

Marzo 2024
vol. 03

**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 especialmente en la estratósfera baja y parte de la media de la región tropical se ha mantenido, en los últimos 20 años, en comparación a su ritmo natural. Esto provoca cambios en la transferencia radiativa sobre esta región generando algunas modificaciones en los procesos de circulación atmosférica, el cual traería variaciones en los aportes de ozono atmosférico y su incidencia en un posible cambio climático.

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).



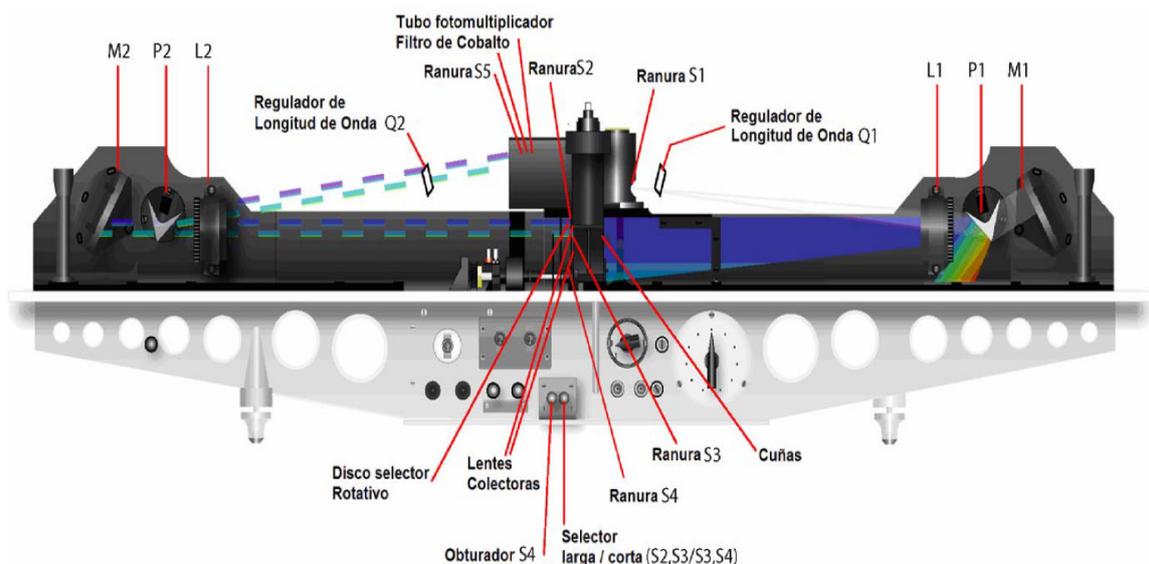
I.- CÁLCULO DEL OZONO ATMOSFÉRICO Y FUNCIONAMIENTO DEL ESPECTROFOTÓMETRO DOBSON

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 marzo la estratósfera baja de la región tropical ha presentado características térmicas variables (decrementos e incrementos) lo cual ha permitido que las concentraciones de ozono hayan presentado un ligero incremento con respecto al mes anterior, pero aun así por debajo de sus valores climáticos. Durante la primera quincena del mes, las temperaturas en el nivel de 70 hPa y 50 hPa registraron una disminución mientras que a partir de la segunda quincena se incrementaron, lo cual permitió una atmósfera “relativamente cálida”. A lo largo del mes empezaron a registrarse vientos quasi meridionales aportando moderadas concentraciones de ozono atmosférico trayendo como consecuencia su incremento sobre nuestras latitudes. En el caso de la alta tropósfera, los sistemas atmosféricos que gobiernan el tiempo sobre nuestro país, paulatinamente empiezan a trasladarse hacia el norte debido al inicio de la estación astronómica de otoño. Asimismo, se continua con la presencia del periodo cálido denominado Fenómeno El Niño Costero sobre el Pacífico oriental y central de América del Sur, pero cada vez con menor intensidad (disminución paulatina de las anomalías positivas de la temperatura de agua de mar) debido al incremento del Anticiclón del Pacífico sur, que permite mayor invasión de aguas frías hacia nuestras costas. La convección húmeda tiende a disminuir presentando poco efecto en la circulación de los vientos de la alta tropósfera y baja estratósfera. Estos procesos, aunados a otros, llegan a tener incidencia en las propiedades físicas de la baja estratósfera permitiendo obtener valores de ozono atmosférico ligeramente superiores 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 la finalización de la estación de verano, interactúan entre sí en las diferentes capas de la atmósfera. Siendo así, se analiza la capa de 70 hPa (día 29 de

marzo) dado de que es representativa de la baja estratósfera. A lo largo del mes, climáticamente, las concentraciones de ozono se incrementan en esta parte del continente debido a la aparición de flujos de viento quasi-meridional. En el presente mes, durante las primeras dos semanas, los vientos tuvieron un flujo zonal negativo debido a la formación de núcleos anticiclónicos tanto en el Pacífico Sur, en el Atlántico, así como en continente (no al mismo tiempo sino en diferentes fechas), los cuales permitieron que los vientos transportaran pocas cantidades de ozono atmosférico. Asimismo, a partir de la tercera semana del mes hasta la cuarta, los flujos de viento tuvieron una dirección quasi meridional de noreste los cuales aportaron concentraciones moderadas de ozono hacia latitudes bajas.

Por otro lado, en latitudes medias, del hemisferio sur, la circulación de vientos ha sido variable dada la aparición y desaparición de los sistemas anticiclónicos ya mencionados anteriormente.

En cuanto al régimen térmico podemos señalar lo siguiente: se ha observado nuevamente un comportamiento variable con disminución y aumento por lo menos en niveles bajos y medios de la estratósfera (100 hPa, 70 hPa, 50 hPa y 30 hPa), en el corredor de 20°N-20°S, con valores muy por debajo de sus valores climáticos (atmósfera más fría). 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 similares al mes pasado (a nivel promedio mensual), cuando en realidad debió de registrarse un incremento, reforzando, en cierta manera, lo ocurrido en la estratósfera baja a nivel de 70 hPa (obtenido de Weather Service de la University of Wyoming), con la continuidad de los vientos zonales negativos hasta la primera quincena del mes. Lo ocurrido a partir de la segunda quincena, ha tratado de equilibrar el déficit de ozono sobre nuestras latitudes 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 marzo a nivel de superficie, en el Observatorio de Vigilancia Atmosférica (OVA) Marcapomacocha se observó que el comportamiento horario de la concentración de ozono atmosférico en general, estuvo oscilando entre 238.0 UD y 250.7 UD (UD = Unidades Dobson), valores ligeramente superiores si se analizan en forma diaria, mientras que a nivel promedio mensual se ha mantenido similar al mes pasado.

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 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).

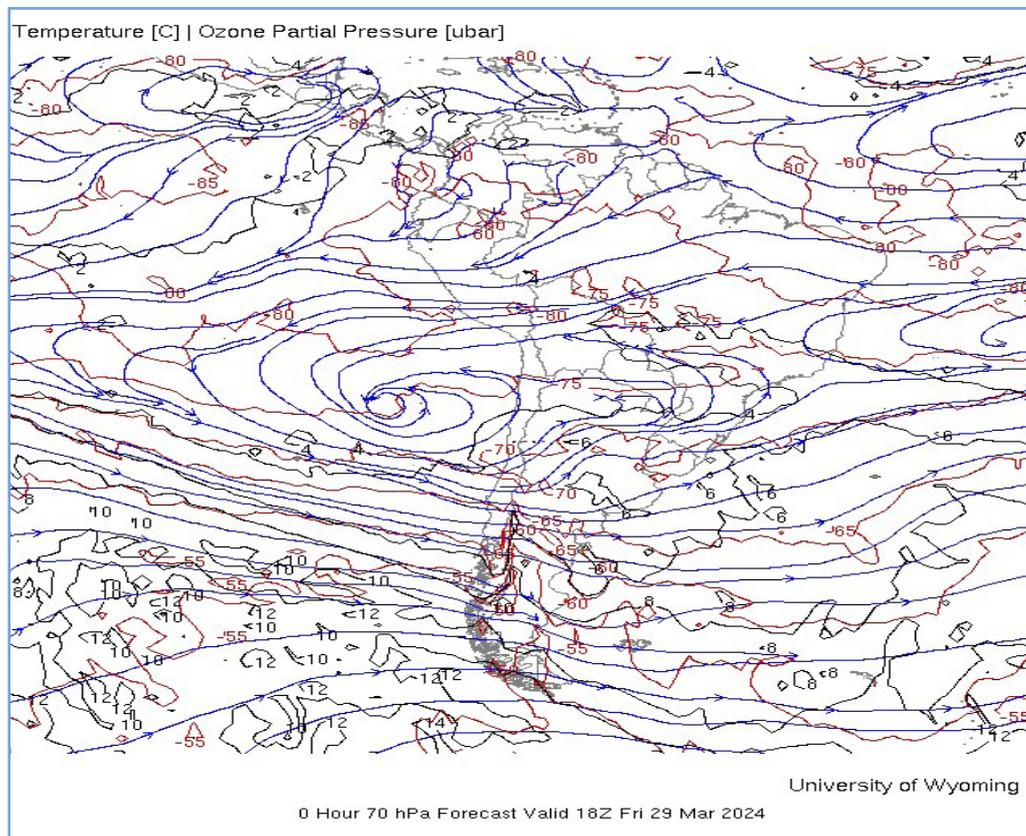


Este proceso físico, se enmarca en que durante las primeras horas de la mañana la incidencia de la radiación ultravioleta es baja, por ende las concentraciones de ozono son relativamente altas (debido al ozono residual), a medida que la intensidad de la radiación ultravioleta se incrementa en forma paulatina 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 (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, por lo general, un ligero descenso. En varias regiones se mantuvieron similares y en otras (pero en menor cantidad) aumentaron debido al efecto de la cobertura nubosa y la cantidad de aerosoles en la atmósfera. Se espera que en el mes siguiente dichos valores de radiación, empiecen a disminuir 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 (2000-2020) del mes de marzo oscila entre 241.1 UD y 246.9 UD aproximadamente (Figura 3), mientras que los medidos en el mes de marzo del presente año, oscilaron entre 239.0 UD y 247.1 UD.

En la figura se aprecia que los valores registrados en el presente mes, estuvieron un 81% por debajo de sus valores climáticos, mientras que un 19% por encima.

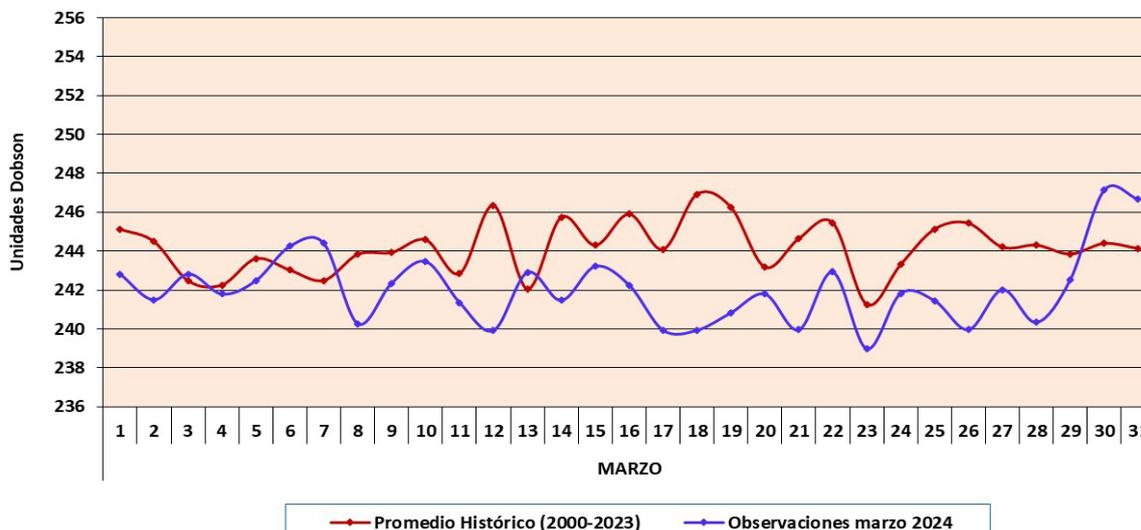
A pesar del ligero incremento, aun así, siguen por debajo de sus valores climáticos. Ahora bien, cuando se comparan ambas series se ha venido observando un comportamiento variable, con valores que en algunos momentos se acercan a sus normales y en otros más bien alejándose (a partir de la segunda quincena), lo cual puede atribuirse a los procesos tanto físicos como químicos, así como a los cambios en la circulación atmosférica (vientos del este en un inicio y luego vientos del noreste), ahora mucho más quizás por efectos, aunque cada vez menores, del Fenómeno El Niño Costero y probablemente 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 febrero ha registrado valores entre similares a ligeramente superiores.

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 marzo, en las capas bajas y medias de la estratósfera, las temperaturas se encuentran todavía muy por debajo de sus valores normales, aunque en la segunda quincena se incrementaron permitiendo que hay una mayor concentración de ozono atmosférico sobre nuestras latitudes.



FIGURA N° 3

Comportamiento temporal de la concentración de ozono atmosférico en el OVA Marcapomacocha. Marzo 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 242.0 UD inferior en 2.5 UD al promedio mensual multianual (244.5 UD).

Se debe tener presente que, en la región tropical durante los meses del verano austral, vale decir enero hasta marzo, las concentraciones de ozono continúan disminuyendo hasta el mes de enero para luego a partir del mes de febrero incrementar hasta el mes de marzo, debido a la circulación de masas de aire al nivel de baja estratósfera, así como también por efectos térmicos y fotoquímicos. Asimismo, 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 marzo, la continuidad de la presencia de masas de aire provenientes del este hasta la quincena del mes,

dificultó el incremento de las concentraciones de ozono, pero a partir de la segunda quincena se observa un ligero incremento de la misma.

Debido a que se continúa con el periodo cálido, aunque cada vez con menor intensidad e impacto, los procesos de advección húmeda tienden a disminuir, por lo que las concentraciones de ozono se han incrementado desde la segunda quincena del mes. A esto se le añade el flujo de vientos provenientes del hemisferio norte, los cuales permiten también el incremento de dichas concentraciones.

Por otro lado, 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 marzo los valores de ozono diario medidos estuvieron por debajo de lo registrado por el Espectrofotómetro Dobson. Para el caso de SUOMI/OMPS, ocurre que durante el 97% 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 24 UD como producto del tipo o forma de medición que realiza el satélite.

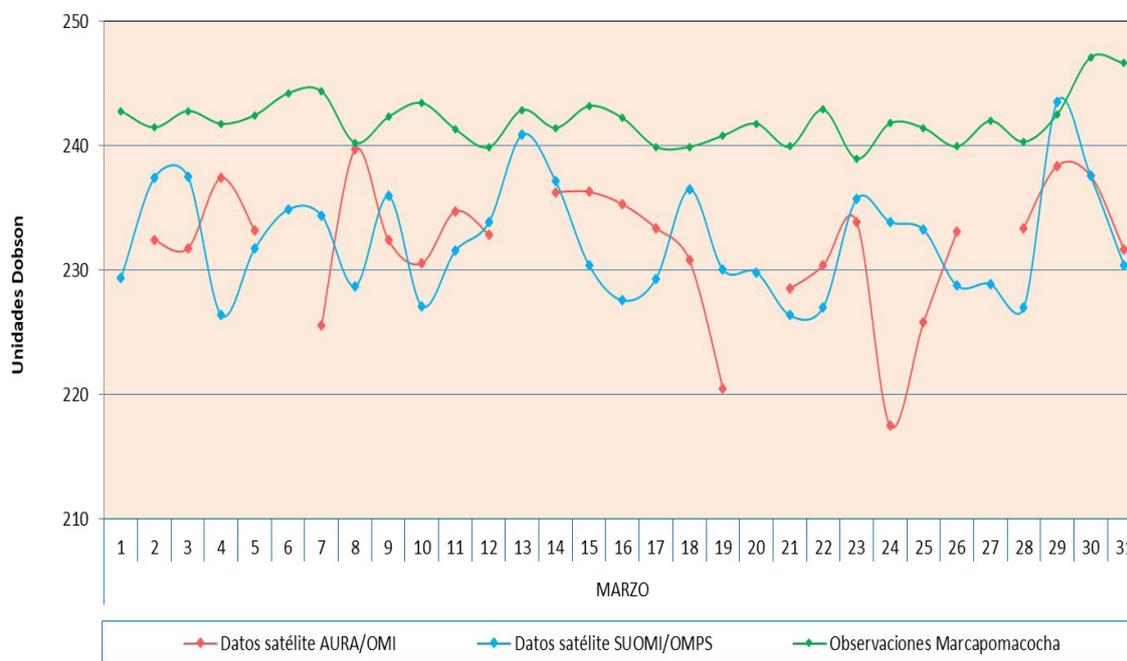
Cabe mencionar, que la tendencia de las concentraciones de ozono medidos en superficie ha registrado un ligero aumento en el tiempo, mientras que los medidos con los satélites, muestran más bien una tendencia variable.

El pronóstico, de acuerdo a la climatología, es que las concentraciones de ozono deben de empezar a disminuir desde el mes de abril 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 aumentaron, mucho más, los usos de las sustancias agotadoras de ozono, así como los sustitutos, asimismo, también ha sido 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 estos procesos el evento cálido que se viene registrando a nivel global, en el presente año, debido al Fenómeno de El Niño Costero, los cuales tienen cierta repercusión en el flujo de vientos verticales de tropósfera a estratósfera así como las implicancias que pudiera tener, en las concentraciones de ozono, la erupción del volcán, 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.

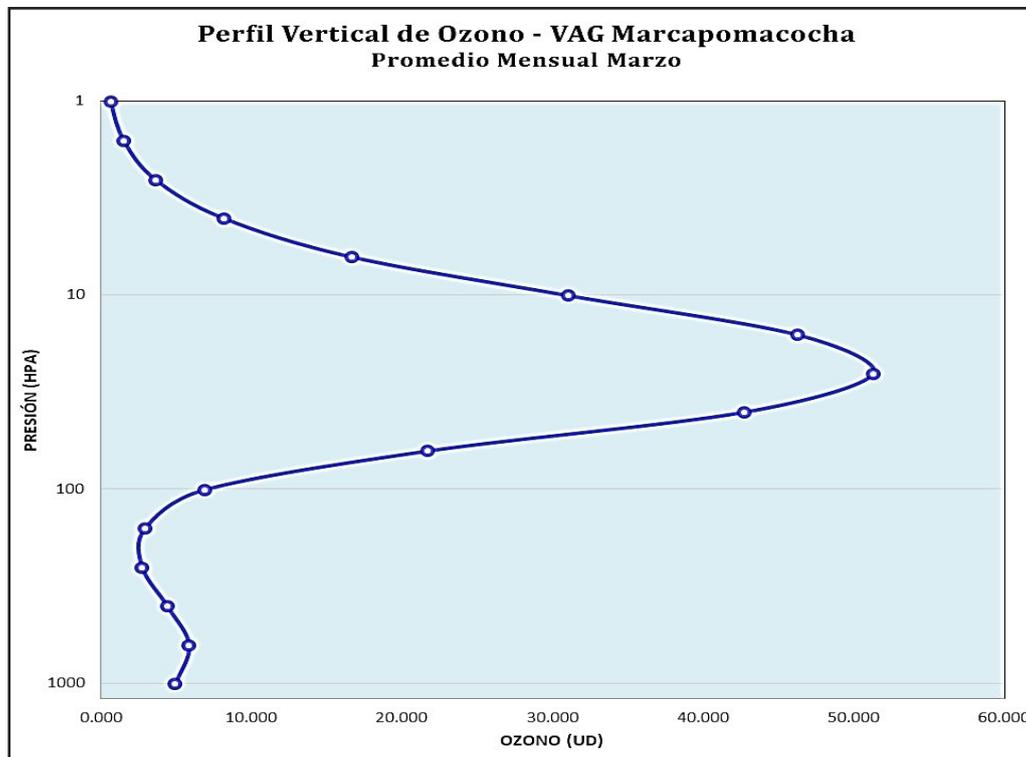
Teniendo en cuenta lo descrito líneas arriba y de acuerdo a la figura 5, obtenido de la National Aeronautics and Space Administration - NASA, plataforma OMPS, se ha podido observar el comportamiento típico del perfil vertical de ozono para el mes de marzo en la estación Marcapomacocha.

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 para destacar que las mayores concentraciones de ozono se registran en esta segunda capa de la atmósfera. Se observa que las concentraciones de ozono son ligeramente mayores a lo observado en el mes pasado, de acuerdo al perfil mostrado. Las concentraciones mayores la encontramos en la media estratósfera con valores entre 42 UD a 50 UD.

FIGURA N° 5

Perfil vertical de ozono atmosférico

Fuente: National Aeronautics and Space Administration - NASA



Según información de perfil vertical de ozono atmosférico para un día típico del mes de marzo (día 17) 2023 obtenida por Metop-C/GOME-2, muestra para el hemisferio norte concentraciones altas, cuyos valores han oscilado entre 27 UD y 40 UD (ligeramente mayores al mes pasado) entre la baja y media estratósfera (el área de cobertura latitudinal de estas concentraciones altas se dio entre 35N°-90°N). Cabe mencionar que actualmente dicho hemisferio se encuentra en invierno (hasta el 21 de marzo para luego pasar a la estación de primavera), registrándose concentraciones relativamente moderadas de ozono en latitudes bajas, debido a que el régimen de temperatura empieza a incrementarse paulatinamente tanto en la estratósfera baja como media, así como a vientos quasimeridionales. 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 (15 UD a 25 UD) en latitudes bajas del hemisferio norte fue de 70 hPa y 10 hPa, mientras que en latitudes bajas del hemisferio sur (27 UD a 15 UD) la altura fue de 50 hPa y 8 hPa. Por otro lado, en latitudes medias del hemisferio sur también se registraron concentraciones relativamente moderadas con valores entre 15 UD y 23UD, pero a una altura entre 100 hPa y 20 hPa. Finalmente, en latitudes altas la altura de las concentraciones altas, se dio entre 120 hPa y 30 hPa con valores entre 13 UD y 23 UD. En esta temporada, las concentraciones de ozono promedio mensual, deberían de haber registrado un mayor incremento, pero no fue así, por tercer mes consecutivo. Probablemente se le siga atribuyendo 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 30 hPa y 10 hPa con valores entre 14 UD y 27 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.

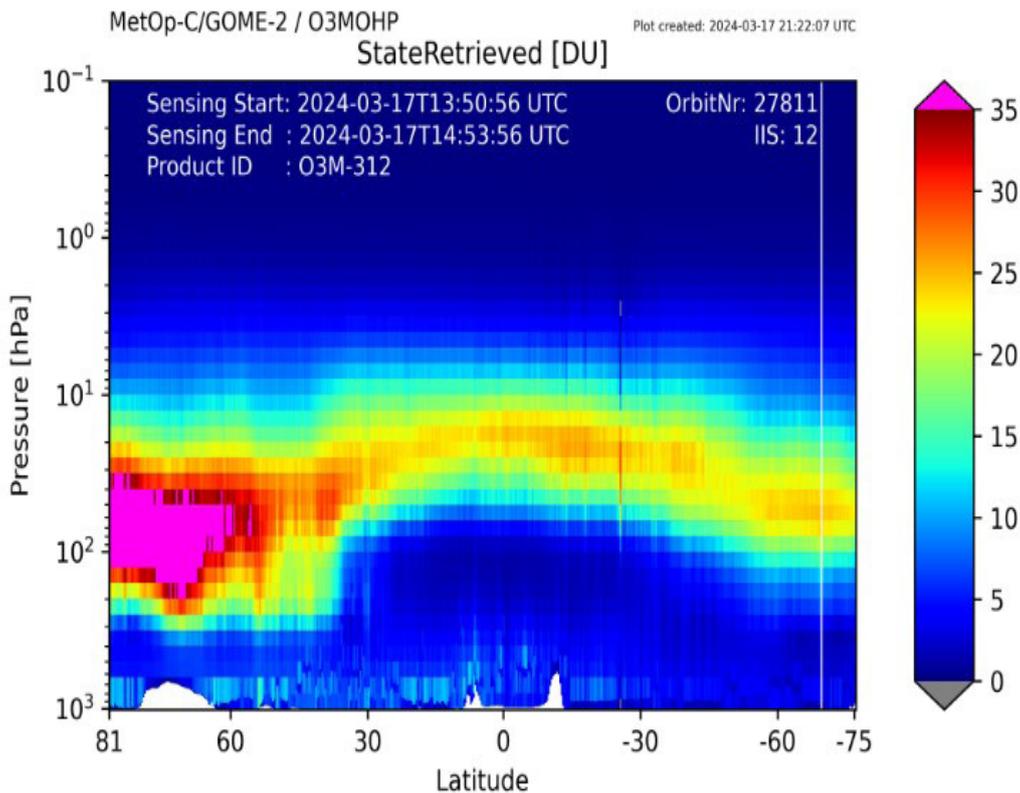
Debe considerarse que la forma que adquiere la distribución vertical es típica



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 marzo, en latitudes medias y altas del hemisferio norte las concentraciones de ozono registradas oscilaron entre 400 UD y 500 UD (similares al mes anterior) debido al mayor intercambio de ozono entre esas latitudes (mayor relación de mezcla). Cabe mencionar que 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.

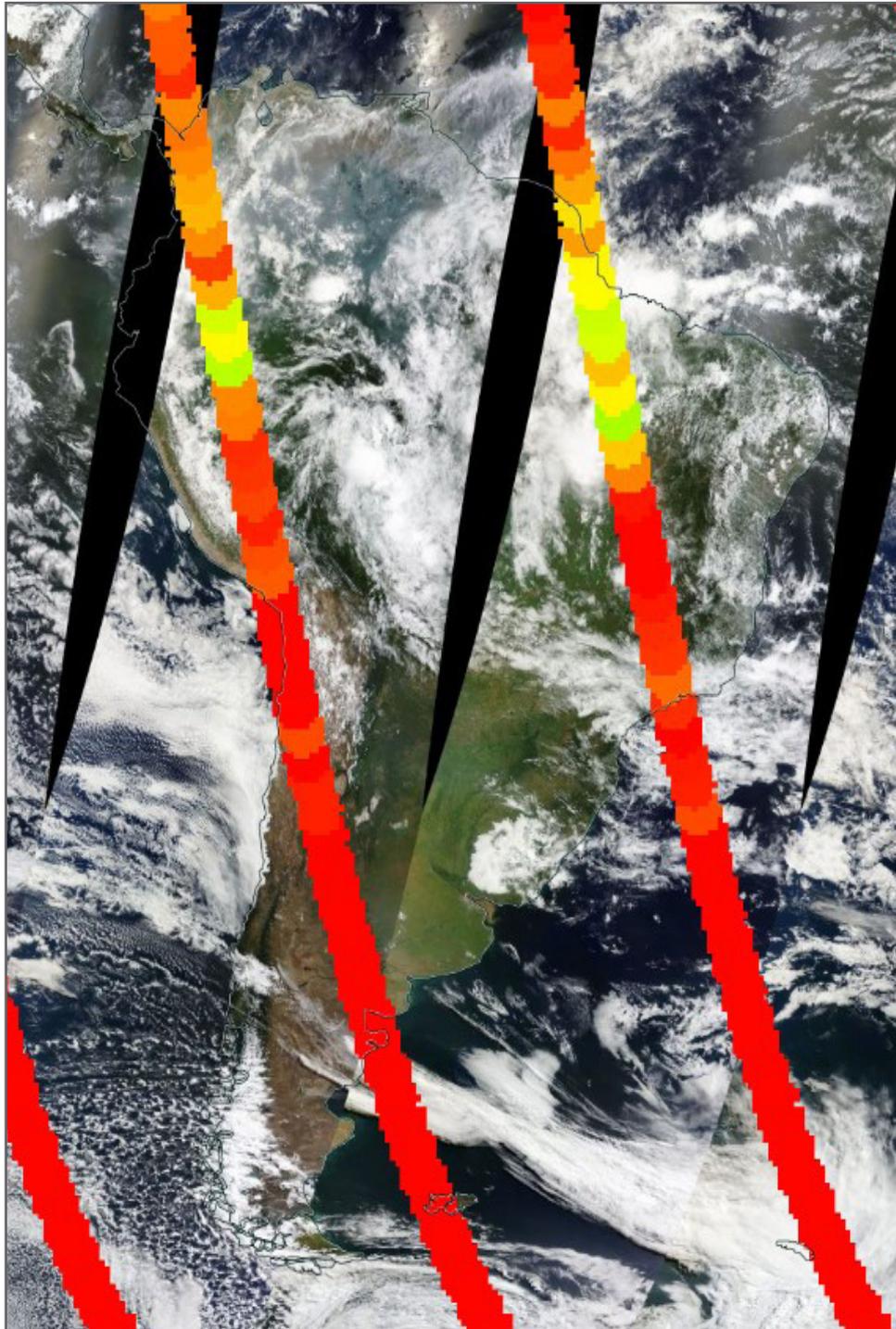
Hay que recalcar que a nivel global aún se viene registrando un periodo cálido (aunque bastante variable en tiempo y espacio) conocido como Fenómeno El Niño Costero, los cuales podrían inyectar (por procesos de advección húmeda) vapor de agua hacia niveles bajos de la estratósfera, lo cual podría tener repercusiones en las concentraciones de ozono.

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 (29 marzo 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 altas. Por ejemplo, en el sur del país las concentraciones oscilaron entre 4.23 ppmv a 4.39 ppmv, mientras que en la sierra central valores entre 3.90 ppmv y 4.09 ppmv. En el lado de la región andina norte, concentraciones entre 3.63 ppmv y 3.70 ppmv. En la región de la costa norte se registraron concentraciones de vapor de agua entre 3.54 ppmv y 3.57 ppmv, mientras que en el centro entre 3.57 ppmv y 3.60 ppmv. Estas condiciones aunadas a los de circulación en ese nivel estarían permitiendo un ligero aumento 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



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 mayores a lo registrado en el mes de febrero, debido al aporte de ozono sobre nuestras latitudes provenientes de las masas de aire quasimeridionales. Por el lado del Pacífico se volvió a registrar concentraciones de ozono alto, similares al mes de febrero con valores entre 250 UD y 275 UD, especialmente frente a las costas de Lima, Ica, Arequipa, Moquegua y Tacna, así como esporádicamente frente a la costa de Ancash y La Libertad. En todo el mes, sobre gran parte de nuestro país (cubriendo mayor área que el mes pasado), las concentraciones de ozono oscilaron entre 250 UD y 275 UD.

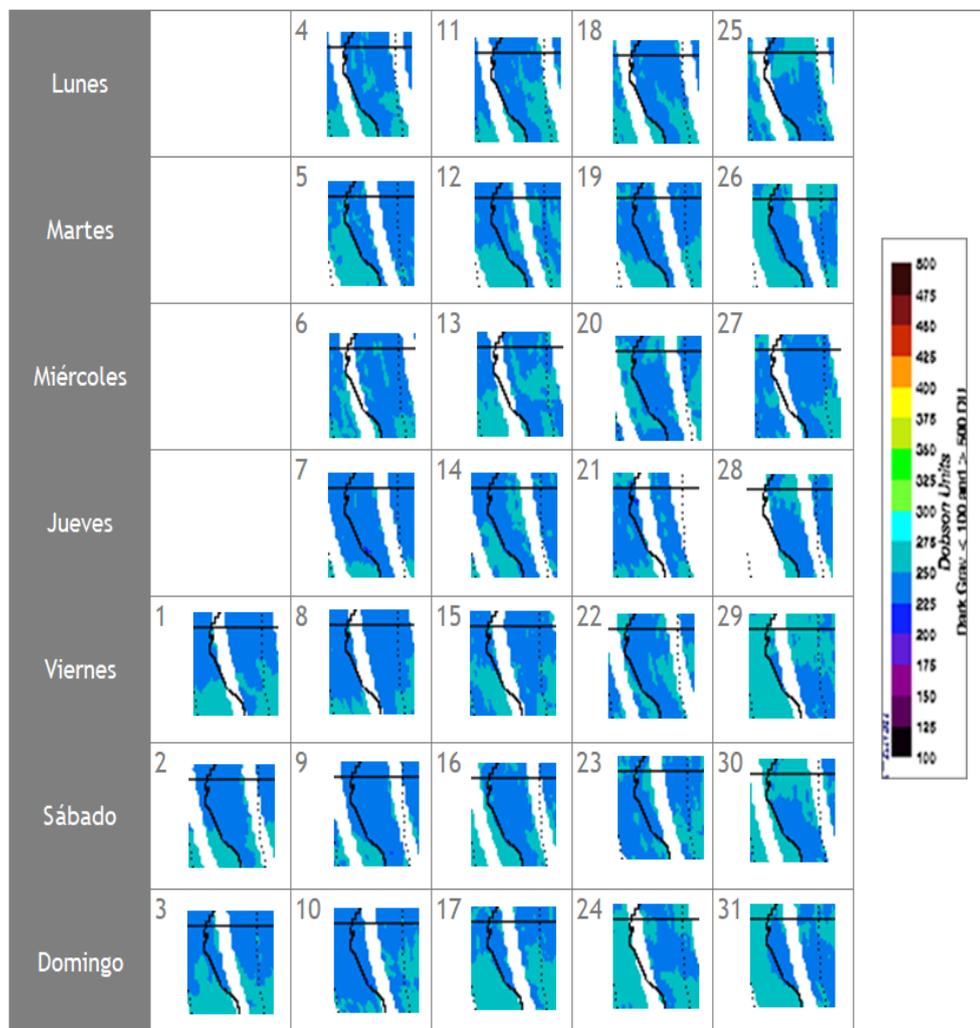
Cabe remarcar que entre los días 01, 02, 05, 07, 08, 09, 16, 19, 26, 27, 28 y 31 de marzo se registraron concentraciones moderadas de ozono que abarcaron todo el país, mientras que durante los días 03, 04, 06, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 29 y 30, las concentraciones de ozono se incrementaron con valores entre 250 UD y 275 UD.

Es importante mencionar que, en este mes, se empezaron a registrar ingresos de masas de aire con ozono desde latitudes bajas del hemisferio norte hacia el hemisferio austral (dicho ingreso se observó durante trece días, traduciéndose en un ligero incremento en las concentraciones de ozono en el corredor tropical. Asimismo, en el mes de marzo, climatológicamente se registra el primer máximo de concentraciones de ozono sobre nuestras latitudes, los cuales se traducen todavía en altos niveles de radiación ultravioleta aunados estos a otros factores meteorológicos y ambientales.

FIGURA N° 8

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

Fuente: Satélite AURA



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, así como otros fenómenos que ocurren en forma casi periódica (Fenómeno El Niño o La Niña).

En la Figura 9 se muestra la distribución temporal de la temperatura desde el mes de enero 2023 hasta el mes de marzo 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), ha mostrado un alejamiento de sus valores climáticos (pero siempre con temperaturas hacia la baja) hasta la quincena del mes para luego a partir de la segunda quincena incrementar su valor con una tendencia a acercarse a sus normales diarias, tal como se puede apreciar en la figura, permitiendo un “ligero calentamiento” del aire. Debido al comportamiento térmico del aire en ese nivel, las concentraciones de ozono lograron registrar valores entre similares a ligeramente superiores a nivel diario, pero con una tendencia a incrementarse en la última quincena del mes. Durante el mes de marzo, las temperaturas, observadas en las capas bajas y medias de la estratósfera continuaron persistiendo por debajo de sus valores normales, con tendencia a un ligero incremento, mientras que en la estratósfera alta el régimen térmico tuvo un comportamiento al ascenso, pero al igual que las dos capas anteriores, todavía por debajo de sus normales.

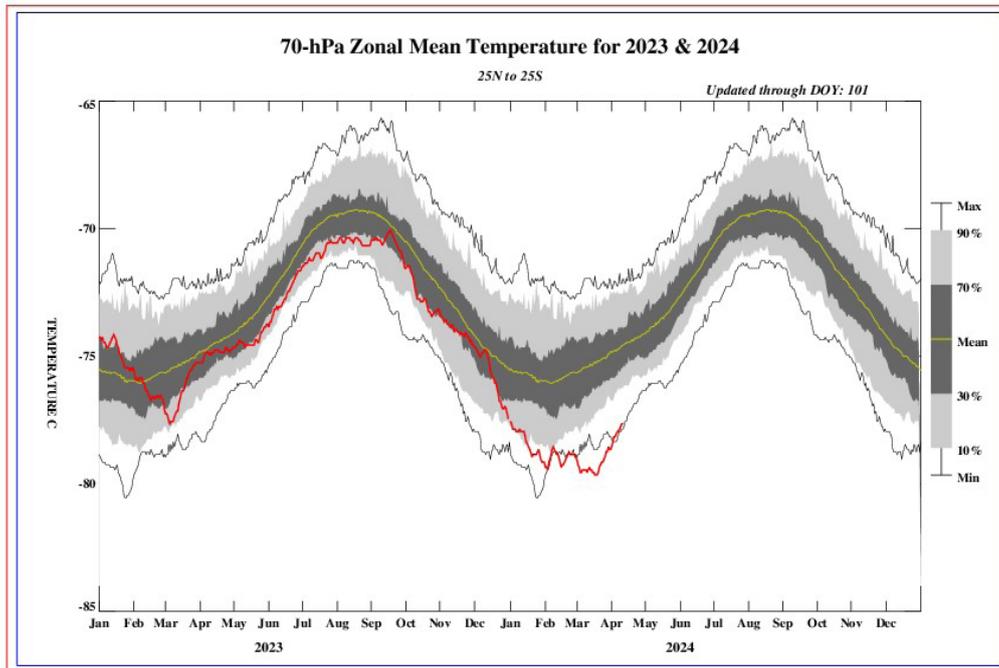
La variabilidad de la concentración de ozono en el nivel de 70 hPa, asociado a los cambios en la temperatura es una consecuencia del movimiento de traslación de la tierra con respecto al sol, así como a procesos de transferencia radiativa y reacciones fotoquímicas. Se suma también, el proceso de la circulación 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 -74.5°C, menor en valor numérico al mes pasado, pero físicamente “más cálido”. La temperatura calculada en este mes, fue de -78.5°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 242.0 UD, igual al mes anterior.



FIGURA N° 9

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



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 10 (University of Wyoming) en donde se aprecia que las temperaturas, específicamente, en el continente Antártico han registrado un valor promedio de -50°C , debido a condiciones propias del mes. Las temperaturas en dicho continente paulatinamente mostrarán decrementos debido al establecimiento de la estación astronómica de otoño.

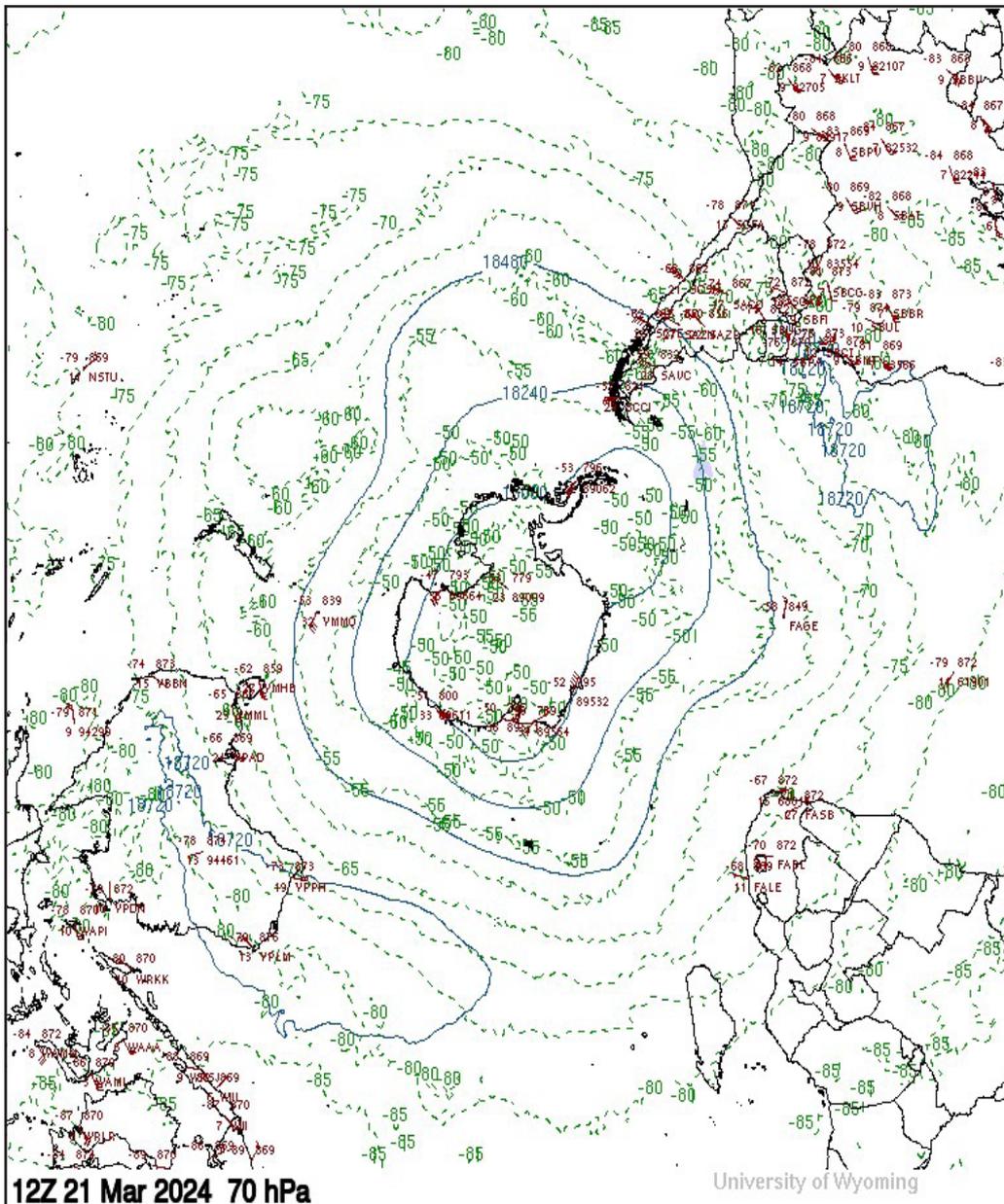
Cabe remarcar que la posición de la tierra con respecto al sol (inclinación con respecto al plano ecuatorial) juega un papel importante en los procesos físico-químicos de la atmósfera. Asimismo, es importante señalar que aparte del factor astronómico, una disminución de la temperatura en ese nivel de 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 y media estratósfera), como se ha mencionado anteriormente, han registrado valores por debajo de sus normales climáticas, pero con tendencia al ascenso, permitiendo una ligera disminución en los niveles de radiación UV en gran parte del país.

Para el caso de nuestro país las temperaturas a este nivel han registrado un valor de -80°C (similar al mes pasado), siendo uno de los factores para que las concentraciones de ozono atmosférico se mantengan o presenten una tendencia al alza, aunados a circulaciones de viento quasi meridionales con aporte de moderadas concentraciones de ozono.

FIGURA N° 10

Comportamiento de la temperatura en 70 hPa para el hemisferio sur (21 marzo 2024)



Fuente: Universidad de Wyoming

III.-CONCLUSIONES

1. El mes de marzo se caracteriza porque climáticamente las concentraciones de ozono sobre nuestro país (los medidos en superficie) continúan incrementándose paulatinamente, para obtener el primer pico alto del año, el cual se da en este mes. El valor registrado fue de 242.0 UD como valor promedio. Este valor prácticamente es igual a lo obtenido el mes pasado y permite concluir que las concentraciones de ozono durante las primeras dos semanas fueron bajas debido a los vientos zonales negativos, así como a la concentración de vapor de agua. A partir de la tercera semana del mes, los vientos tuvieron influencia de vientos quasi meridionales, lo cual permitió un moderado incremento de la misma. Todos estos procesos incidieron en una moderada concentración de ozono en el mes de marzo.
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 239.0 UD a 247.1 UD, ligeramente mayores al mes pasado. Este incremento, ha sido explicado por el párrafo anterior, pero también se le suma a ello, el efecto térmico en la baja estratósfera, donde la tendencia, a partir de la segunda quincena del mes, fue a un ligero incremento, así también suma el impacto del periodo cálido a nivel global denominado Fenómeno El Niño Costero a través de advecciones húmedas (cada vez menores), 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 marzo, se puede concluir que la máxima concentración de la misma, en la región tropical del hemisferio sur, se registró entre los 50 hPa y los 8 hPa (media y alta estratósfera) con valores que oscilaron entre 15 UD y 27 UD (ligeramente mayor 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 15 UD y 23 UD mientras que en latitudes altas la altura de las concentraciones altas se dio entre 120 hPa y 30 hPa con valores entre 13 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 algo superiores al mes



pasado con valores entre 27 UD a 40 UD, entre la baja y alta estratósfera. Continúan los procesos físicos de buena mezcla de ozono de latitudes medias a altas los cuales permiten el incremento de la misma aunados al impacto que ejerce la circulación Brewer-Dobson en esta parte del hemisferio.

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 3.90 ppmv y 4.09 ppmv), mientras que en la sierra sur osciló entre 4.23 ppmv a 4.39 ppmv (mayor al mes de febrero) para finalmente en la sierra norte, concentraciones entre 3.63 ppmv y 3.70 ppmv (mucho menor al mes pasado). Dichas concentraciones afectan grandemente el comportamiento espacial y temporal del ozono atmosférico sobre nuestras latitudes.
6. 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, entre similares a mayores al mes pasado, con valores que oscilaron entre 225 UD y 250 UD en un primer momento debido a las bajas temperaturas a nivel de estratósfera baja y en un segundo momento con valores entre 250 UD y 275 UD a partir de la segunda quincena del mes debido al incremento en el régimen térmico. La tendencia de temperaturas bajas se debe al inicio de la estación de otoño austral a partir del 21 de marzo.
7. En lo que concierne al comportamiento del régimen térmico en la baja estratósfera (70 hPa) se puede mencionar que, durante el mes de marzo, los valores se caracterizaron por un ligero aumento (-78.5°C), lo cual trajo como consecuencia un incremento ligero de las concentraciones de ozono durante las dos últimas semanas del mes.
8. Debido a que marzo es considerado como un mes intermedio entre el verano y el otoño, los niveles de radiación solar empiezan a descender debido a factores netamente astronómicos lo cual trae como consecuencia, que los procesos físicos-químicos especialmente en la estratósfera baja 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.
9. El periodo cálido denominado Fenómeno El Niño Costero, cada vez va en descenso debido a factores meteorológicos y oceanográficos,



continúa influyendo en los procesos atmosféricos tanto a nivel de tropósfera como estratósfera baja permitiendo cierta variabilidad en las concentraciones de ozono atmosférico debido a la ocurrencia aún de advecciones húmedas, así como al régimen térmico y vapor de agua.

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. 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 mayo 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:**