

Mayo 2024
vol. 05

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



Introducción

El ozono protege cerca del 98% de la radiación solar que recibe la Tierra. Ahora bien, la capa de ozono sufre un deterioro natural, pero la acción del ser humano ha hecho que este desgaste avance muy rápidamente de lo que debería.

A lo largo de la capa de ozono, científicos encontraron ciertos puntos donde la densidad de esta era muy inferior a lo normal, permitiendo la entrada de mayor radiación. Esta radiación influía directamente sobre la Tierra, provocando lo que conocemos actualmente como Efecto Invernadero. Los “agujeros” en la capa de ozono se encontraron sobre todo en el polo norte, esto porque los países más desarrollados y contaminantes se encuentran en este hemisferio.

Asimismo, las investigaciones llegaron a la conclusión de que se dieron las condiciones propicias para la producción de clorofluorocarbonos. Este elemento se encuentra en los aerosoles y las refrigeradoras industriales o fungicidas. Su uso provoca una destrucción 50 veces más rápida de la capa de ozono que de forma natural.

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).



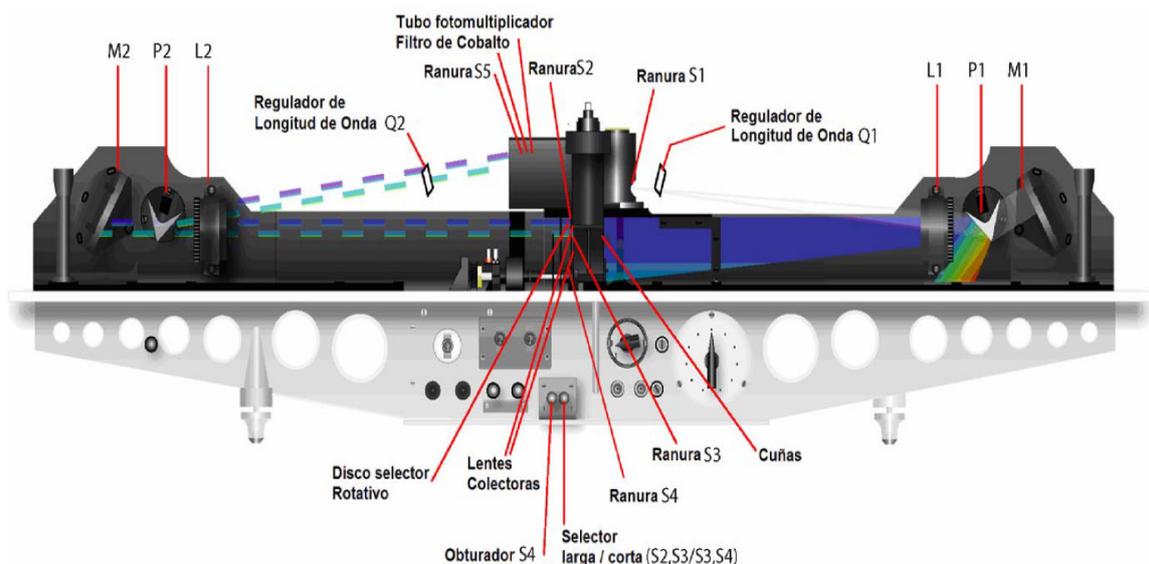
I.- CÁLCULO DEL OZONO ATMOSFÉRICO Y FUNCIONAMIENTO DEL ESPECTROFOTÓMETRO DOBSON

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 en el mes de mayo la estratósfera baja de la región tropical ha presentado características térmicas variables (parecidas al mes pasado con decrementos e incrementos) lo cual ha permitido, en esta ocasión, que las concentraciones de ozono hayan continuado con una disminución con respecto al mes de abril, incluso por debajo de sus valores climáticos. Durante todo el mes, las temperaturas en el nivel de 100 hPa registraron un aumento, pero siempre muy por debajo de sus valores normales. Asimismo, en los niveles de 70 hPa y 50 hPa las temperaturas se incrementaron, pero, aun así, al igual que en el nivel de 100 hPa, lograron estar muy por debajo de sus valores normales. A lo largo del mes fue característico el registro de vientos zonales los cuales aportaron cada vez menos concentraciones de ozono atmosférico trayendo como consecuencia una tendencia hacia la disminución. En el caso de la alta tropósfera, los sistemas atmosféricos que gobiernan el tiempo sobre nuestro país, llegaron a trasladarse hacia el norte debido al mayor establecimiento de la estación astronómica de otoño. Cabe mencionar que se continua con algunos remanentes atmosféricos cálidos, dado de que las anomalías de la temperatura superficial del mar empezaron a disminuir cada vez más con tendencia a registrar valores por debajo de sus valores climáticos La convección húmeda mínima sólo quedo registrada en la región norte del país debido a la invasión de masas de agua relativamente frías presentando escaso efecto en la circulación de los vientos de la alta tropósfera y baja estratósfera. Durante el presente periodo, estos procesos llegaron a tener incidencia en las propiedades físicas de la baja estratósfera permitiendo obtener valores de ozono atmosférico ligeramente menores al mes anterior.

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 (niveles inferiores de la atmósfera), 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 los procesos que involucran el mayor establecimiento de la estación de otoño, interactúan entre sí en las

diferentes capas de la atmósfera, permitiendo el traslado de calor o energía. En ese sentido, se analiza la capa de 70 hPa (día 21 de mayo) dado de que es representativa de la baja estratósfera. A lo largo del mes, climáticamente, las concentraciones de ozono continúan disminuyendo en esta parte del continente debido a la aparición de mayores flujos de viento. En el presente mes, se registraron flujos zonales negativos debido a la formación de núcleos anticiclónicos tanto en el Atlántico Sur como en parte del continente (principalmente en la región central), los cuales permitieron que los vientos transportaran pocas cantidades de ozono atmosférico. Aunados a estos sistemas se formó una vaguada en altura con orientación zonal lo cual permitió una mayor disminución del ozono.

En latitudes medias, del hemisferio sur, la circulación de vientos ha sido mayormente con vientos zonales negativos, pero sin formación de sistemas que permitan su desviación.

En cuanto al régimen térmico podemos señalar lo siguiente: se ha observado nuevamente un comportamiento variable con un aumento por lo menos en niveles bajos de la estratósfera (100 hPa, 70 hPa y 50 hPa) y disminución en la estratósfera media y alta (30 hPa, 15 hPa, 5 hPa y 2 hPa), en el corredor de 20°N-20°S, con valores por debajo de sus valores climáticos (atmósfera más fría). Esta disminución podría estar relacionado todavía con el moderado contenido de humedad en ese nivel (más adelante se detallará el proceso). En el caso de Perú, se debe remarcar que, de acuerdo a la información climática de superficie, las concentraciones de ozono en este mes han sido menores al mes pasado (a nivel promedio mensual), el cual responde a su comportamiento climático, reforzando, en cierta manera, lo ocurrido en la estratósfera baja (obtenido de Weather Service de la University of Wyoming), con la persistencia de los vientos zonales negativos durante gran parte del mes Figura 2.

Con el fin de sustentar lo descrito a nivel de baja estratósfera, podemos mencionar que, de la vigilancia realizada en el mes de mayo a nivel de superficie, en la estaciónel Observatorio de Vigilancia Atmosférica (OVA) Marcapomacocha se observó que el comportamiento horario de la concentración de ozono atmosférico en general, estuvo oscilando entre 234.0 UD y 246.0 UD (UD = Unidades Dobson), valores ligeramente menores, mientras que a nivel promedio mensual ocurrió lo mismo.

Se debe mencionar que en las primeras horas del día las concentraciones de ozono son relativamente altas debido al ozono acumulado en horas de la noche (cabe señalar que en mayo se forma menos ozono) 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).

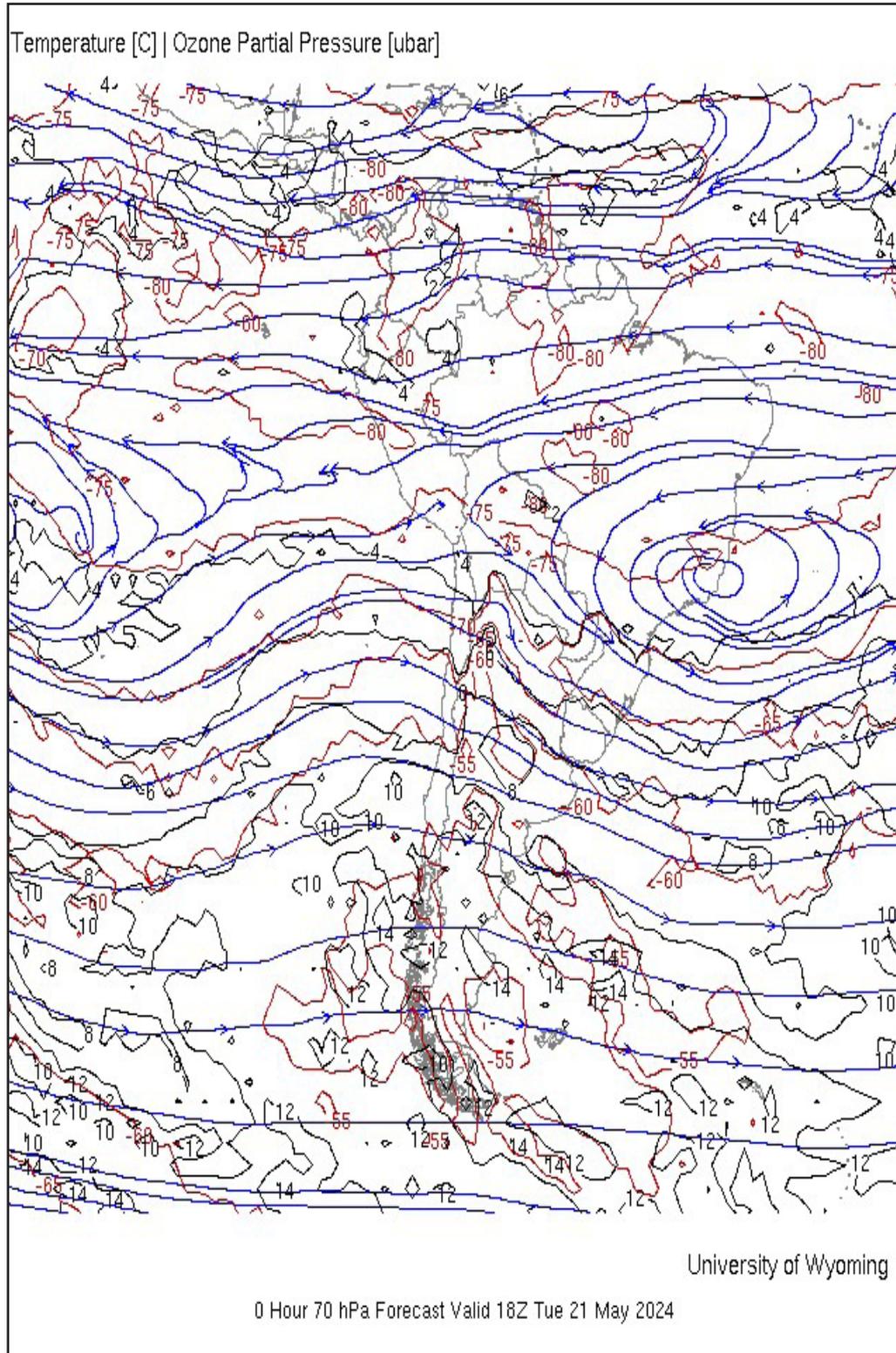
Este proceso físico, se enmarca en que durante las primeras horas de la mañana la incidencia de la radiación ultravioleta, en esta temporada, es cada vez menor, por ende las concentraciones de ozono son relativamente moderadas (debido al ozono residual), a medida que la intensidad de la radiación ultravioleta se incrementa en forma paulatina hacia el mediodía, donde los valores son todavía altos (en los meses de otoño e invierno son relativamente menores), 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 (reacciones químicas durante el día, de compuestos o gases generadores de ozono troposférico) 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 mostrado un ligero descenso debido a la estacionalidad. En algunas regiones se mantuvieron similares debido a condiciones netamente locales. La cantidad de aerosoles tiende a disminuir debido a la finalización del periodo lluvioso para dar paso a condiciones secas y con mucha transparencia atmosférica. Se espera que en el mes siguiente dichos valores de radiación, continúen disminuyendo en forma general.



FIGURA N° 2

Flujos de masas de aires zonales

Fuente: Weather Service de la University of Wyoming



El comportamiento de la concentración de ozono atmosférico promedio diario mensual multianual (2000-2021) del mes de mayo oscila entre 238.2 UD y 247.0 UD aproximadamente (Figura 3), mientras que los medidos en el mes de mayo del presente año, oscilaron entre 236.4 UD y 245.2 UD.

En la figura se aprecia que los valores registrados en el presente mes, estuvieron un 67% por debajo de sus valores climáticos, mientras que un 33% por encima.

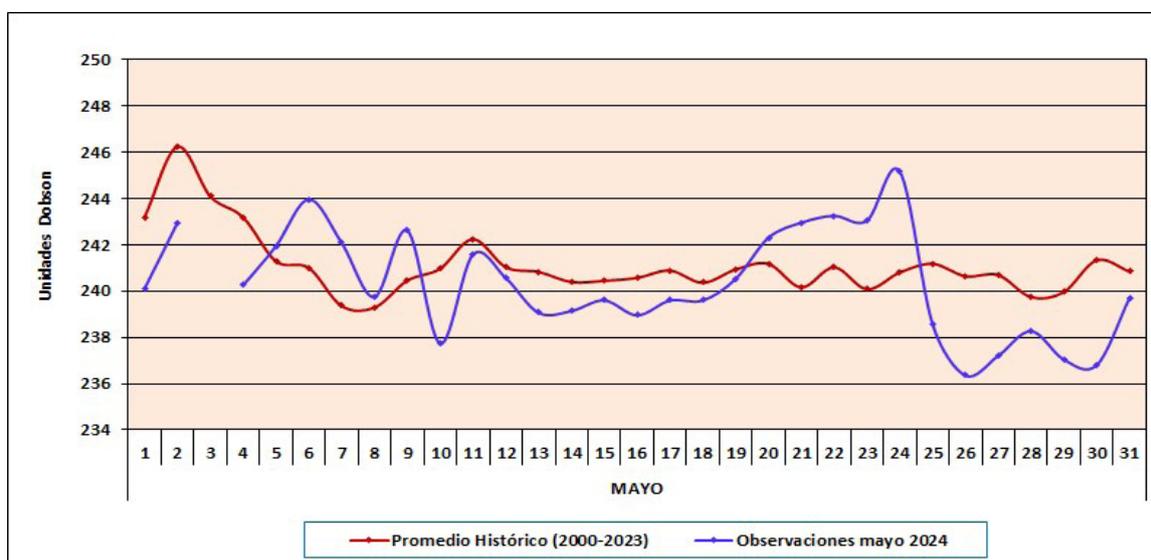
Durante gran parte del mes las concentraciones de ozono medidos en el presente mes han estado por debajo de sus valores climáticos. Ahora bien, cuando se comparan ambas series se ha venido observando un comportamiento variable, con valores que en algunos momentos se acercan a sus normales (por ejemplo en la segunda década) y en otros más bien alejándose (a partir de la tercera década), lo cual podría atribuirse a los cambios en la circulación atmosférica (vientos del este y el algunos momentos del noreste), así como también por la cantidad de vapor de agua emitida a la atmósfera por el volcán Hunga Tonga en el Pacífico Sur, en enero de 2022, el cual se piensa, va originando también efecto en latitudes bajas muy aparte de las medias y altas del hemisferio sur. La tendencia de las concentraciones de ozono sobre nuestro país, con respecto al mes de abril ha registrado valores ligeramente menores.

En la estratósfera, la temperatura y las concentraciones de ozono generalmente van de la mano, de acuerdo a ello, se puede mencionar que, en el mes de mayo, en todas las capas de la estratósfera, las temperaturas se encuentran todavía por debajo de sus valores normales, aunque se debe remarcar que en la estratósfera baja las diferencias son mayores, probablemente debido a la moderada concentración de vapor de agua, especialmente sobre nuestras latitudes o también por cambios en la circulación atmosférica.



FIGURA N° 3

Comportamiento temporal de la concentración de ozono atmosférico en el OVA Marcapomacocha. Mayo 2024.



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 240.4 UD inferior en 0.6 UD al promedio mensual multianual (241.0 UD).

Se debe tener presente que, en la región tropical durante los meses del otoño austral, vale decir abril hasta junio, las concentraciones de ozono continúan disminuyendo hasta el mes de junio para luego a partir del mes de julio incrementar hasta el mes de setiembre, debido a la circulación de masas de aire al nivel de baja estratósfera, así como también por efectos térmicos y fotoquímicos. 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 los meses de mayo-junio). 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. En el mes de mayo, la continua persistencia de la presencia de masas de aire provenientes del este durante gran parte del

mes, permitió nuevamente la disminución ligera de las concentraciones de ozono, coincidiendo con la climatología de esta temporada.

Debido al término del periodo cálido, los procesos de advección húmeda han sido casi nulos en este mes, pero las concentraciones de vapor de agua se mantienen debido aún a los remanentes de calor en la atmósfera por lo que las concentraciones de ozono tienden a disminuir. Ahora bien, a esto se le añade el flujo de vientos provenientes del este, los cuales permiten la disminución de dichas concentraciones.

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, continúa observándose un desfase entre ellos. Con respecto a la información proveniente del AURA/OMI, durante el 100% de días del mes de mayo los valores de ozono diario medidos estuvieron por debajo de lo registrado por el Espectrofotómetro Dobson. Para el caso de SUOMI/OMPS, ocurre lo mismo, durante el 100% de días del mes estuvieron por debajo de lo registrado en superficie. Figura 4.

De este análisis podemos decir que la información proveniente de estos dos satélites es mucho menor a lo registrado por el Espectrofotómetro Dobson, cuando anteriormente eran superiores. 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 21 UD como producto del tipo o forma de medición que realiza el satélite.

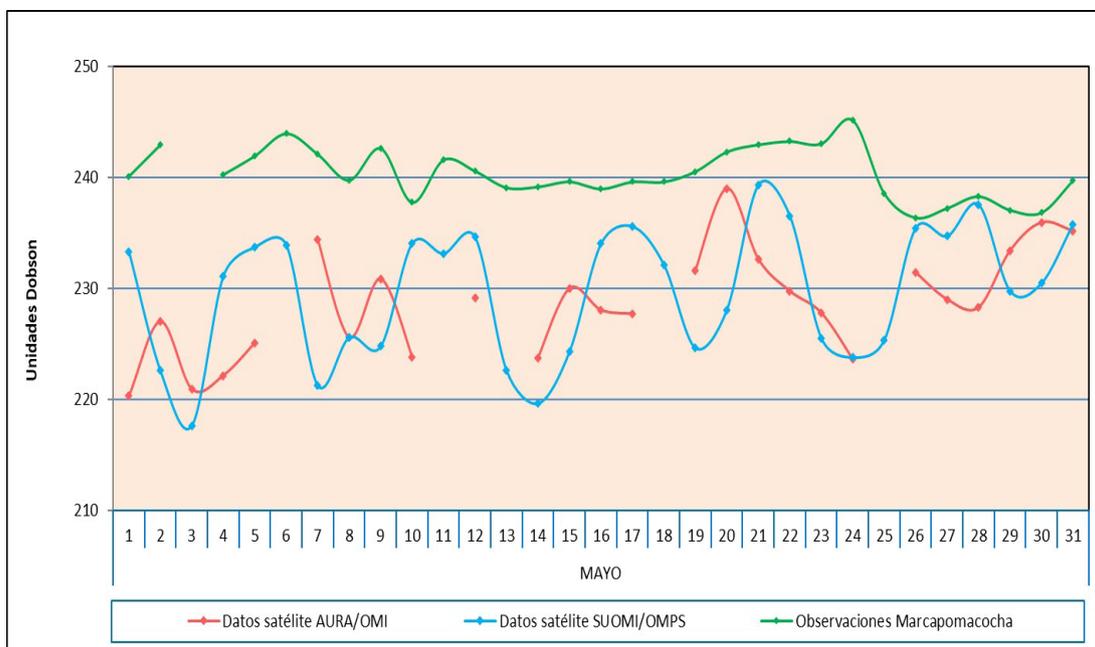
Cabe mencionar, que la tendencia de las concentraciones de ozono medidos en superficie ha registrado una ligera disminución en el tiempo, mientras que los medidos con los satélites, muestran más bien una tendencia al ascenso.

El pronóstico, de acuerdo a la climatología, es que las concentraciones de ozono continúen disminuyendo desde el mes de mayo hasta junio, para luego después empezar a incrementarse en forma paulatina.



FIGURA N° 4

Comparación de información proveniente de las plataformas OMI y OMPS con lo registrado en superficie, en el OVA Marcapomacocha.



Perfil Vertical de Ozono Atmosférico

Por lo general, el 10% de la concentración de ozono se encuentra en la tropósfera y el otro 90% en la estratósfera. En ese sentido, cobra vital importancia 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 (cambios en la transferencia radiativa o circulación de los vientos). Se debe mencionar que en los últimos 40 años el uso de las sustancias agotadoras de ozono empezó a disminuir para dar paso al uso de sustancias sustitutas, los cuales al fin y al cabo destruyen el ozono atmosférico, pero en menor cantidad. Actualmente es notoria, la emisión de 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. Se suma a ello las implicancias que pudiera tener, en las concentraciones de ozono, la erupción del volcán Hunga Tonga, anteriormente explicado en párrafos anteriores.

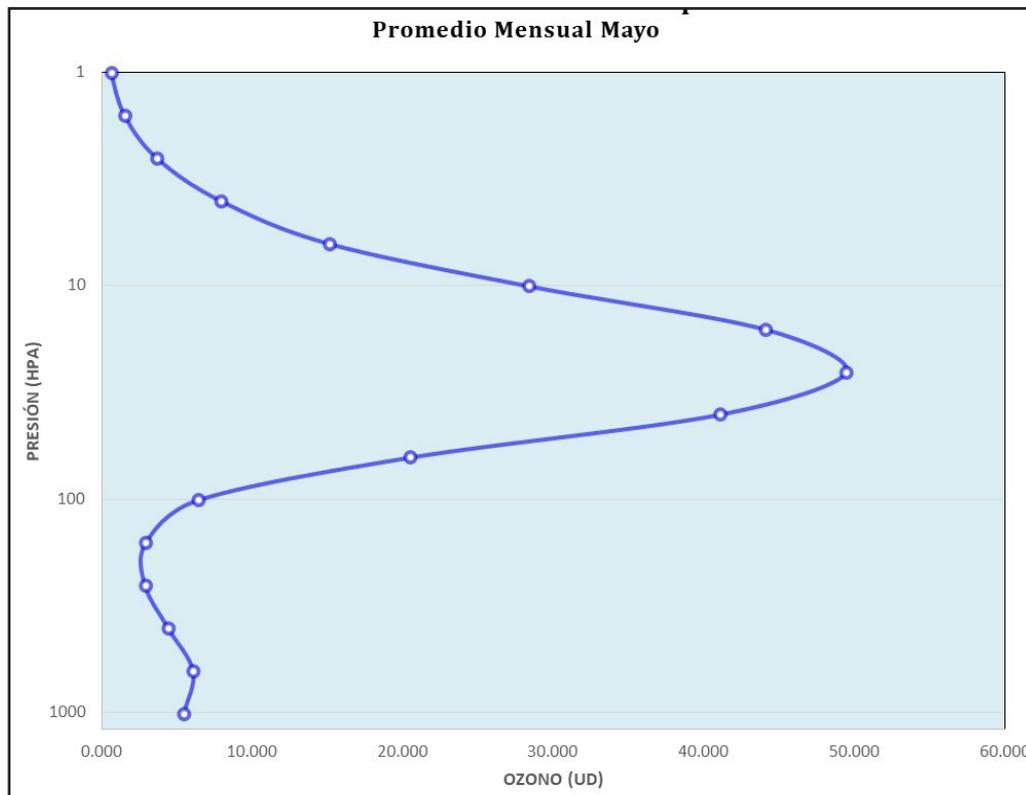
Según la OMM (Organización Meteorológica Mundial), desde el año 2000 hasta el 2020 se han observado por medio de mediciones del perfil vertical de la atmósfera y el desarrollo de modelos numéricos, una disminución en las concentraciones de ozono (~2% por década) en la estratósfera baja de la

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.

Teniendo en cuenta lo descrito líneas arriba y de acuerdo a la figura 5, obtenido de la National Aeronautics and Space Administration - NASA, plataforma OMPS, se ha podido observar el comportamiento típico del perfil vertical de ozono para el mes de mayo en el OVA 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 para remarcar que las mayores concentraciones de ozono se registran en esta segunda capa de la atmósfera. Se observa que las concentraciones de ozono son ligeramente menores a lo observado en el mes pasado, de acuerdo al perfil mostrado. Las concentraciones mayores la encontramos en la media estratósfera con valores entre 37 UD a 47 UD.

FIGURA N° 5
Perfil vertical de ozono atmosférico del OVA Marcapomacocha
Fuente: National Aeronautics and Space Administration – NASA



Según información de perfil vertical de ozono atmosférico para un día típico del mes de mayo (día 19) 2023 obtenida por Metop-C/GOME-2, muestra para el hemisferio norte concentraciones todavía altas (pero disminuyendo), cuyos valores han oscilado entre 25 UD y 30 UD (menores al mes pasado) entre la baja y media estratósfera (el área de cobertura latitudinal de estas concentraciones altas se dio entre 50N°-80°N). Cabe mencionar que actualmente dicho hemisferio se encuentra en primavera, registrándose aún concentraciones relativamente moderadas de ozono en latitudes bajas con tendencia a disminuir, debido a que el régimen de temperatura empieza a incrementarse paulatinamente (pero siempre por debajo de sus valores normales), tanto en la estratósfera baja como en parte de la media, mientras que en la estratósfera alta empiezan a disminuir. Hay que tener presente que, en la región tropical, se forma la mayor cantidad de ozono siendo incluso mayores a los formados en latitudes medias y altas de ambos hemisferios, pero debido a factores de circulación regional como el de Brewer-Dobson, la Oscilación Quasi Bienal, así como de procesos de reacciones fotoquímicas y térmicas, en la estratósfera media son redistribuidas hacia latitudes medias y altas de ambos hemisferios, permitiendo una disminución de la misma. El problema se ahonda cuando se registra mayor contenido de humedad.

La altura de las concentraciones de ozono (12 UD a 23 UD) en latitudes bajas del hemisferio norte fue de 50 hPa y 20 hPa, mientras que en latitudes bajas del hemisferio sur (23 UD a 16 UD) la altura fue de 70 hPa y 10 hPa. En latitudes medias del hemisferio sur también se registraron concentraciones relativamente moderadas con valores entre 16 UD y 23 UD, pero a una altura entre 100 hPa y 20 hPa.

En esta temporada, las concentraciones de ozono, por lo menos en esta parte de la región tropical, han registrado un ligero decrecimiento, por factores de circulación de vientos del este, así como por efecto a las grandes concentraciones de vapor de agua que fueron emitidas por el volcán submarino Hunga Tonga en enero de 2022.

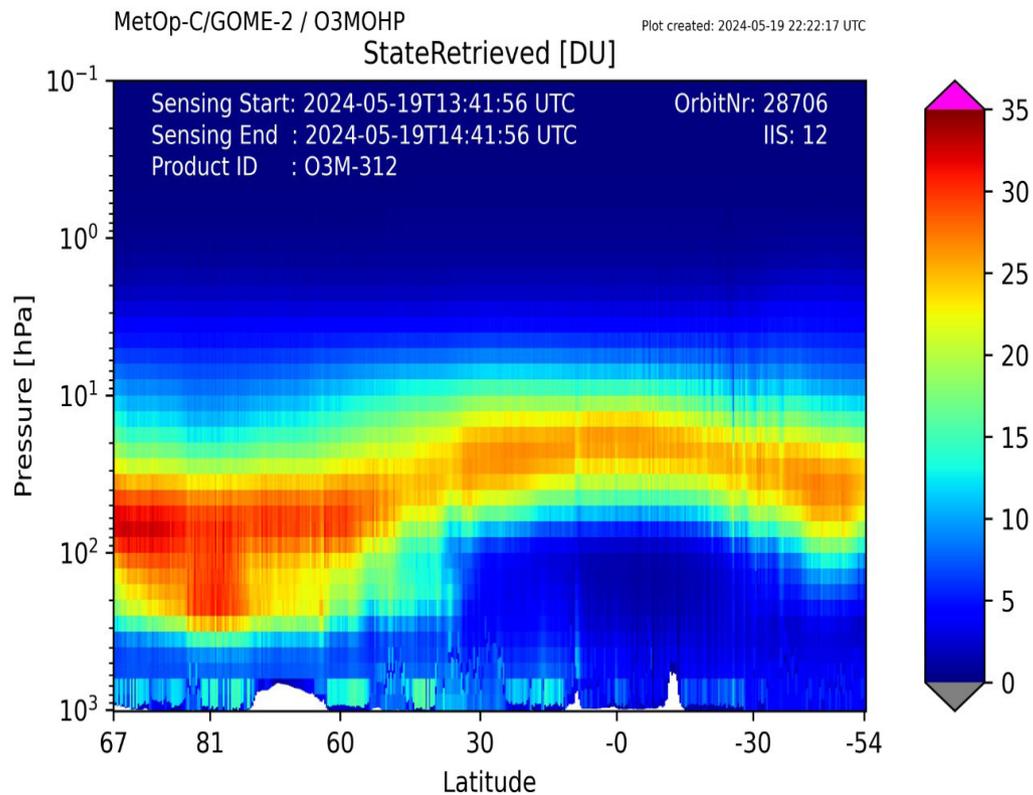
Para el caso de nuestro país, concentraciones relativamente moderadas se han registrado entre los 50 hPa y 10 hPa con valores entre 12 UD y 22 UD.

En los primeros niveles de la atmósfera (tropósfera) si bien es cierto que 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 físico-químicos. En la estación de verano estos procesos son intensos debido al incremento de la actividad solar, mientras que en invierno disminuyen.

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 aunados últimamente con el incremento del vapor de agua, debido a la consideración descrita en párrafos anteriores. Figura 6.

Durante el mes de mayo, en latitudes medias y altas del hemisferio norte las concentraciones de ozono registradas oscilaron entre 300 UD y 350 UD (menores al mes anterior) debido al establecimiento de la estación de primavera. Cabe mencionar que, por el momento, no se tiene presencia de algún tipo de vórtice polar, debido a la topografía de esa región que no permite la formación de dicho sistema y por lo tanto permite el registro de mayores concentraciones de ozono comparados al hemisferio sur.

FIGURA N° 6
Perfil Vertical de Ozono según GOME-2
Fuente: Metop-C/GOME-2



VAPOR DE AGUA A 46 hPa

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.

En función a lo mencionado, se debe tener conocimiento, 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 los efectos, en las concentraciones de ozono, se vean con el transcurrir de los meses o años, aunque ya hay indicios en el adelanto o retraso de la aparición del vórtice polar, así como variaciones en las concentraciones de ozono en la región tropical.

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 tropósfera y enfriamiento en la estratósfera y esto permitiría un cambio en las concentraciones de ozono y por ende su impacto en el balance de transferencia radiativa.

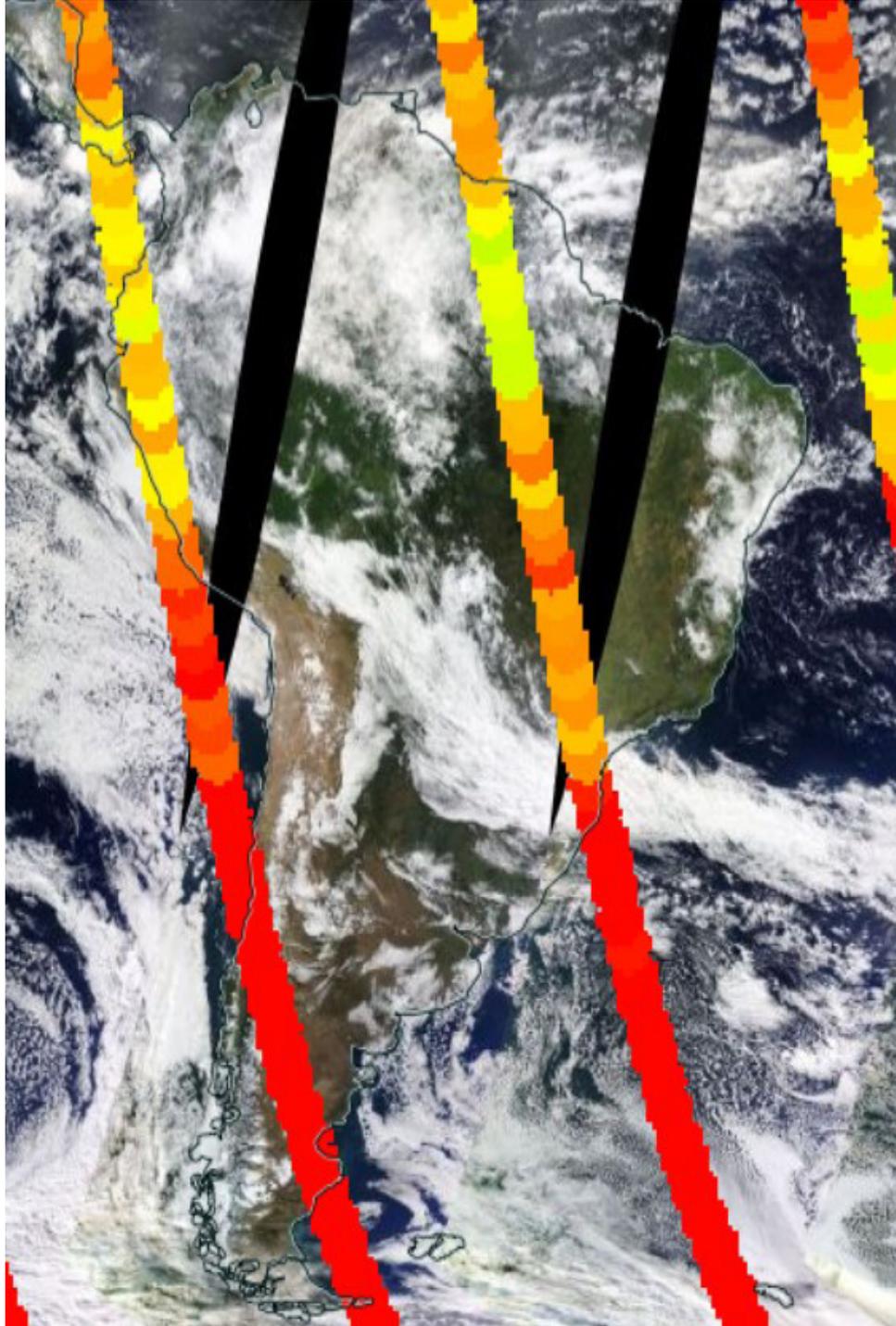
Hay que recalcar que a nivel global se viene disipando el periodo cálido (aunque todavía quedan remanentes) vivido desde el año 2023 hasta la fecha los cuales permiten tener almacenado calor en la atmósfera y por ende concentraciones moderadas a bajas de humedad relativa, los cuales tienen repercusión en las concentraciones de ozono. Sin embargo, esos remanentes durante los últimos días, están desapareciendo.

En la figura 7 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 (18 mayo 2024), obtenida de la Earth Data de la National Aeronautics Space Administration - NASA. En ella se observa sobre Perú, concentraciones de vapor de agua relativamente bajas. Por ejemplo, en el sur del país las concentraciones oscilaron entre 3.76 ppmv a 3.90 ppmv, mientras que en la sierra central valores entre 3.70 ppmv y 3.90 ppmv. En el lado de la región andina norte, concentraciones entre 3.62 ppmv y 3.82 ppmv. En la región de la costa norte se registraron concentraciones de vapor de agua entre 3.50 ppmv y 3.60 ppmv, mientras que en el centro entre 3.50 ppmv y 3.65 ppmv. Estas condiciones aunadas a los de circulación en ese nivel estarían permitiendo una ligera disminución en las concentraciones de ozono atmosférico.



FIGURA N° 7
Vapor de Agua a 46 hPa

Fuente: Earth Data de la National Aeronautics Space Administration – NASA



Cabe señalar que la humedad relativa es la cantidad de humedad que hay en un lugar con relación a la que habría si el aire estuviera completamente saturado de humedad, expresándose en porcentaje.

En ese sentido, la humedad relativa al nivel de 100 hPa en la región central del Perú (departamento de Junín), en el mes de mayo fue de 23%, mientras que a nivel de 70 hPa fue de 12%, por otro lado, a 50 hPa fue de 2%. Finalmente, en la parte media de la estratósfera, vale decir, 30 hPa, la humedad relativa fue de 2% y a nivel de 15 hPa de 1%. El contenido de humedad en la atmósfera disminuyó con respecto al mes pasado lo cual tiene cierta injerencia con las concentraciones de ozono que se registran en esta parte del país.

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 a lo registrado en el mes de abril, debido a la persistencia de vientos provenientes del este, así como por una moderada concentración de humedad. Por el lado del Pacífico mayormente se registraron concentraciones de ozono bajas, con valores entre 225 UD y 250 UD.

En todo el mes, sobre gran parte de nuestro país (cubriendo mayor área que el mes pasado), las concentraciones de ozono oscilaron entre 225 UD y 250 UD.

Cabe remarcar que entre los días 03, 04, 05, 06, 07, 09, 10, 12, 14 y 24 de mayo se registraron concentraciones bajas de ozono (225 UD y 250 UD) que abarcaron todo el país, mientras que en el resto de días, las concentraciones de ozono por lo general oscilaron entre 250 UD y 275 UD, abarcando gran parte del país.

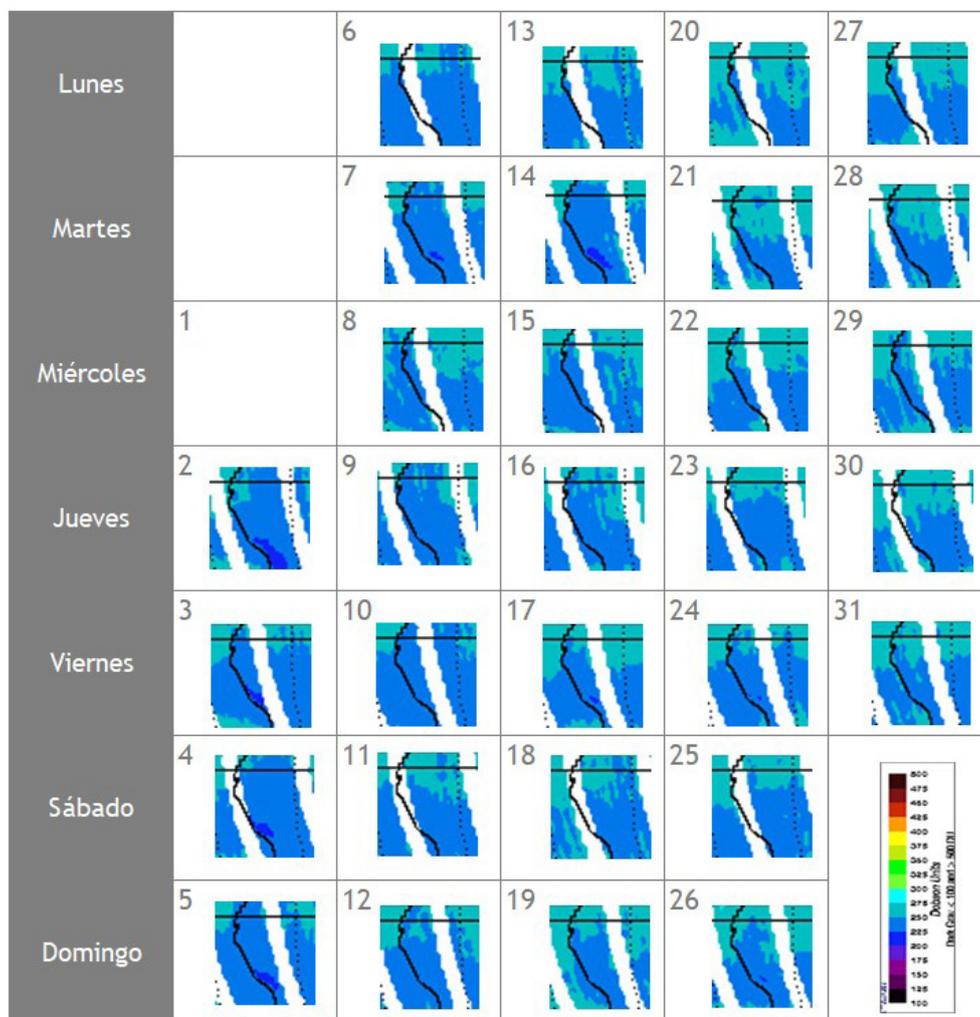
En este mes, se registraron mayores ingresos de masas de aire zonales negativos, los cuales permitieron una reducción de las concentraciones de ozono atmosférico sobre nuestras latitudes. A partir del mes de mayo, climatológicamente se registran las concentraciones más bajas de ozono sobre nuestro país, los cuales se traducen todavía en altos a bajos niveles de radiación ultravioleta, aunados estos a otros factores como los meteorológicos y ambientales.



FIGURA N° 8

Mapa diario del ozono total atmosférico para el mes de mayo 2024

Fuente: Satélite AURA



FLUJO DE VIENTOS EN LA BAJA Y MEDIA ESTRATOSFERA

Una de las herramientas que ayuda a entender la mayor o menor concentración de ozono atmosférico sobre nuestras latitudes, específicamente sobre Perú es la información de viento en altura, especialmente el de la baja y media estratósfera. A la fecha se cuenta con información de viento para el mes de mayo en la región central del país. La estación se ubica en el departamento de Junín cuyas coordenadas son latitud: 11.9562°S, longitud: 75.3217°W a una altitud de 3,311.72 m. Cabe mencionar que la información brindada nos da

bases para tener una idea de la relación de mezcla que pueda existir en las diferentes capas de la estratósfera.

BAJA ESTRATÓSFERA

El flujo de vientos en el mes de mayo al nivel de 100 hPa fue mayormente del oeste, influenciados por el flujo de 200 hPa, con intensidades por encima de 11.0 m/s con una persistencia de 64%. Asimismo, se registraron vientos del noroeste con una persistencia de 30%. Finalmente, se registraron vientos en otras direcciones (suroeste), pero con una persistencia de casi 6%.

A nivel de 70 hPa los flujos de viento fueron mayormente del este, noreste y sureste con velocidades por encima de 6.0 m/s con una persistencia de 80%. En otras direcciones la persistencia fue de solo 18%.

En el nivel de 50 hPa el flujo de viento fue casi en su totalidad del este con una persistencia del 88% con una velocidad por encima de 11 m/s.

MEDIA ESTRATÓSFERA

En el nivel de 30 hPa el flujo de viento fue casi en su totalidad del este con una persistencia del 85% con una velocidad por encima de 11 m/s.

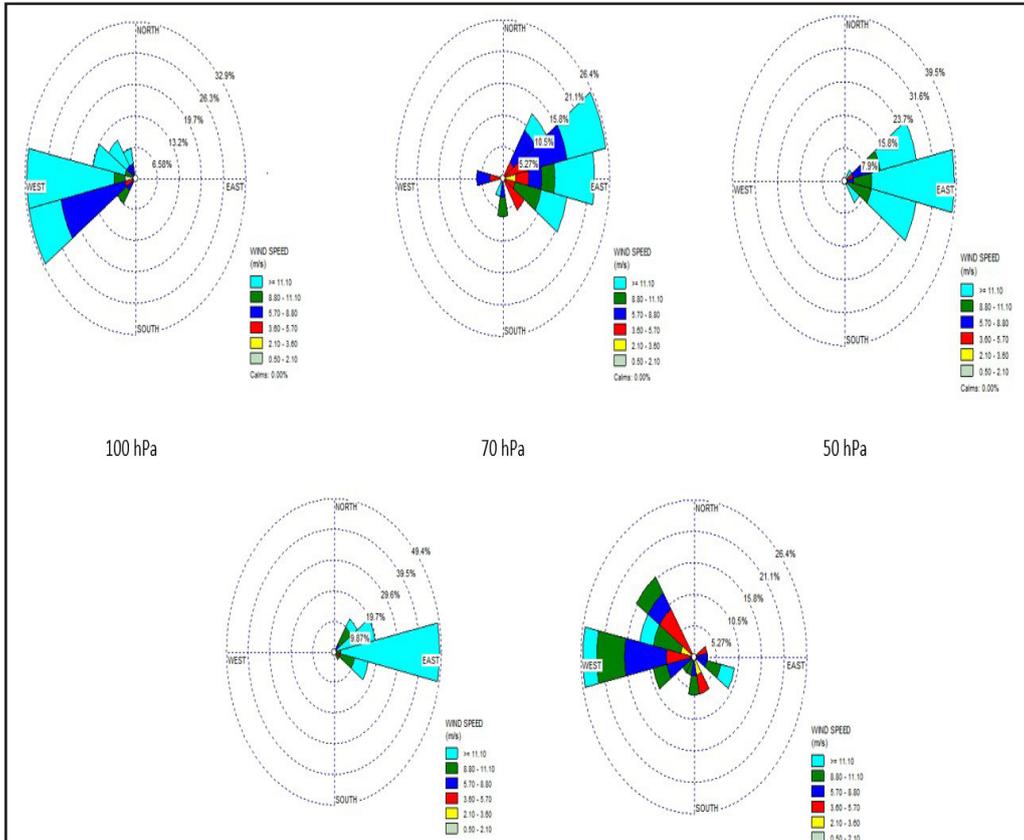
Finalmente, en el nivel de 15 hPa los flujos fueron mayormente del oeste, con una velocidad por encima de 5 m/s y una persistencia de 64%, mientras que en otras direcciones la persistencia fue de 22% con vientos que superaron los 4.0 m/s.

Realizando una síntesis de este análisis, se podrá observar que los vientos provenientes del este son los mas frecuentes tanto en la baja como en la media estratósfera con velocidades que superaron mayormente los 8 m/s, permitiendo la disminución de las concentraciones de ozono atmosférico sobre nuestro país. Este tipo de flujo sustenta la figura 2 donde los vientos son mayormente zonales.

El comportamiento de vientos descrito líneas arriba se puede observar en la Figura 9.

FIGURA N° 9

Comportamiento del viento en la baja y media estratósfera para el mes de mayo 2024



TEMPERATURA EN LA BAJA Y MEDIA 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, así como otros fenómenos que ocurren en forma casi periódica (Fenómeno El Niño o La Niña).

En la Figura 10 se muestra la distribución temporal de la temperatura desde el mes de enero 2023 hasta el mes de mayo 2024, al nivel de 70 hPa y entre las latitudes 25°S - 25°N, obtenido de la National Weather Service de la National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA.

Durante los días de registro, la temperatura en ese nivel (línea de color rojo), si bien es cierto ha mostrado un ascenso, pero aun continua muy por debajo de sus valores normales (línea de color amarillo), incluso por debajo de sus mínimos extremos, permitiendo una menor concentración de ozono atmosférico. Debido al comportamiento térmico del aire en ese nivel, las concentraciones de ozono lograron registrar valores ligeramente menores a nivel diario, con una tendencia a continuar disminuyendo hasta el mes de junio. Se debe remarcar que, durante el mes de mayo, las temperaturas, observadas en las capas bajas de la estratósfera continuaron persistiendo por debajo de sus valores normales, pero con tendencia a un ligero incremento, mientras que, en la estratósfera alta, el régimen térmico tuvo un comportamiento parecido, pero al igual que las dos capas anteriores, todavía por debajo de sus normales.

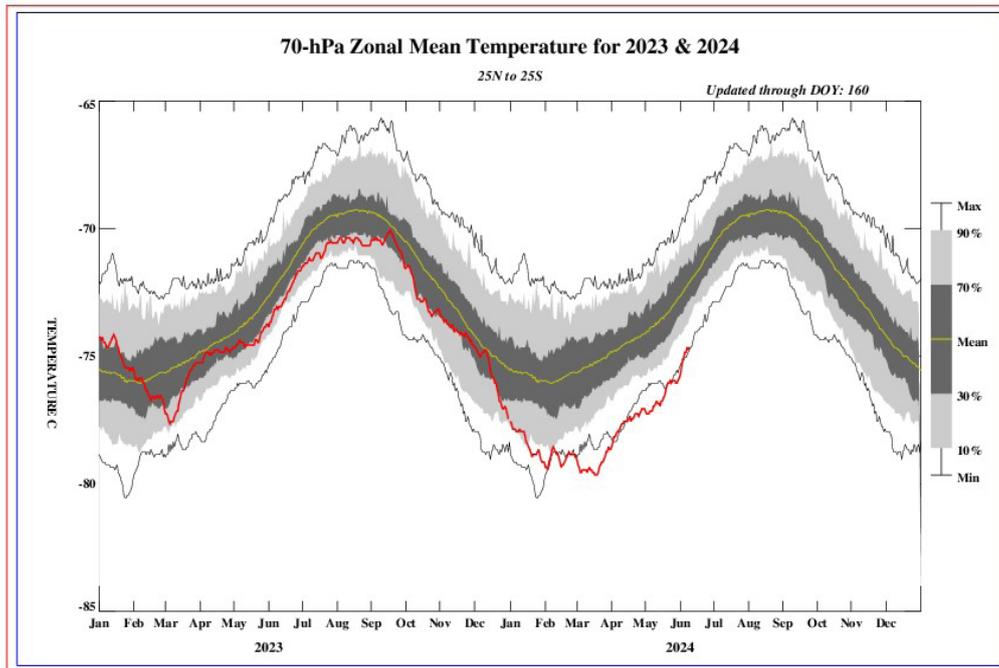
La variabilidad de la concentración de ozono en el nivel de 70 hPa, asociado a los cambios en la temperatura es una consecuencia del movimiento de traslación de la tierra con respecto al sol, así como a procesos de transferencia radiativa y reacciones fotoquímicas. Se suma también, el proceso de la circulación Brewer-Dobson, la Oscilación Quasi Bienal, así como a circulaciones de viento regionales a nivel de alta atmósfera. Se agrega el impacto que tuviera la concentración de vapor de agua debido a la erupción del volcán submarino Hunga Tonga en enero del 2022, ya que permite enfriar la atmósfera en ese nivel afectando las concentraciones de ozono atmosférico. Por otro lado, hay que destacar el impacto que tiene la emisión de sustancias agotadoras de ozono (elementos sustitutos) 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, pero físicamente "más cálido". La temperatura calculada en este mes, fue de -76.5°C .

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 240.4 UD, menor al mes anterior.



FIGURA N° 10

Comportamiento de la temperatura en la baja estratósfera para el mes de mayo 2024



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

Considerando la información de temperatura de la baja y media estratósfera, proveniente de la estación de altura de Junín, podemos decir lo siguiente:

La temperatura a nivel de 100 hPa promedio mensual fue de -78.4°C , mientras que a nivel de 70 hPa fue de -78.2°C , valores bastante cercanos con solo una diferencia entre ellas, de solo 0.2°C . Se podría decir que hay todavía una estrecha relación entre la alta tropósfera y la baja estratósfera en cuanto a intercambio de energía, especialmente en esta parte de la región tropical. Ver Figura 11.

A nivel de 50 hPa, la diferencia es mas notoria con una temperatura promedio del mes de -65.9°C .

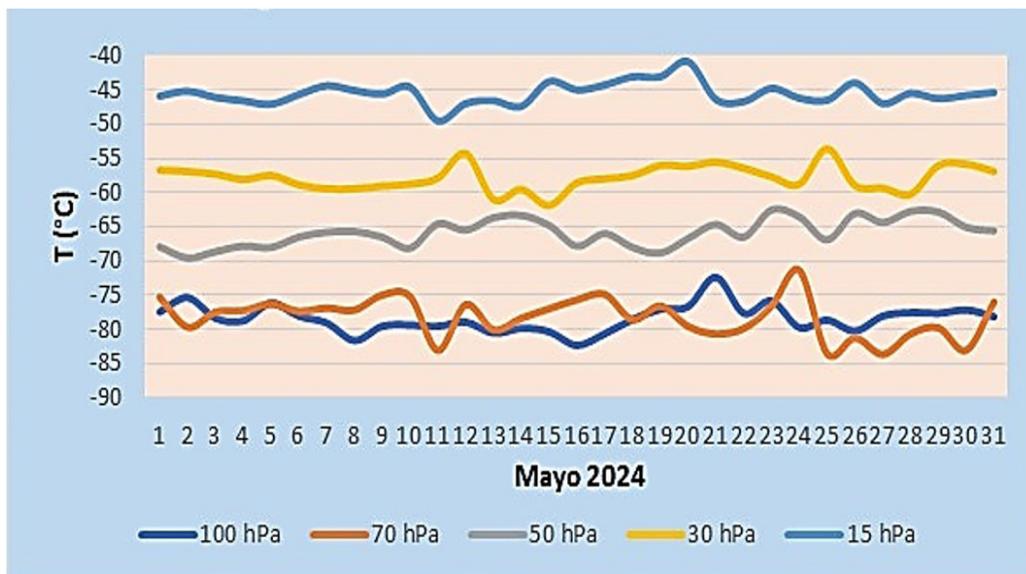
En la media estratósfera, a 30 hPa, la temperatura promedio registrada fue de -57.8°C para finalmente, a 15 hPa, la temperatura fuera de -45.4°C .

Cabe destacar que la temperatura a nivel de 70 hPa obtenida por la NOAA (-76.5°C) y la obtenida por un equipo de altura (-78.2°C), fueron algo cercanos, concluyéndose que a esas temperaturas las concentraciones de ozono continúan disminuyendo.

La tendencia del régimen térmico durante el mes, fue por lo general a un ligero aumento (proceso físico)..

FIGURA N° 11

Régimen térmico en la baja y media estratósfera de Junín



El comportamiento de temperaturas en el nivel de 70 hPa considerando todo el hemisferio sur en un día típico de mayo, es mostrado en la Figura 12 (University of Wyoming) en donde se aprecia que las temperaturas, específicamente, en el continente Antártico han registrado un valor promedio de -70°C , debido a condiciones astronómicas y meteorológicas. Las temperaturas en dicho continente paulatinamente continuarán mostrando decrementos debido al mayor establecimiento de la estación astronómica de otoño.

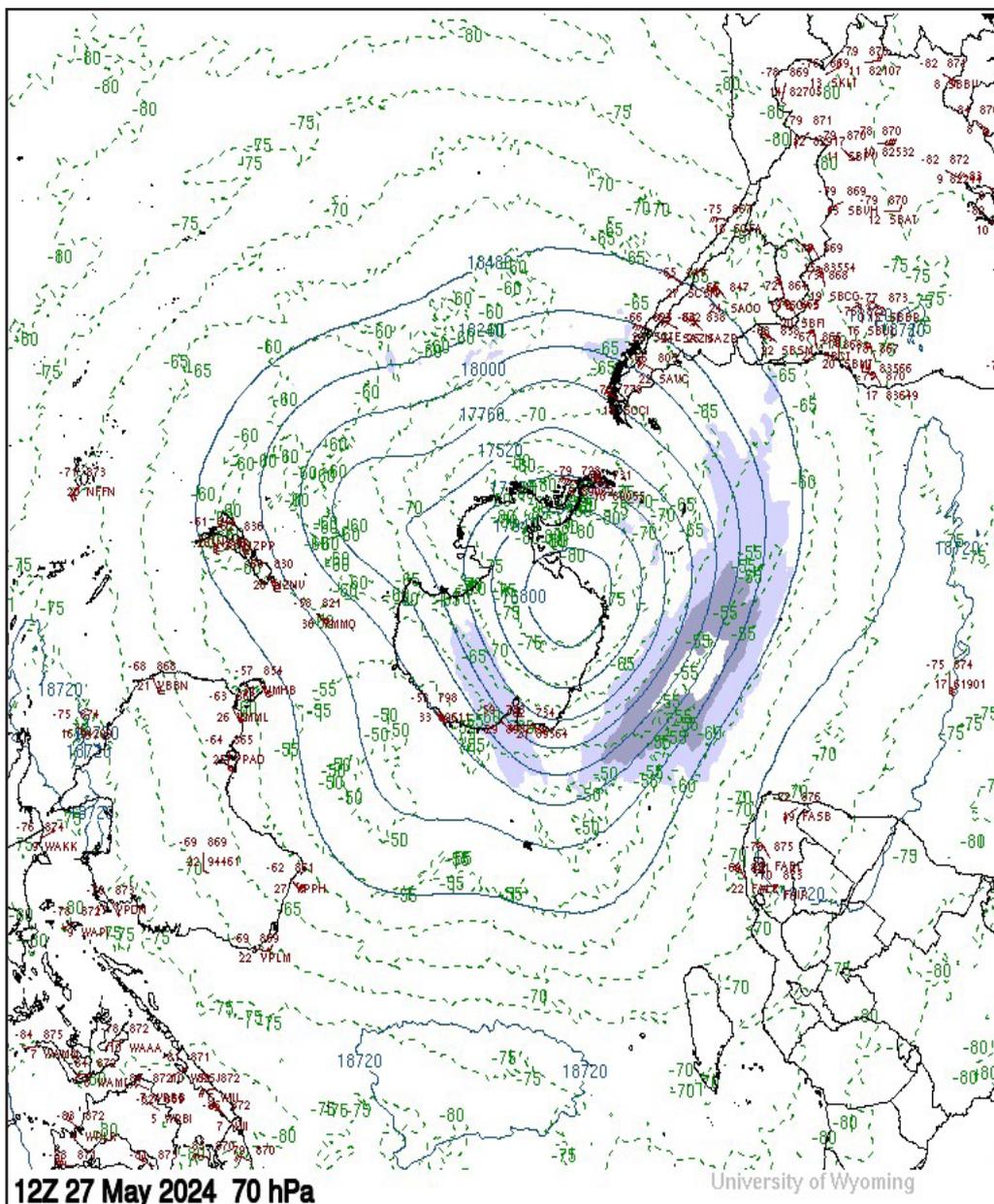
Cabe remarcar que la posición de la tierra con en relación con el sol (inclinación con respecto al plano ecuatorial) juega un papel importante en los procesos físico-químicos de la atmósfera. Asimismo, es importante señalar que aparte del factor astronómico, una disminución de la temperatura en ese nivel de la estratósfera (70 hPa) de la región tropical, se encuentra relacionada con una disminución en las concentraciones de ozono.

En latitudes bajas ($20^{\circ}\text{N} - 20^{\circ}\text{S}$), las temperaturas en este mes, en la atmósfera alta (baja estratósfera), como se ha mencionado anteriormente, han continuado registrando valores muy por debajo de sus normales climáticas, hasta por fuera de sus mínimos extremos, lo cual tiene injerencia en los procesos de transferencia radiativa.

Para el caso de nuestro país las temperaturas a este nivel han registrado un valor de -80°C (menor al mes pasado, más frío), siendo uno de los factores para que las concentraciones de ozono atmosférico disminuyan con una tendencia a continuar con el mismo comportamiento, aunados a circulaciones de viento zonales negativos con casi nada de aportes de ozono atmosférico.

FIGURA N° 12

Comportamiento de la temperatura en 70 hPa para el hemisferio sur (27 mayo 2024)



Fuente: Universidad de Wyoming

III.-CONCLUSIONES

1. El mes de mayo se caracteriza porque climáticamente las concentraciones de ozono sobre nuestro país (los medidos en superficie) han mostrado una disminución. El valor registrado fue de 240.4 UD como valor promedio. Este valor es menor a lo obtenido el mes pasado y permite concluir que las concentraciones de ozono durante gran parte del mes fueron bajas debido a la continua persistencia de los vientos zonales negativos, así como a la concentración de vapor de agua y una moderada humedad relativa, especialmente en las capas de 100 hPa y 70 hPa, especialmente en la sierra central.
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 236.4 UD a 245.2 UD, ligeramente menores al mes pasado. Esta disminución, ha sido explicado por el párrafo anterior, pero también se le suma a ello, el efecto de la relación de mezcla de ozono, el cual ha sido muy baja. A ello hay que sumarle la declinación total del periodo cálido a nivel global denominado Fenómeno El Niño Costero donde han desaparecido las advecciones húmedas, el cual repercute en la circulación de los vientos, así como en la transferencia radiativa.
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 mayo, se puede concluir que la máxima concentración de la misma, en la región tropical del hemisferio sur, se registró entre los 70 hPa y los 10 hPa (baja y media estratósfera) con valores que oscilaron entre 16 UD y 23 UD (ligeramente menor al mes anterior), mientras que en latitudes medias del hemisferio sur, la altura de las máximas concentraciones se dio entre los 100 hPa y 20 hPa con valores entre 16 UD y 23 UD. La variabilidad en las concentraciones de ozono de un mes a otro está influenciada principalmente por la circulación de los vientos, así como por factores descritos en los puntos 1 y 2.
4. El registro de concentraciones de ozono atmosférico en latitudes medias y altas del hemisferio norte, fueron menores al mes pasado con valores entre 25 UD a 30 UD, entre la alta tropósfera y media estratósfera. Aún continúan los procesos físicos de buena mezcla de ozono de latitudes medias a altas los cuales permiten la persistencia de la misma, aunados al impacto que ejerce la circulación Brewer-Dobson en esta parte del hemisferio. Hay que remarcar que la tendencia es a la disminución



de las concentraciones de ozono debido al mayor acercamiento de la estación de verano.

5. 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 observó concentraciones relativamente bajas en la sierra central (valores entre 3.70 ppmv y 3.90 ppmv), mientras que en la sierra sur osciló entre 3.76 ppmv a 3.90 ppmv (menor al mes de abril) para finalmente en la sierra norte, concentraciones entre 3.62 ppmv y 3.82 ppmv (ligeramente menor al mes pasado). Dichas concentraciones afectan grandemente el comportamiento espacial y temporal del ozono atmosférico sobre nuestras latitudes.
6. De acuerdo a la información real de viento obtenida para las diferentes capas de la estratósfera baja y media se concluye que uno de los factores que permite la disminución de las concentraciones de ozono sobre nuestras latitudes, específicamente sobre nuestro país, son los vientos provenientes del este, los cuales predominaron durante el mes de mayo.
7. Los mapas de ozono total atmosférico (provenientes de la plataforma OMI del satélite AURA de la National Aeronautics and Space Administration - NASA), muestran el comportamiento de ozono en nuestro país, cada vez menores al mes pasado, con valores que oscilaron entre 225 UD y 250 UD, durante una tercera parte del mes, en todo el país debido a las bajas temperaturas a nivel de estratósfera baja. Asimismo, debido al flujo esporádico de vientos del noreste se registró un ligero aumento especialmente en la región norte de la sierra y selva del Perú. La tendencia de temperaturas bajas se ha debido al mayor establecimiento de la estación de otoño austral.
8. En lo que concierne al comportamiento del régimen térmico en la baja estratósfera (70 hPa) se puede mencionar que, durante el mes de mayo, los valores se caracterizaron por una ligera disminución (-76.5°C), lo cual trajo como consecuencia una disminución ligera de las concentraciones de ozono en esta parte del continente.
9. Debido a que mayo es considerado como un mes donde el régimen térmico continua disminuyendo, los niveles de radiación solar también empiezan a descender debido a factores netamente astronómicos y atmosféricos, lo cual trae como consecuencia, que los procesos físicos-químicos especialmente en la estratósfera baja y media sean cada vez



menos dinámicos, permitiendo que se presenten circulaciones de vientos en latitudes bajas mayormente zonales afectando el aporte de ozono atmosférico hacia nuestro país.

10. El comportamiento de la temperatura en las diferentes capas de la estratósfera, realizadas con equipos de altura sobre la sierra central del Perú (departamento de Junín), permiten concluir que el acoplamiento de la alta tropósfera y baja estratósfera modula dicho régimen, por lo menos entre los 200 hPa, 100 hPa y 70 hPa. Por encima de los 50 hPa hasta toda la media estratósfera las temperaturas continúan descendiendo, permitiendo la disminución de las concentraciones de ozono atmosférico, por lo menos en nuestro país.
11. La declinación total del periodo cálido denominado Fenómeno El Niño Costero, ha permitido la desaparición de las advecciones húmedas, por lo menos en la región norte de nuestro país, trayendo como consecuencia que las concentraciones de ozono tengan una ligera tendencia a la disminución (persistencia de concentraciones de vapor de agua). Cabe remarcar que mientras mayor concentración de humedad en la baja y media estratósfera, mayor es la disminución de la concentración de ozono.
12. 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. Vannia Aliaga Nestares

valiaga@senamhi.gob.pe

Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico:

Ing. Jhojan Rojas Quincho

jprojas@senamhi.gob.pe

Análisis y Redacción:

Ing. Orlando Ccora Tuya occora@senamhi.gob.pe

Bach. Juan Tacza Ordoñez

Tco. Rosalinda Aguirre Almeyda

Tco. Julia Astudillo Capcha

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

Próxima actualización: 15 de julio de 2024



**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:**