomacocha, según información obtenida por el Metop-C/GOME-2, durante un día típico del mes de abril, se puede concluir que la máxima concentración de la misma, en la región tropical, continua registrándose entre los 40 hPa y los 10 hPa (media estratósfera) con valores de 18 UD y 23 UD, mientras que en latitudes altas del hemisferio sur, la altura de las máximas concentraciones se dio entre los 70 hPa y 20 hPa con valores de 22 UD. La altura de la máxima concentración de ozono sigue relacionada con la variabilidad de la circulación atmosférica en estas dos subcapas, así como a las variaciones termales. Debido a la mayor densidad del aire, la altura en la región tropical es mayor.
4. En latitudes altas del hemisferio norte, se observó un núcleo de altas concentraciones de ozono con valores entre 32 UD a 37 UD, especialmente entre los 120 hPa y 30 hPa. El cambio de estación en dicho hemisferio (aunque ya con condiciones propias de otoño) permite registrar dichos valores.
5. A pesar de que el ozono es un gas traza, los valores de relación de mezcla mostrados nos indican que las concentraciones, si bien es cierto en valor numérico no son altos, a nivel físico son muy importantes porque controlan el ingreso de la radiación ultravioleta a la superficie terrestre. Sobre nuestras latitudes la relación de mezcla fue relativamente baja (menor al mes pasado) con valores entre 2.20×10^{-6} y 2.30×10^{-6} , siendo uno de los causantes de la disminución de la concentración de ozono sobre nuestras latitudes (flujos de viento muy variables). En latitudes medias, la

mezcla también disminuyó debido a la circulación atmosférica y al efecto térmico estacional.

6. Por otro lado, la concentración de vapor de agua que se pueda tener en la estratósfera es importante para el balance radiativo de la atmósfera, así como para la variabilidad en el comportamiento del ozono. Sobre nuestro país, al nivel de 46 hPa, se observaron concentraciones bajas en el sur (3.78 ppmv), mientras que en el centro entre 4.20 ppmv y 4.30 ppmv para finalmente en el norte, concentraciones entre 4.30 ppmv a 4.60 ppmv. Dichas concentraciones podrían estar relacionadas con el sobrecalentamiento del agua de mar en la región norte del país.
7. Los mapas de ozono total atmosférico (provenientes de la plataforma OMI del satélite AURA de la National Aeronautics and Space Administration - NASA), muestran concentraciones bajas, en la franja costera peruana, especialmente en el centro y sur (225 UD y 250 UD). En otras partes del país las concentraciones de ozono oscilaron entre 250 UD y 275 UD. Este comportamiento, en forma general, responde a la disminución de la temperatura en la primera y tercera subcapa de la estratósfera, así como a la variabilidad en la circulación atmosférica (vientos no muy definidos) y procesos fotoquímicos, aunados a la baja relación de mezcla.
8. En lo que concierne al comportamiento de la temperatura en la baja estratósfera (70 hPa) se puede mencionar que, durante el mes de abril, los valores se caracterizaron por una ligera disminución (-77.0°C), permitiendo que se registrara una baja en las concentraciones de ozono (lo cual guarda relación con el comportamiento climático).
9. Debido a que abril es un mes donde los niveles de radiación solar tienden a disminuir debido al establecimiento de la estación de otoño, trae como consecuencia, que los procesos físicos-químicos en la estratósfera sean cada vez menos dinámicos influyendo grandemente en las concentraciones de ozono atmosférico.
10. Se requiere disponer de información real de la concentración de ozono total a nivel del perfil vertical de la atmósfera a fin de realizar el contraste respectivo con lo obtenido por los satélites y determinar la desviación respectiva. En los periodos donde no se tenga información real se podría utilizar el brindado por los satélites aplicando ciertos algoritmos de cálculo.

Dirección de Meteorología y evaluación Ambiental Atmosférica:

Ing. Gabriela Rosas Benancio

grosas@senamhi.gob.pe

Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico:

Ing. Jhojan Rojas Quincho

jprojas@senamhi.gob.pe

Análisis y Redacción:

Ing. Orlando Ccora Tuya

Bach. Juan Tacza Ordoñez

Tco. Rosalinda Aguirre Almeyda

Tco. Julia Astudillo Capcha

Consultas y sugerencias:

occora@senamhi.gob.pe

Suscríbete para recibir la edición digital al enlace: <https://forms.gle/cqZit9WHG7gLktbT6>

Próxima actualización: 15 de junio de 2023



**Servicio Nacional de Meteorología e
Hidrología del Perú - SENAMHI**

Jr. Cahuide 785, Jesús María

Lima 11 - Perú

Central telefónica: [51 1] 614-1414 anexo 444

**Subdirección de Evaluación del Ambiente
Atmosférico:**