

Marzo 2020
Vol.03

BOLETÍN MENSUAL
VIGILANCIA DEL
OZONO
ATMOSFÉRICO EN LA
ESTACIÓN VAG
MARCAPOMACOCHA



Introducción

La reducción de la concentración de ozono en la región Antártica es bastante conocida el cual ocurre entre fines del invierno y el inicio del verano. En los últimos años se ha notado una recuperación de la capa de ozono en esta región signo de que los países van tomando conciencia de que es importante adecuarse al Protocolo de Montreal, minimizando el uso de las sustancias que agotan la capa de ozono como los clorofluorocarbonos.

En este último periodo se ha notado un calentamiento en la estratósfera de la región Antártica también es preocupante de que, en este invierno se haya notado en la región Ártica la aparición de un “agujero de ozono” debido a la formación de un vórtice polar, el cual ha sido más fuerte de lo habitual, permitiendo la reducción de la concentración de ozono incluso a niveles inferiores a lo registrado en la región Antártica. Otro factor es atribuido a las bajas temperaturas en la estratósfera donde se encuentra la mayor concentración de ozono en la atmósfera.

El vórtice polar que provoca que el aire frío se quede en las zonas polares debido a las bajas presiones podría explicar la aparición de este “agujero de ozono” en dicha región.

Debido a estos procesos que ocurren en la atmósfera y tienen incidencia también en la región tropical, 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.

Asimismo, es importante no sólo la información de superficie sino también la información proveniente de los satélites porque estamos ante un problema en evolución. Se requiere que estemos pendientes de forma constante.

ANTECEDENTES

El SENAMHI cuenta con una estación de Vigilancia Atmosférica Global (VAG) de Marcapomacocha ubicada en la sierra central del país (Provincia de Yauli, departamento de Junín), 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" W. 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 la recientemente Chacaltaya (Bolivia) son las que reportan información de las propiedades físicas y químicas de la atmósfera con la finalidad de conocer el comportamiento actual de la atmósfera en esta parte del continente.

Las actividades de la estación VAG de 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 dicha estación.

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.

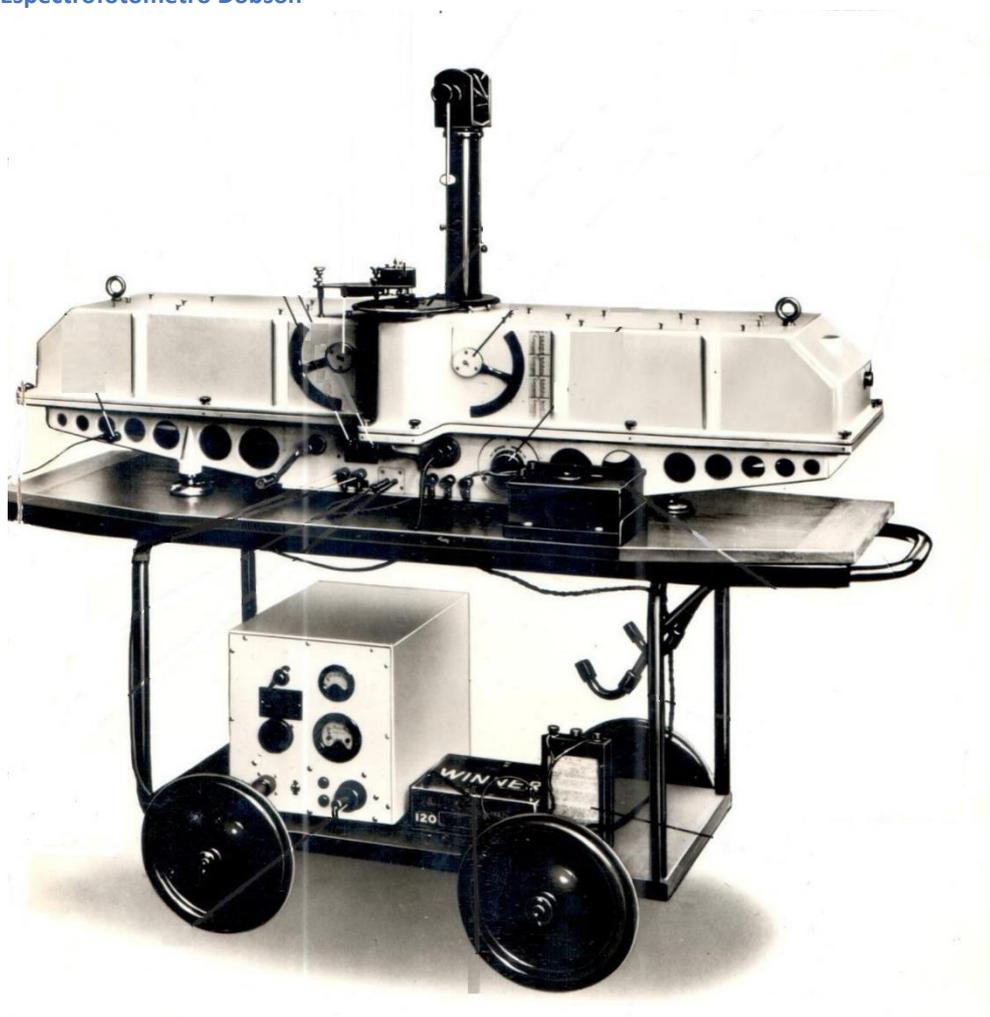
En el futuro la estación VAG de Marcapomacocha también podrá realizar mediciones de algunos gases de efecto invernadero como por ejemplo el dióxido de carbono (CO₂) y carbono negro (hollín).

I. METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL OZONO ATMOSFÉRICO

1. MEDICIÓN EN SUPERFICIE

Con un instrumento denominado Espectrofotómetro Dobson (Figura 1), es posible realizar mediciones sobre la cantidad de ozono total Atmosférico, 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. Se llamarán a estas longitudes de ondas (LDO) seleccionadas, LDO: "A", "C" y "D".

FIGURA N°1
Espectrofotómetro Dobson



La luz entra al instrumento a través de la ventana que se encuentra en la parte superior del mismo y selecciona solo dos haces (de luz) el cual se controla manualmente basándose en el método de diferencia de absorción en la banda ultravioleta de Huggins en donde el ozono presenta una fuerte absorción. El principio de la medida depende de la relación de intensidad de la luz del sol a dos longitudes de onda. La combinación de pares usados es a sol directo (doble par AD) 305.5 nm ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m}$) a 325.4 nm; 317.6 nm a 339.8 nm.

En el primer par, la primera longitud de onda (305.5 nm) es atenuada en la alta atmósfera por el ozono y reduce su intensidad al llegar a la superficie de la tierra, mientras que la segunda longitud de onda (325.4 nm) no es absorbida por el ozono, por lo tanto, a través de una diferencia comparativa de las intensidades, podemos determinar el ozono total.

2. MEDICIÓN 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 hiperespectrales 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

El mes de marzo es un mes de transición entre el verano y el otoño. Los sistemas atmosféricos que gobiernan el tiempo sobre nuestro país empiezan a desplazarse, muy lentamente hacia el hemisferio norte. En niveles altos de la troposfera aún se manifiestan sistemas atmosféricos como la Alta de Bolivia el cual es un sistema de alta presión en altura que permite el flujo y traslado de humedad de la región amazónica hacia nuestro país con circulación de vientos de este a oeste los cuales afectan en cierta medida los niveles de ozono atmosférico en nuestro país debido aún a la alta concentración de vapor de agua.

En niveles de baja estratósfera (a nivel de 70 hPa) se ha venido observando (según el Modelo GFS) que si bien hay una predominancia de los flujos zonales (de este a oeste), también se han notado flujos de aire meridionales provenientes del hemisferio norte con mayor continuidad en este mes, los cuales han tenido injerencia especialmente sobre nuestro país en varios días del mes trayendo como consecuencia un ligero aumento en las concentraciones de ozono. Los sistemas anticiclónicos desarrollados se han manifestado ahora sobre territorio brasileño mayormente, así como también en el lado argentino y uruguayo (Figura 2).

Con el fin de reforzar lo descrito en el párrafo anterior se menciona que del monitoreo realizado en el mes de marzo 2020 en la estación de Vigilancia Atmosférica Global de Marcapomacocha se observó que el comportamiento horario de la concentración de ozono atmosférico en general estuvo oscilando entre 241.2 (unidades Dobson) y 248.9 UD.

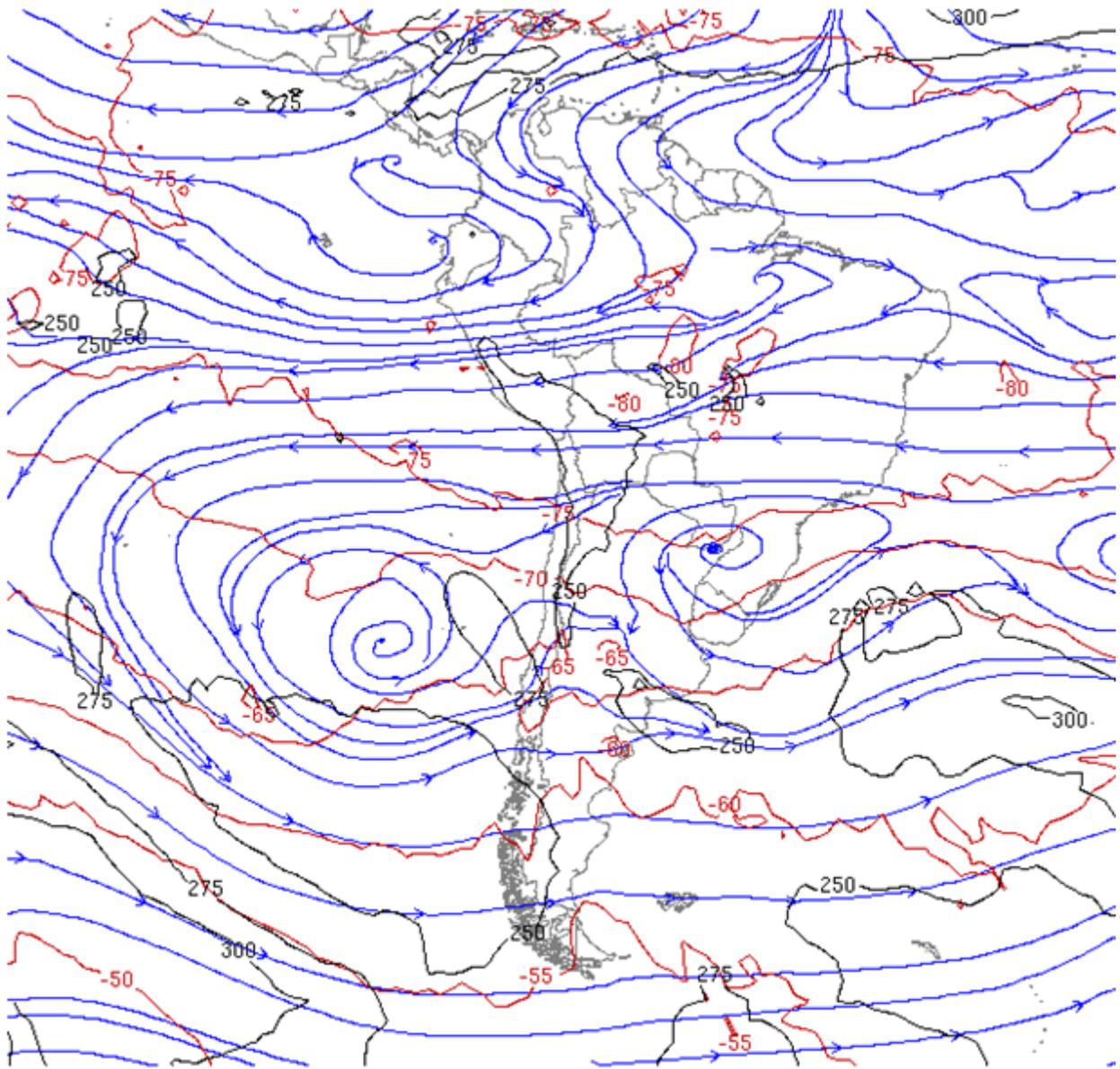
En las primeras horas del día las concentraciones de ozono son altas y a medida que transcurren las horas hasta llegar al mediodía los valores empiezan a disminuir para luego en horas de la tarde volver a incrementarse. A veces el comportamiento es algo variable tanto en la mañana como en la tarde, pero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

Este proceso físico, se enmarca en que durante las mañanas la incidencia de la radiación ultravioleta es baja y por ende las concentraciones de ozono son relativamente altas, a medida que la intensidad de la radiación ultravioleta se incrementa en forma paulatina hacia el mediodía donde los valores son altos, permite una reducción del ozono y en horas de la tarde a medida que el sol va llegando al ocaso (disminución de la intensidad de la radiación solar) las concentraciones de ozono vuelven a incrementarse. Este comportamiento horario también va a depender de otros factores como los ambientales (efectos residuales de ozono a nivel de tropósfera) y meteorológicos (transporte de ozono). Un punto importante que remarcar es el proceso de formación y destrucción del ozono por efectos fotoquímicos, a medida que la intensidad de la radiación solar se incrementa dicha actividad es mayor. Asimismo, los procesos de circulación y transporte son mayores.

FIGURA N°2

Flujo de masas de aire provenientes mayormente del oeste. 24 de marzo 2020

Temperature [C] | Total ozone [DU]



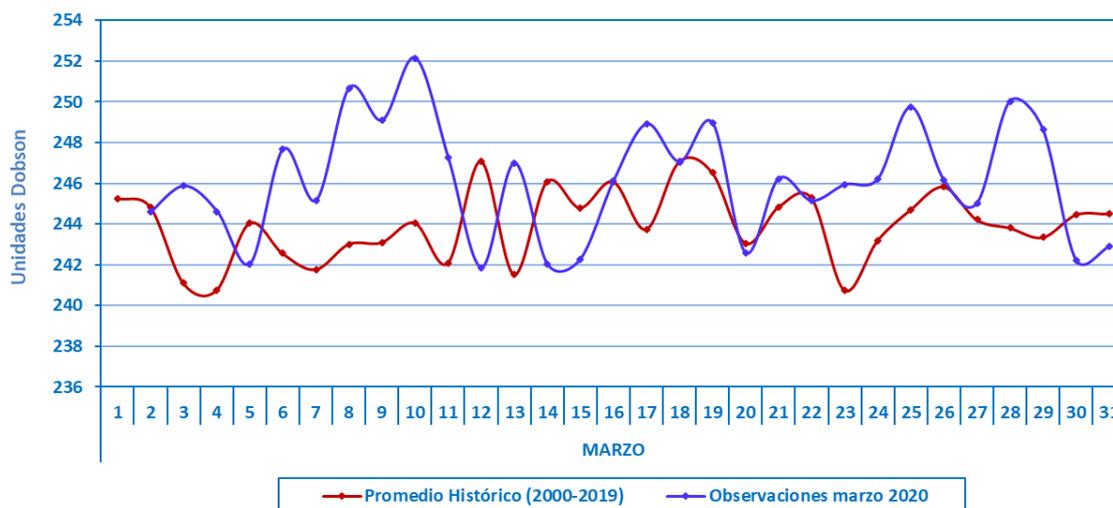
University of Wyoming

0 Hour 70 hPa Forecast Valid 18Z Tue 24 Mar 2020

El comportamiento de la concentración de ozono atmosférico promedio diario mensual multianual (2000-2019) del mes de marzo oscila entre 240.7 UD y 247.1 UD aproximadamente (Figura 3), mientras que los medidos en el mes de marzo 2020, oscilan entre 241.9 UD y 252.2 UD. En la figura 3 se aprecia que existe cierta desviación entre el promedio diario multianual con respecto al registrado en el mes de marzo 2020 especialmente en la primera y tercera década del mes, mientras que en la segunda década los valores son en cierta manera algo similares. En líneas generales el comportamiento durante el mes entre ambas series fue diferente.

FIGURA N°3

Comportamiento temporal de la concentración de ozono atmosférico en la Estación VAG Marcapomacocha. Marzo 2020.



En ese aspecto, la climatología del ozono en la estación VAG de Marcapomacocha, permite observar que durante el año se presentan dos picos, uno en el mes de marzo con un valor de 244.7 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 240.7 UD y 241 UD respectivamente. El promedio mensual de ozono en el presente mes fue de 244.2 UD mayor en 1.1 UD al promedio mensual multianual.

Durante los meses de verano en la región tropical se forma y destruye más ozono por efecto de la mayor intensidad de la radiación ultravioleta, 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), permitiendo el déficit de ozono atmosférico en latitudes bajas.

En este mes de marzo se ha notado, comparándolo con la climatología del ozono, un aumento en las concentraciones de esta, dando a entender, en cierta manera, que se han presentado flujos de viento en la estratósfera baja, provenientes del hemisferio norte, que permitieron el transporte de masas de aire con contenidos de ozono hacia latitudes bajas del hemisferio sur.

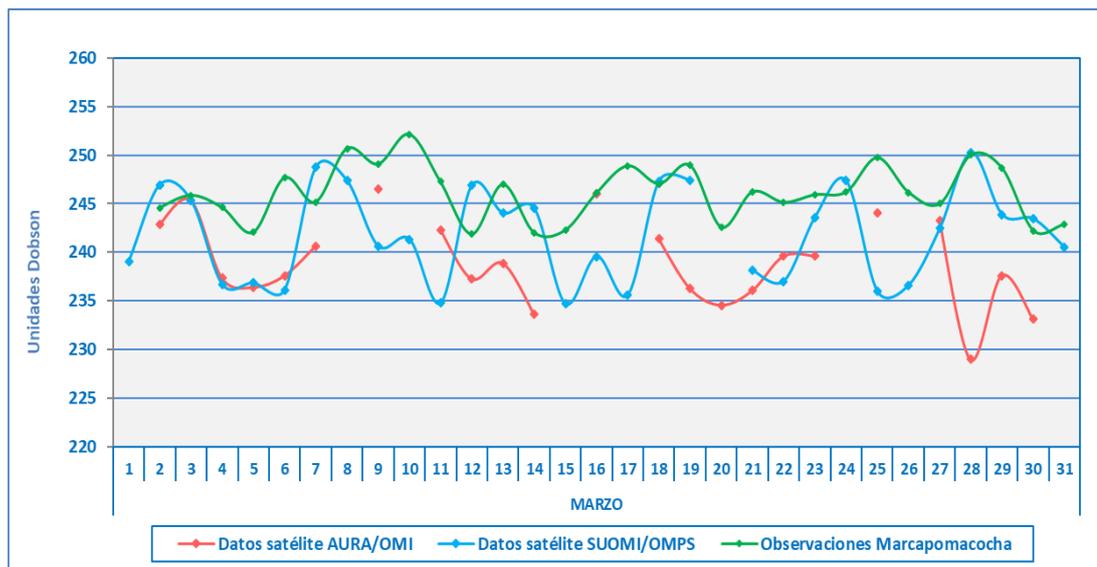
Al realizar la comparación de los datos de ozono atmosférico provenientes de los satélites AURA (plataforma OMI) y SUOMI (plataforma OMPS) con lo registrado en superficie, se puede observar nuevamente el desfase entre ellos. Con respecto a la información proveniente del AURA/OMI, durante el 100% de días del mes de marzo los valores de ozono diario medidos estuvieron por debajo de lo registrado por el Espectrofotómetro Dobson, mientras que, con respecto al SUOMI/OMPS, en 73% de días del mes, los valores de ozono registrados también estuvieron por debajo de lo registrado por el Espectrofotómetro Dobson, Figura 4.

De este análisis podemos decir que existen días donde las diferencias entre los valores registrados por los satélites y el medido en superficie, son bastante altas en el orden de 13 a 21 UD, mientras que, comparando sólo los dos satélites, ambos muestran un cierto equilibrio salvo 4 días del mes donde las diferencias han estado entre 10 UD y 21 UD.

Cabe precisar, que los datos de los satélites, muestran desde hace un tiempo, una tendencia a mantener valores de ozono con alta variabilidad en el tiempo (menos estable), a comparación de los medidos en superficie, siendo las concentraciones de ozono provenientes de satélites menores a los medidos en superficie.

FIGURA N°4

Comparación de ozono atmosférico proveniente de satélites versus información de superficie marzo 2020.



Perfil Vertical de Ozono Atmosférico

En la figura 5 se muestra el promedio mensual del perfil vertical de ozono atmosférico de la estación VAG Marcapomacocha obtenido del satélite SUOMI (plataforma OMPS), donde se muestra que las mayores concentraciones de ozono se dan en la estratósfera con un poco más del 91% del ozono total en la atmósfera.

A nivel de tropósfera las concentraciones de ozono son demasiado bajas alrededor de casi el 9% del ozono total. En los primeros niveles (hasta los 640 hPa) se observó concentraciones de ozono residual que permitieron su

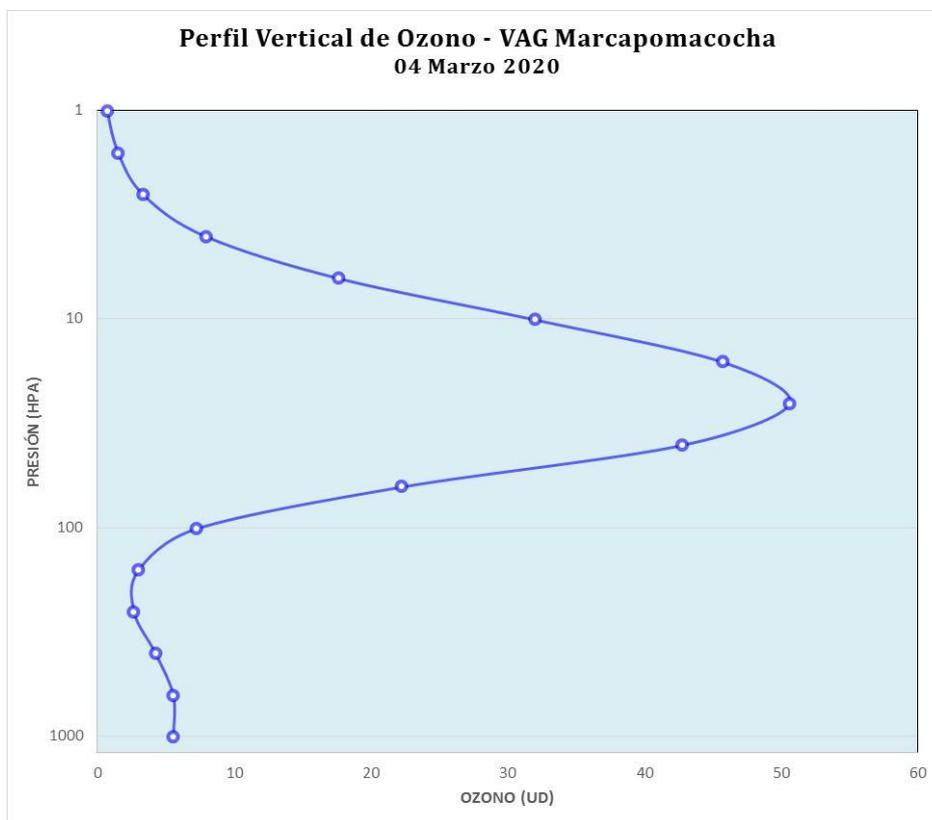
incremento, por encima de ese nivel las concentraciones disminuyeron hasta los 250 hPa y 160 hPa, para luego presentar un incremento vertiginoso hasta registrar un máximo a los 25 hPa aproximadamente.

En la misma figura 5, se puede notar que la altura en donde se encuentra la máxima concentración de ozono se da aproximadamente a los 28 km de altura, entre la baja y media estratósfera.

Debe considerarse que la forma que adquiere la distribución vertical es típica en la atmósfera, conociendo que las concentraciones pueden variar de acuerdo a la latitud, de la estación astronómica y las condiciones meteorológicas.

FIGURA N°5

Perfil vertical de Ozono – Estación VAG Marcapomacocha



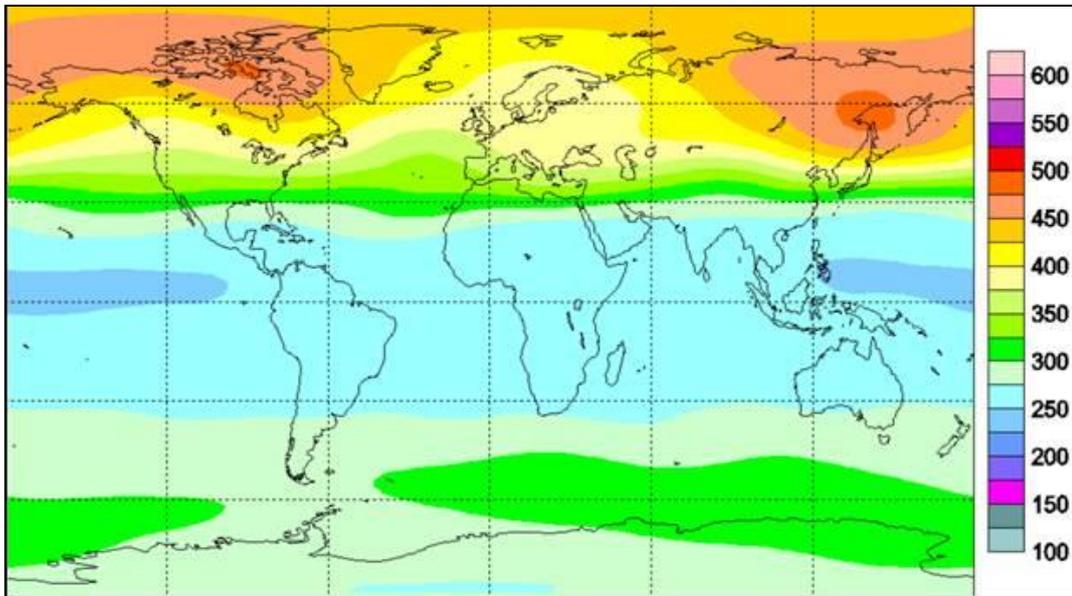
En cuanto a los reportes globales provenientes del satélite se puede mencionar lo siguiente:

- En la Figura 6 se observa el mapa climático (1978 - 1988) de ozono total atmosférico global para el mes de marzo, en la cual se aprecia una disminución del corredor de bajas concentraciones de ozono para dar paso a un aumento en sus concentraciones entre las latitudes 20°N - 30°S aproximadamente, con valores que oscilan entre 250 UD a 275 UD. Las bajas concentraciones se observan en el océano pacífico con valores que oscilan entre 225 UD a 250 UD, los cuales se presentan entre las latitudes de 0°-8°N. Según el mapa, nuestro país (0°-18°S),

muestra concentraciones de ozono con valores entre 250 UD a 275 UD (concentraciones de ozono un poco mayores al mes de febrero viéndolo en un contexto general). En latitudes mayores, en ambos hemisferios, las concentraciones de ozono superan tranquilamente valores de 300 UD.

FIGURA N°6

Mapa Climático de ozono total atmosférico (1978 – 1988) para el mes de marzo.

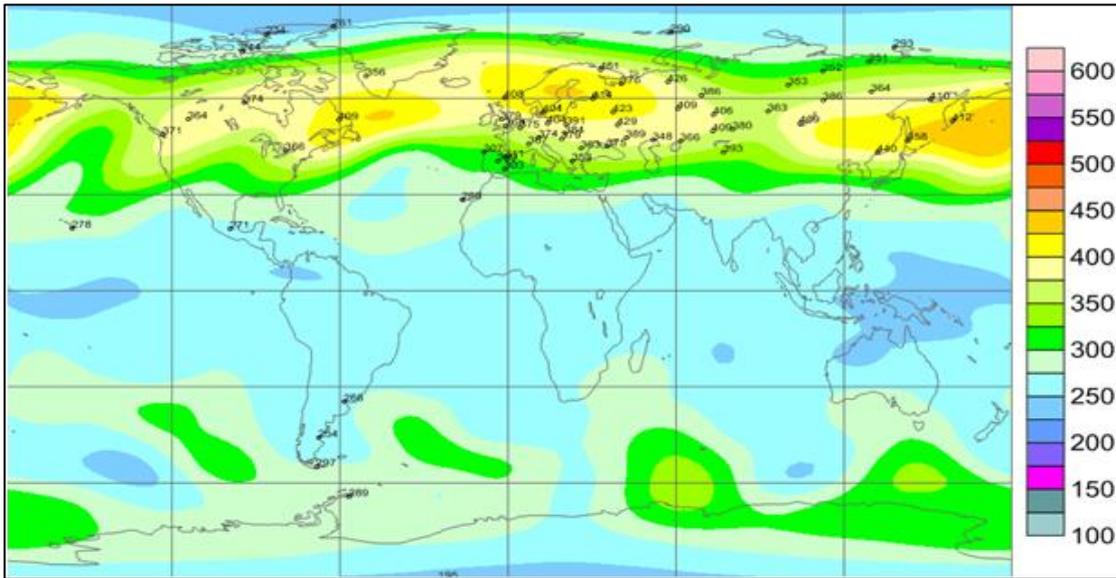


Fuente: <https://exp-studies.tor.ec.gc.ca/clf2/e/normalozone.html#gl>

- En la Figura 7 se aprecia la distribución mensual de ozono a nivel global, correspondiente al mes de marzo de 2020 y en ella ya no se observa el corredor de bajas concentraciones de ozono, sino que más bien se han incrementado. En el norte de Australia se observan bajas concentraciones de ozono del orden de los 225 UD a 250 UD así como en algunos países asiáticos.
- Asimismo, en latitudes medias del hemisferio sur se observan concentraciones de ozono mayores a los de latitudes bajas, debido a la subsidencia de masas de aire ricos en ozono provenientes del cinturón tropical (Circulación Brewer-Dobson). Las concentraciones de ozono están en el orden de los 300 UD a 350 UD, mientras que hacia latitudes altas (cerca al continente Antártico) las concentraciones se incrementan un poco más. Por otro lado, en el hemisferio norte, a partir de los 30° N hasta los 80°N, las concentraciones de ozono son bastante altas con valores que oscilan entre 300 UD a 450 UD (algo parecido al mes de febrero). Entre los 80° N hacia el polo las concentraciones son relativamente bajas, parecidas a los de latitudes bajas, los cuales oscilan entre 225 UD a 275 UD.

FIGURA N°7

Mapa de ozono total atmosférico para el mes de marzo 2020

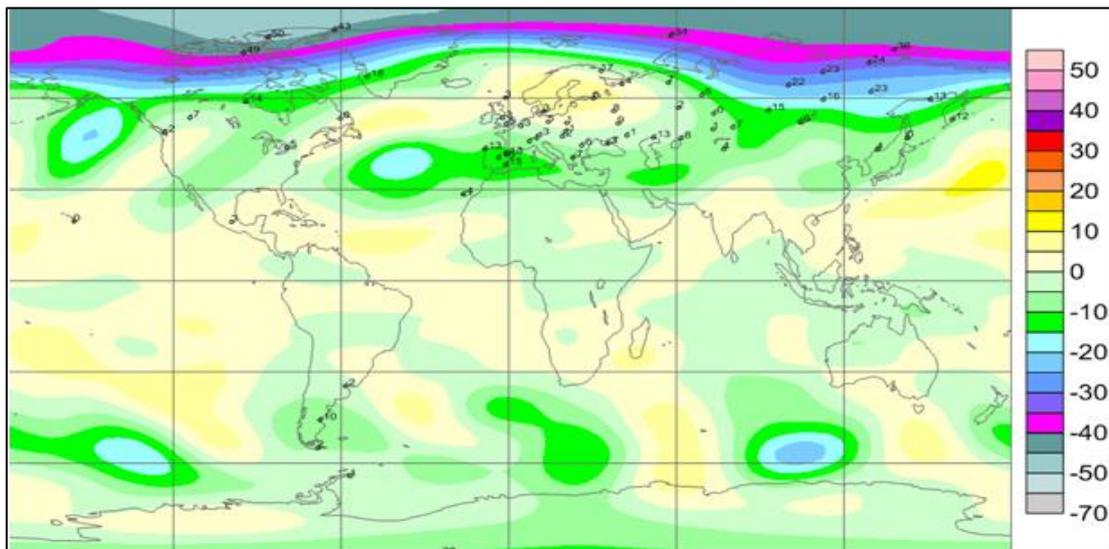


Fuente: <https://exp-studies.tor.ec.gc.ca/clf2/e/normalozone.html#gl>

- En cuanto a la desviación media del mes, para el caso de Perú, las concentraciones de ozono estuvieron cercanos a sus valores normales con una desviación de +5%, en el norte y centro del país, mientras que en el sur tuvo una desviación de -5%. Figura 8.

FIGURA N°8

Desviación media (%) del ozono total atmosférico para el mes de marzo 2020

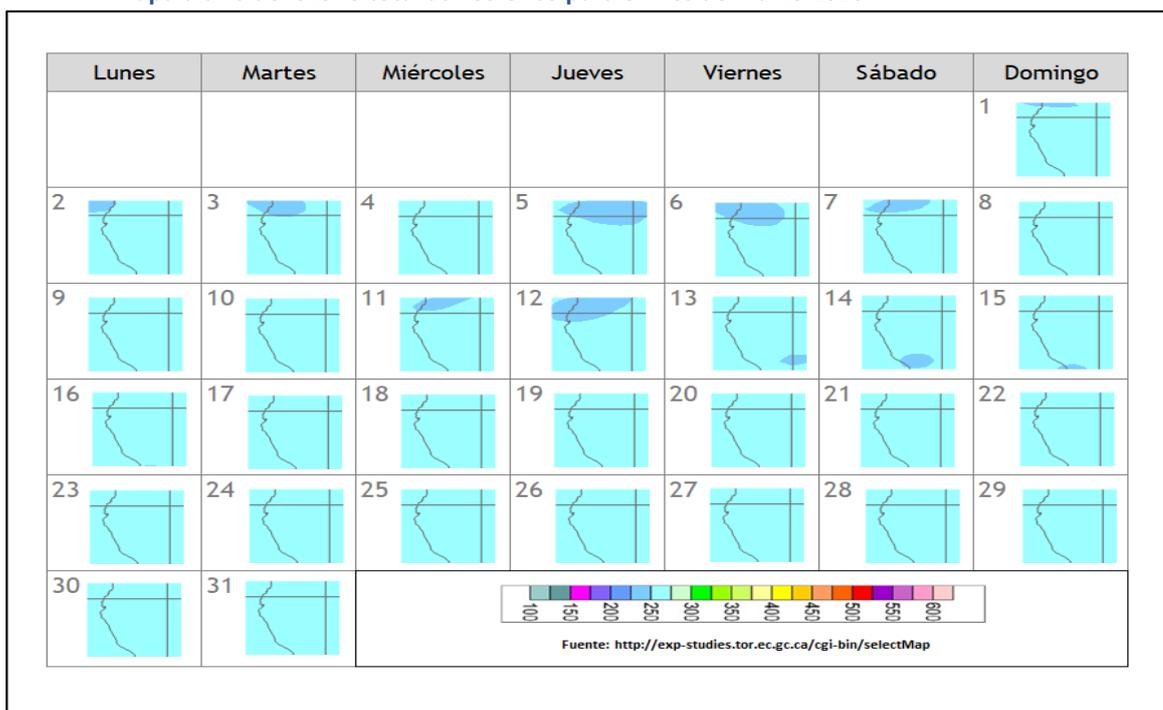


Fuente: <https://exp-studies.tor.ec.gc.ca/clf2/e/normalozone.html#gl>

- En cuanto al análisis de los mapas en forma diaria provenientes del Centro mundial de datos de ozono y radiación ultravioleta con sede en Canadá (Figura 9), podemos mencionar que, para el caso de nuestro país, las concentraciones de ozono atmosférico registrados llegaron a ser altos en todo el país. Los días 5, 6 y 12 de marzo se registraron concentraciones bajas de ozono en el norte de nuestro país con valores que oscilaron entre 225 UD a 250 UD. Asimismo los días 13 y 14 esas mismas concentraciones se registraron en el sur del país.

FIGURA N°9

Mapa diario del ozono total atmosférico para el mes de marzo 2020.



TEMPERATURA EN LA BAJA ESTRATÓSFERA

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

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

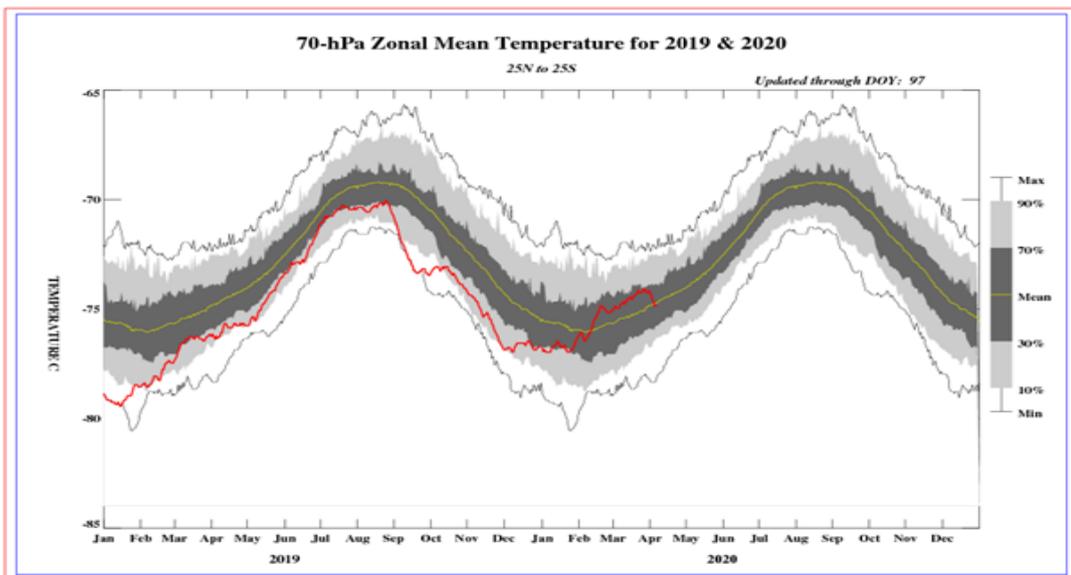
En la Figura 10 se muestra la distribución temporal de la temperatura desde el mes de enero 2019 hasta el mes de marzo 2020, al nivel de 70 hPa y entre las latitudes 25°S - 25°N.

Durante los días de registro, la temperatura en ese nivel (línea de color rojo) tuvo un mayor alejamiento a su valor normal (línea de color amarillo), donde la amplitud entre ellas aumentó, especialmente en la primera y segunda

década del mes de marzo. Empezando la tercera década hasta fines de mes tuvo un acercamiento ligero a su valor normal. Este alejamiento a partir del inicio del mes se puede notar en la figura 10, indicándonos un aumento de la temperatura en ese nivel hasta la segunda década del mes de marzo donde se pudo observar una atmósfera “más cálida”. En la tercera década del mes, los valores de temperatura se acercaron a su valor climático disminuyendo la amplitud generada entre ellas, notándose un ligero enfriamiento. Aun así, los valores del mes de marzo han estado por encima de sus normales, lo que en parte a traído como consecuencia aumentos en las concentraciones de ozono en ese nivel. El valor promedio mensual (1979-2017) de la temperatura en este nivel y para este mes es de -75.3°C , menor en valor numérico al mes pasado, pero físicamente más cálido. La temperatura calculada para este mes de marzo, fue de -74.6°C . Como se observa, durante la tercera década del mes, los valores de temperatura se acercaron a sus valores normales, lo que permite mencionar que las mediciones de ozono en superficie han tenido un incremento con respecto al mes pasado, lo cual guarda relación con sus valores climáticos.

FIGURA N°10

Comportamiento de la temperatura en la baja estratósfera para el mes de marzo 2020



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

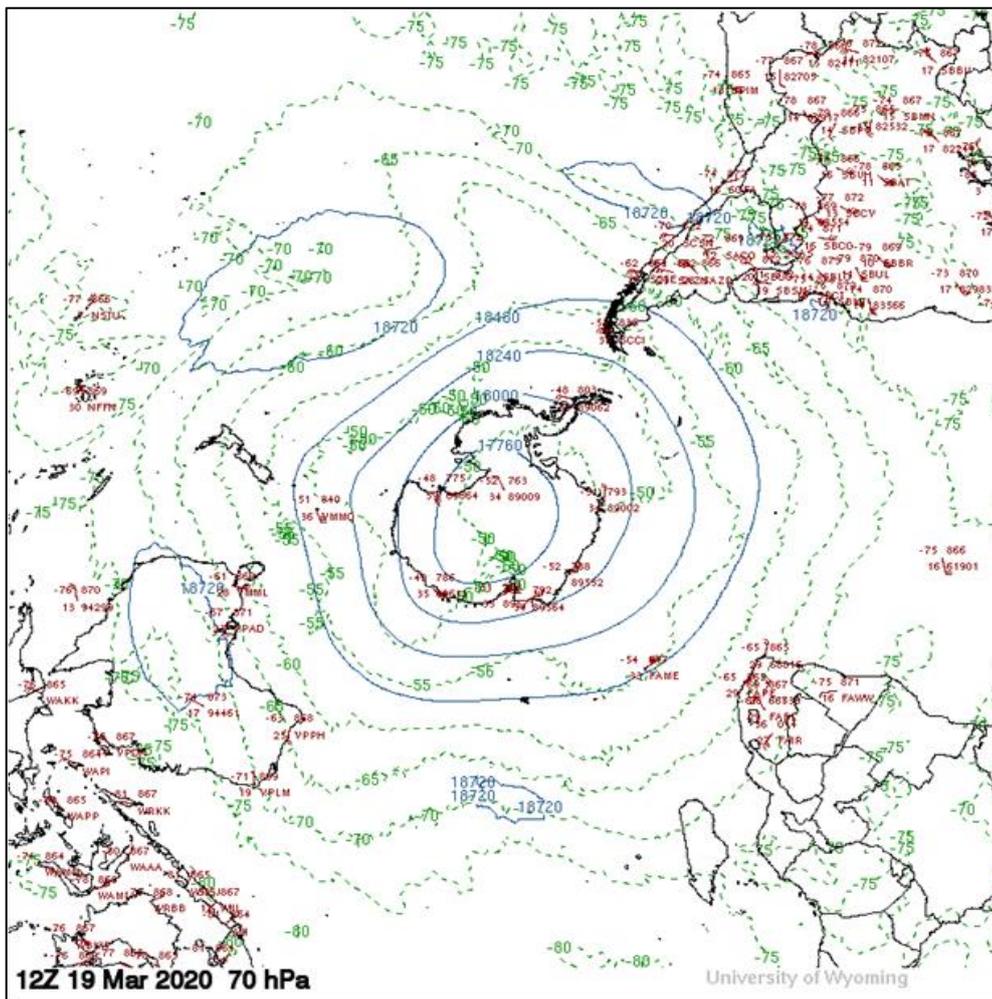
El comportamiento de temperaturas en el nivel de 70 hPa considerando todo el hemisferio sur en un día típico del mes de marzo, es mostrado en la figura 11 en donde se puede apreciar que las temperaturas en el continente Antártico han registrado valores en el orden de -45°C a -50°C , debido a que los niveles de radiación solar van disminuyendo en forma paulatina dado el inicio de la estación astronómica de otoño, lo que permite que las masas de aire en ese nivel se vayan enfriando. 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. Por otro lado, en la región tropical o latitudes bajas las temperaturas en este mes han continuado registrando valores cada vez mayores (pero en forma ligera).

Para el caso de nuestro país las temperaturas a este nivel han registrado mayormente valores de -74°C a -75°C , mayor en lo concerniente a procesos físicos (más cálido) comparado al mes pasado, dando respuesta a los mayores incrementos en las concentraciones de ozono encontradas en superficie.

FIGURA N°11

Comportamiento de la temperatura en 70 hPa para el hemisferio sur (19 marzo 2020)



Fuente: Universidad de Wyoming

III. CONCLUSIONES

1. El mes de marzo se caracteriza porque climáticamente las concentraciones de ozono (los medidos en superficie) empiezan a incrementarse en forma paulatina con respecto al mes de febrero. En este año 2020 según información proveniente del satélite AURA el valor promedio del mes fue de 239.1 UD, mientras que el registrado por el satélite SUOMI fue de 241.8 UD. En conclusión, comparando estos valores con el registrado por el Espectrofotómetro Dobson, se notó que están por debajo entre 4 UD a 7 UD

aproximadamente. Se hace hincapié que los valores promedios provenientes de estas tres fuentes de información han sido ligeramente mayores a los registrados en el mes pasado y esto debido a que según el modelo GFS, se han tenido flujos de aire provenientes de latitudes bajas del hemisferio norte hacia latitudes bajas del hemisferio sur, lo cual ha conllevado un ligero incremento en las concentraciones de ozono atmosférico sobre nuestro país.

2. En cuanto a la variación temporal (promedio diario) de la concentración de ozono, durante el mes de marzo, medido con el espectrofotómetro Dobson en la Estación VAG Marcapomacocha, estas oscilaron entre 241.9 UD y 252.2 UD, notándose cierto incremento de los valores con el tiempo. Los valores de las concentraciones de ozono en este mes, son relativamente mayores al mes pasado debido principalmente a factores de circulación atmosférica los cuales transportaron mayores cantidades de ozono hacia nuestro país.
3. Con respecto a la distribución vertical del ozono para este mes, en la estación VAG Marcapomacocha, según la información obtenida por el satélite SUOMI se puede concluir que la máxima concentración de la misma se encuentra aproximadamente a los 25 km de altura entre la baja y media estratósfera.
4. Asimismo, siguiendo la distribución vertical del ozono, en niveles bajos de la tropósfera se nota un incremento del ozono aproximadamente a los 3,5 km. de altura, debido a efectos residuales del día anterior.
5. Los mapas de ozono total atmosférico en el mes de marzo (elaborados por el Centro Mundial de Datos de Ozono y Radiación Ultravioleta con sede en Canadá), para el caso de nuestro país, muestran concentraciones que oscilan entre 250 UD a 275 UD durante gran parte del mes (salvo algunos días donde las concentraciones fueron menores, pero en lugares bastante localizados, como la zona norte y sur).
6. En lo que concierne al comportamiento de la temperatura en la baja estratósfera (70 hPa) se puede mencionar que, hasta el mes de marzo del presente año, los valores continuaron por encima de su normal climatológica, especialmente en las primeras dos décadas del mes, a partir de la tercera década los valores de temperatura disminuyeron. El valor promedio mensual (1979-2017) fue de -75.3°C , pero resulta que en este mes se registró un valor promedio de -74.6°C . Han continuado presentándose procesos físicos-químicos (debido a la acción de la radiación solar) lo cual ayuda en el incremento de la concentración de ozono, así como a la inyección de ozono proveniente de latitudes bajas del hemisferio norte.
7. Se requiere disponer de información real de la concentración de ozono total a nivel del perfil vertical de la atmósfera a fin de realizar el contraste respectivo con lo obtenido por los satélites y determinar la desviación respectiva. En los periodos donde no se tenga información real se podría utilizar el brindado por los satélites aplicando ciertos algoritmos de cálculo

Dirección de Meteorología y evaluación Ambiental Atmosférica:
Ing. Gabriela Rosas Benancio
grosas@senamhi.gob.pe

Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico:
Ing. Jhojan Rojas Quincho
jprojas@senamhi.gob.pe

Análisis y Redacción:
Ing. Orlando Ccora Tuya
Bach. Juan Tacza Ordoñez
Tco. Rosalinda Aguirre Almeyda
Tco. Julia Astudillo Capcha

Próxima actualización: 15 de mayo de 2020



**Servicio Nacional de Meteorología
e Hidrología del Perú - SENAMHI**
Jr. Cahuide 785, Jesús María
Lima 11 - Perú

Consultas y sugerencias:
occora@senamhi.gob.pe