



PERÚ

Ministerio
del Ambiente



Dirección de Meteorología y
Evaluación Ambiental
Atmosférica
Subdirección de Evaluación del
Ambiente Atmosférico

Monitoreo de la atmósfera en el Observatorio de Vigilancia Atmosférica Marcapomacocha

Abril – Junio 2025



PRESENTACIÓN

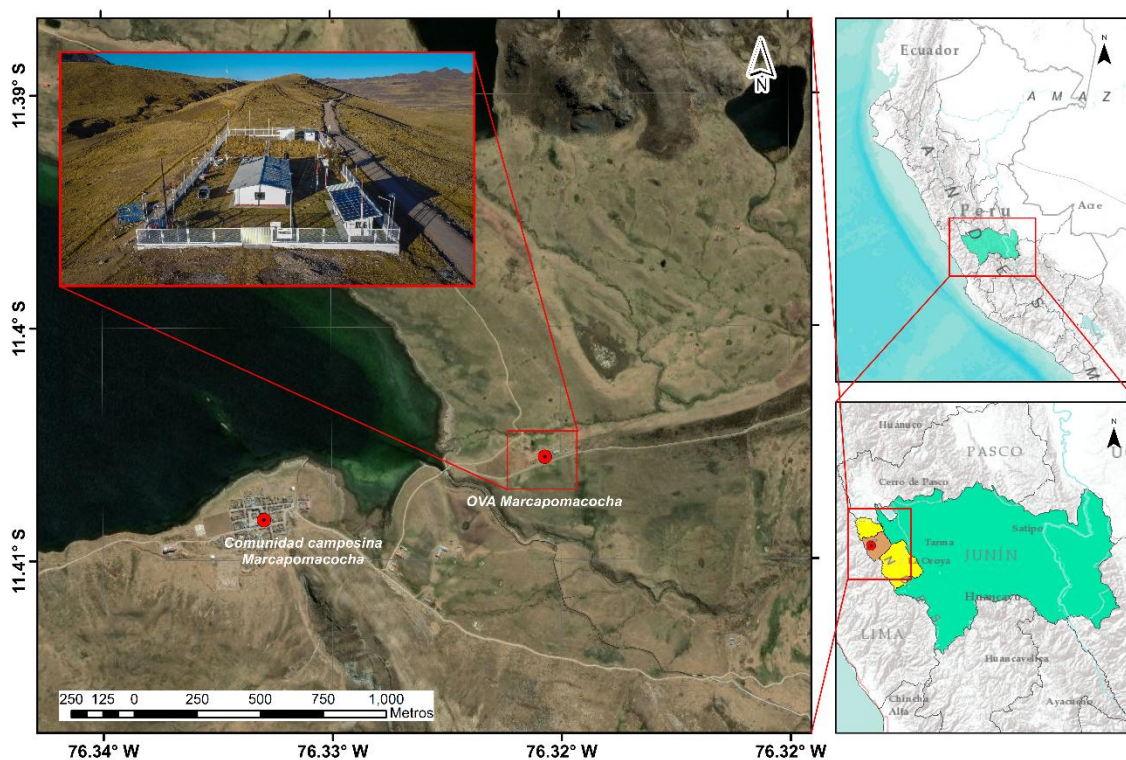
El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) a través de la Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico (SEA) de la Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica (DMA) publica el boletín trimestral de Monitoreo de la Atmósfera en el Observatorio de Vigilancia Atmosférica Marcapomacocha (OVA Marcapomacocha) con la finalidad de informar a las autoridades, agricultores, profesionales y población en general sobre el comportamiento de las variables meteorológicas, así como, de las propiedades físicas y la composición química de la atmósfera en la sierra central del Perú durante el segundo trimestre del 2025.

OBSERVATORIO DE VIGILANCIA ATMOSFÉRICA MARCAPOMACOCHA

El Observatorio de Vigilancia Atmosférica Marcapomacocha (OVA Marcapomacocha), se encuentra ubicado políticamente en el departamento de Junín, provincia de Yauli y distrito de Marcapomacocha, asimismo, geográficamente se ubica en las coordenadas 11.4044°S, 76.3250°W y a una altitud de 4443 m s.n.m. (ver Figura N° 1).

En el OVA Marcapomacocha, se cuenta con una Estación Meteorológica Automática (EMA) que registra la temperatura, precipitación, humedad relativa, radiación solar global y vientos. Por otro lado, el OVA Marcapomacocha forma parte de la red de estaciones del programa de Vigilancia Atmosférica Global (VAG) de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y es del tipo regional¹. Actualmente, cuenta con las seis (06) áreas focales que estudia el programa VAG, las cuales son: Ozono, Gases Reactivos, Gases de Efecto Invernadero, Deposición Atmosférica Total, Radiación Ultravioleta y Aerosoles.

Figura N° 1 Mapa de ubicación del OVA Marcapomacocha



¹ GAW Regional station in WMO Region III - South America: (<https://gawsis.meteoswiss.ch/GAWGIS/#/search/station/stationReportDetails/0-20008-0-MPO>)

I. ANÁLISIS SINÓPTICO

En abril², en niveles altos, predominó la presencia de la Alta de Bolivia (AB) con configuración mayormente zonal y núcleo al norte de Bolivia, aportando estabilidad sobre Brasil, Colombia, Ecuador y Perú, principalmente. Asimismo, desde los 10°N hacia el sur prevalecen vientos del oeste con componente zonal dominante a partir de los 25°S, asociado a una onda ubicada entre los 10°S a 45°S (Ver Figura N°2a). En niveles medios, predominaron flujos del oeste con componente zonal dominante desde los 25°S hacia latitudes mayores, asociados a una onda poco configurada (el cual se reflejó desde niveles altos) que presentó una vaguada de onda corta sobre el centro-norte de Chile y Argentina. También dominaron dos flujos anticiclónicos, uno configurado sobre el océano Pacífico (con núcleo no definido) y otro al este de Brasil (que se extendió desde el océano Atlántico), alrededor de los 10°S. Estos sistemas favorecieron el ingreso de flujos del este con humedad cercana al 70% hacia el Perú, Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador y demás países del extremo norte (Ver Figura N°2d).

En mayo³, en niveles altos, la presencia de la Alta de Bolivia (AB) fue poco frecuente y tuvo una configuración mayormente zonal, aportando inestabilidad sobre Brasil, Colombia y Perú, principalmente. Asimismo, desde los 10°S hacia latitudes mayores prevalecen vientos del oeste con componente zonal dominante a partir de los 15°S, asociado a una onda ubicada entre los 15°S a 45°S (Ver Figura N°2b). En niveles medios, predominaron flujos del oeste con componente zonal dominante desde los 15°S hacia latitudes mayores, asociados a una onda poco configurada (el cual se reflejó desde niveles altos) que presentó una vaguada de onda corta sobre el centro-norte de Chile; por otro lado, hacia el Ecuador prevalecieron flujos de viento del este. También dominaron dos sistemas anticiclónicos, uno configurado sobre el océano Pacífico (con núcleo no definido) y otro sobre el este de Brasil, ambos alrededor de los 12°S. Estos sistemas favorecieron el ingreso de flujos del este con humedad cercana al 70% hacia el Perú, Brasil, Colombia, Ecuador y demás países del extremo norte (Ver Figura N°2d).

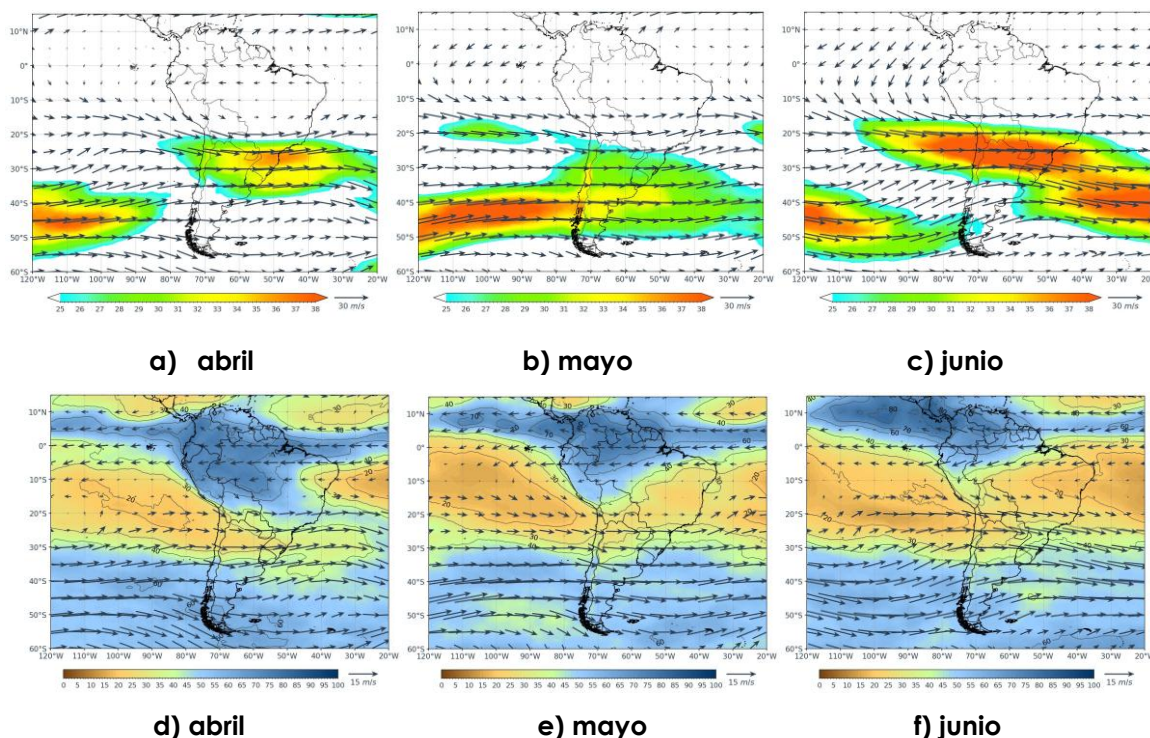
Durante junio⁴, en niveles altos, se presentó con mayor frecuencia una dorsal que tuvo una configuración mayormente zonal, aportando inestabilidad localizada sobre el norte de Brasil, Venezuela, Colombia, Ecuador y norte de Perú, principalmente. Asimismo, desde los 15°S hacia latitudes mayores prevalecen vientos del oeste con componente zonal dominante a partir de los 20°S, asociado a una onda con buena curvatura ubicada entre los 25°S a 50°S (Ver Figura N°2c). En niveles medios, predominaron flujos del oeste con componente zonal dominante desde los 20°S hacia latitudes mayores, asociados a una onda poco configurada (el cual se reflejó desde niveles altos) que presentó una vaguada sobre el norte de Argentina, Paraguay y Uruguay; por otro lado, hacia el Ecuador prevalecieron flujos de viento del este. También, predominan patrones de circulación antihoraria, uno configurado sobre el Océano Pacífico (con núcleo no definido), alrededor de los 15°S, y otro sobre el este de Brasil (que se extendió desde el Océano Atlántico), alrededor de los 10°S. Estos sistemas favorecieron el ingreso de flujos del este con humedad cercana al 70% hacia Colombia, Venezuela y países de Centro América (Ver Figura N°2e).

² VIGILANCIA SINÓPTICA DE SUDAMÉRICA, ABRIL: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-122.pdf>

³ VIGILANCIA SINÓPTICA DE SUDAMÉRICA, MAYO: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-123.pdf>

⁴ VIGILANCIA SINÓPTICA DE SUDAMÉRICA, JUNIO: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-124.pdf>

Figura N° 2 Campos de viento en niveles altos de la atmósfera 250 hPa por mes (a, b y c) y Campos de humedad relativa y vientos en niveles medios de la atmósfera 500hPa por mes (d, e y f).



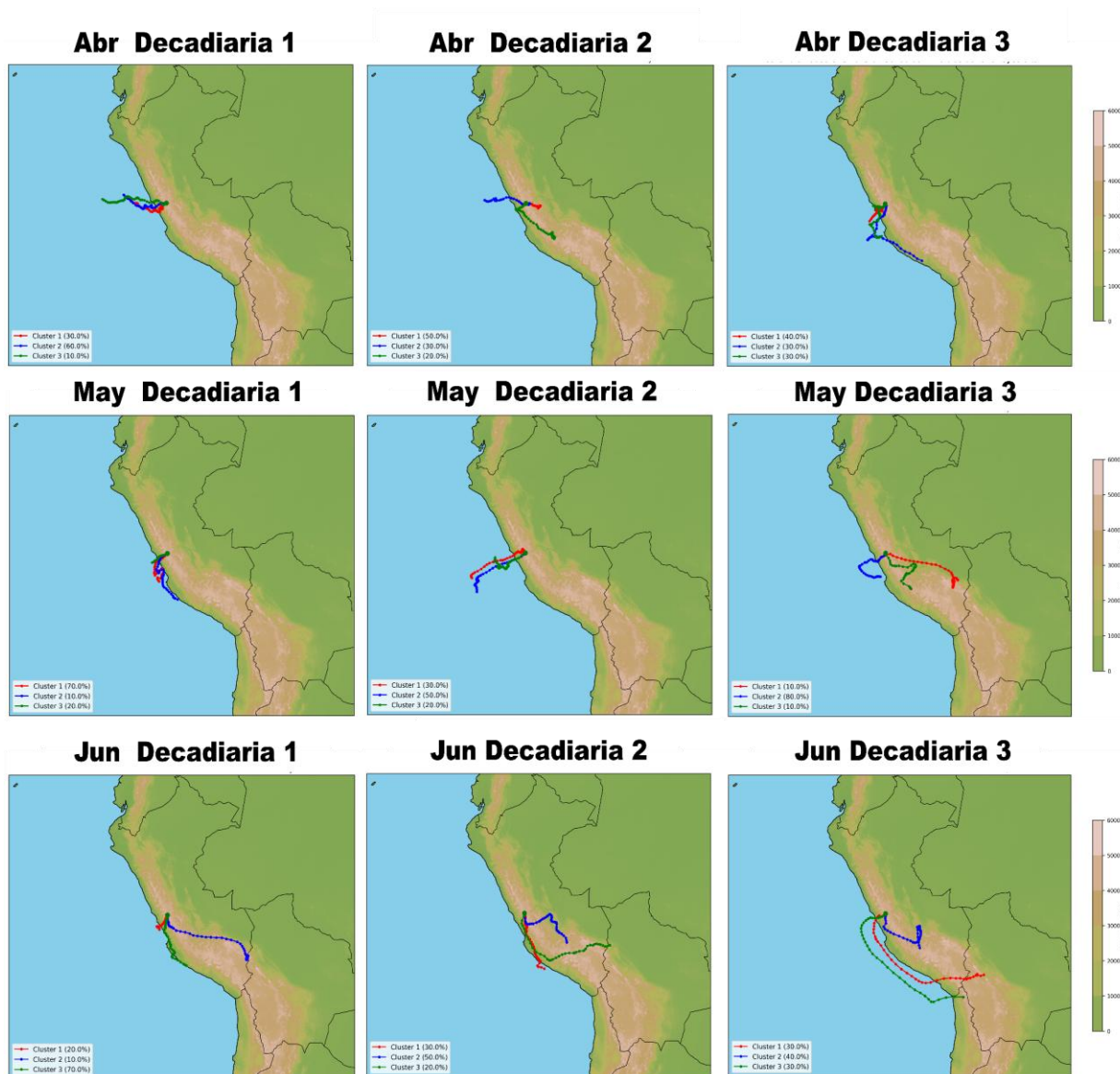
II. ANÁLISIS DE TRAYECTORIAS

Con fines de analizar la predominancia de las masas de aire que llegan al OVA Marcapomacocha, se estimaron retrotrayectorias con el modelo Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) y para lo cual se utilizó datos de reanálisis. Dichas retrotrayectorias para 500 hPa se analizaron por decadiarias mediante la estimación de clústeres o agrupamientos, donde la primera decadiaria del mes corresponde desde el día 1 al 10, la segunda decadiaria corresponde desde el día 11 al 20 y la tercera corresponde desde el día 21 hasta último día de cada mes.

Para el mes de abril, se observa que durante la primera decadiaria predominan flujos de viento provenientes del oeste (O). En la segunda decadiaria, predomina un flujo desde el este (E) hacia el punto de referencia, asociado a masas de aire de origen continental; mientras que, en la tercera decadiaria, el flujo dominante proviene del suroeste (SO), evidenciando una mayor influencia marina.

Para el mes de mayo, durante la primera y tercera decadiaria se presenta un predominio de flujos del sur-suroeste (SSO), asociados principalmente a influencia marítima. En la segunda decadiaria, predominan flujos del suroeste (SO), también con aporte significativo de masas de aire de origen marino. Finalmente, en junio se evidencia un predominio de flujos del sur (S) durante la primera decadiaria y del sur-sureste (SSE) en la segunda y tercera decadiaria, cabe destacar que tienen influencia principalmente de continente.

Figura N° 3 Clúster de retro trayectorias por cada decadiaria y mes del segundo trimestre del 2025



III. MONITOREO METEOROLÓGICO LOCAL

A partir de los datos de la Estación Meteorológica Automática del OVA Marcapomacocha, se llevó a cabo un análisis de la temperatura del aire (°C), humedad relativa (%), precipitación (mm), radiación solar (W/m²), intensidad (m/s) y dirección (°) de vientos durante el segundo trimestre del año 2025.

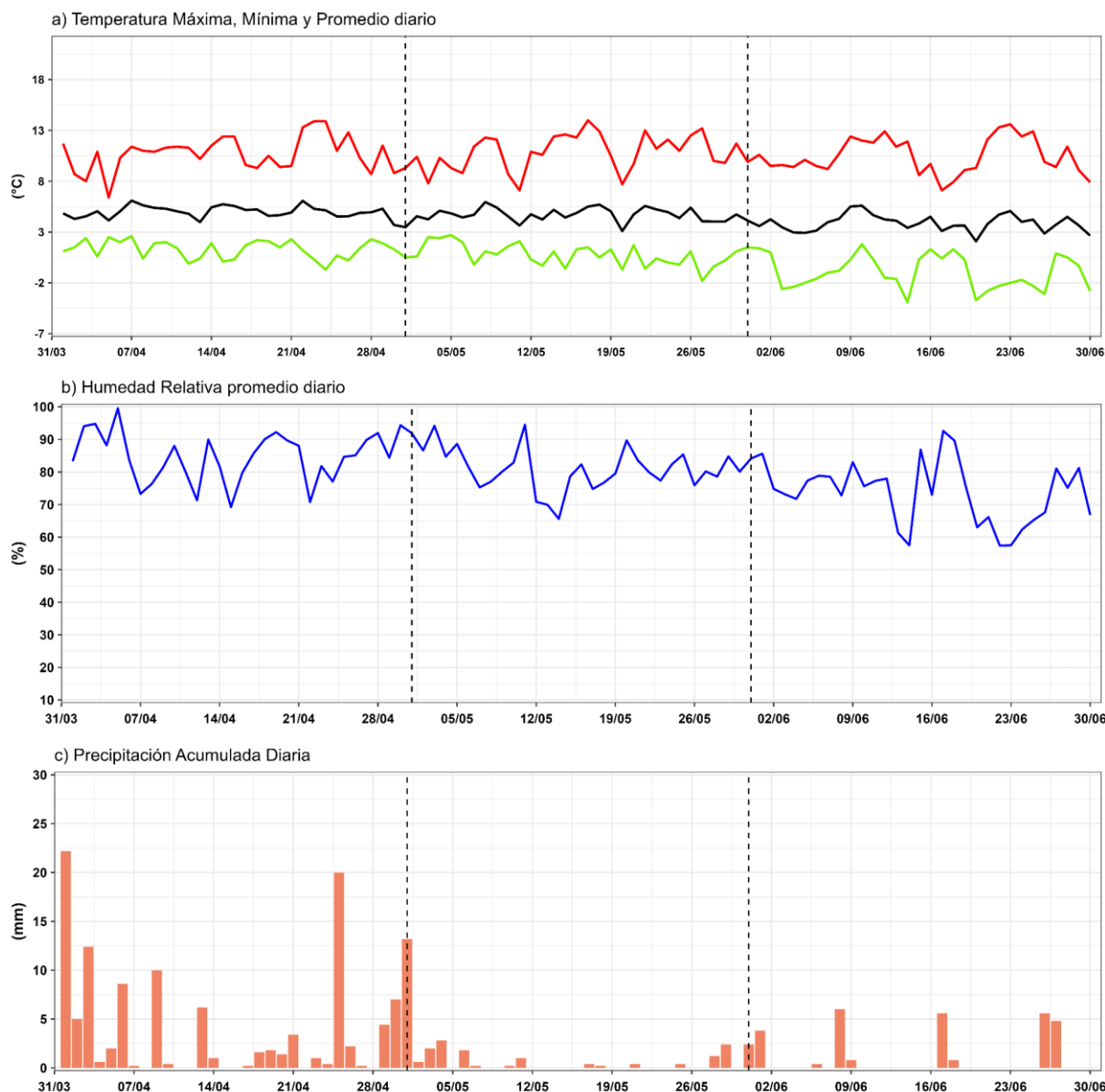
En abril, la temperatura máxima promedio fue de 10.7°C, mientras que la mínima promedio fue de 1.3°C. En mayo, se registró una temperatura máxima promedio de 10.8°C y una mínima promedio de 0.7°C. Para junio, la temperatura máxima promedio fue de 10.4°C, mientras que la mínima promedio bajo a -0.9°C (Figura N°4a).

En cuanto a la humedad relativa promedio diario, en abril se alcanzó una máxima de 99%, una mínima de 69% y un promedio mensual de 84%. En mayo, se registró una máxima de 94%,

una mínima de 65% y un promedio mensual de 81%. En junio, se registró una máxima de 92%, una mínima de 57% y un promedio mensual de 73% (Figura N°4b).

En relación con la precipitación acumulada diaria, en el mes de abril se alcanzó un valor máximo de 22.2 mm y un acumulado mensual de 112 mm. En mayo, se obtuvo un valor máximo de 13.2 mm y un acumulado mensual de 29.2 mm. En junio, se obtuvo un valor máximo de 6 mm y una acumulado mensual de 27.8 mm (Figura N°4c).

Figura N° 4 Series temporales de la temperatura, humedad relativa y precipitación



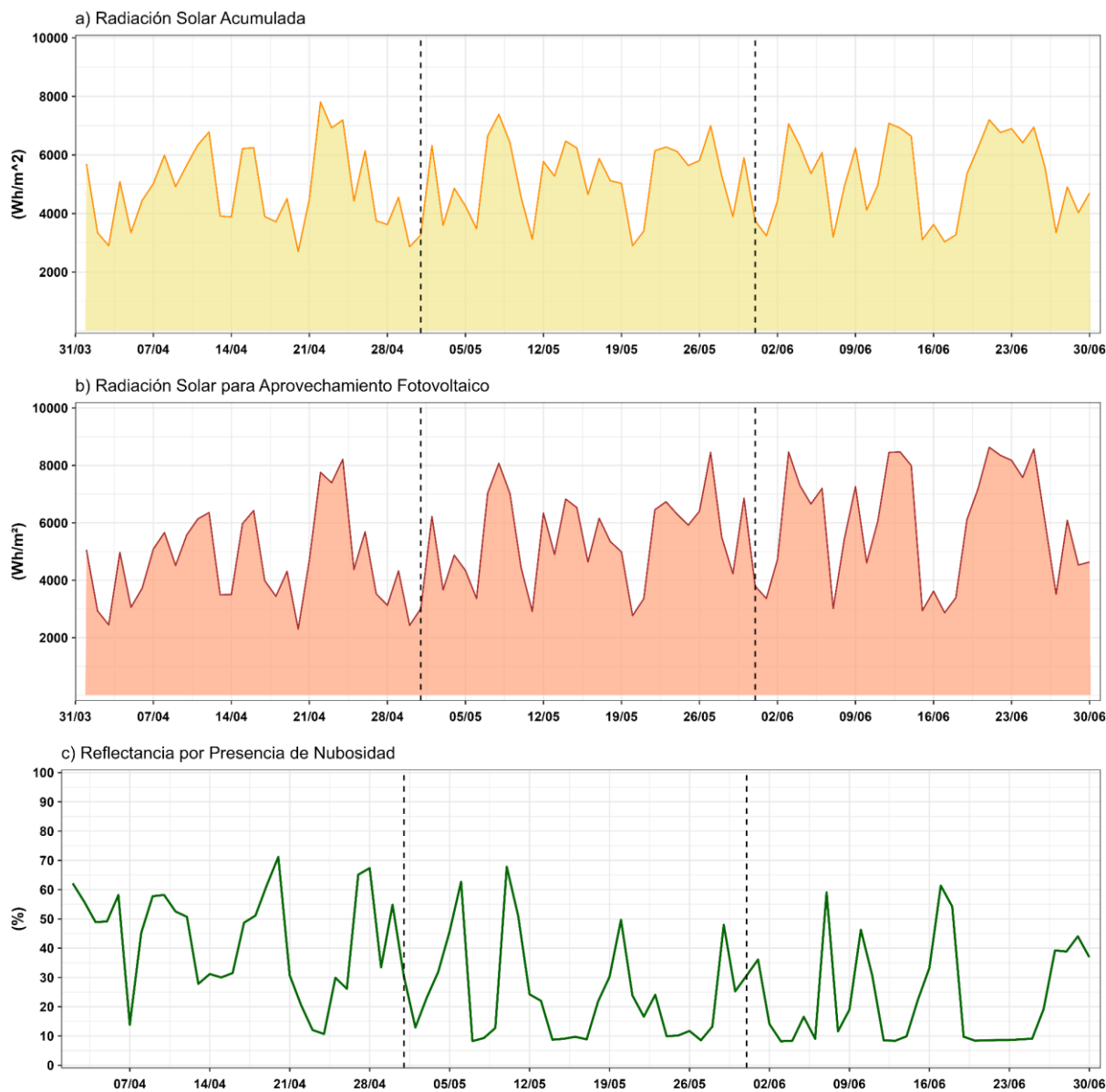
Respecto a la radiación solar global acumulada, en abril se obtuvo una máxima de 7810 W/m² (día 22), mientras que el valor mínimo fue de 2701 W/m² (día 20). Durante mayo, se alcanzó una máxima de 7388 W/m² (día 8), mientras que el valor mínimo fue de 2899 W/m² alcanzado (día 20). En junio, se alcanzó una máxima de 7201 W/m² (día 21), mientras que el valor mínimo fue de 3034 W/m² (día 17) (ver Figura N°5a).

Asimismo, respecto a la radiación solar para aprovechamiento fotovoltaico (con una inclinación de 30° al norte), se alcanzó un pico máximo de 8212 W/m² para el 24 de abril.

Para mayo, se registró un valor máximo de 8455 W/m² (día 27) y finalmente, en junio se encontró un valor máximo de 8632 W/m² (día 21) (ver Figura N°5b).

Con respecto a la reflectancia por nubosidad, se observó que durante abril se alcanzó un valor máximo de 71%, registrado el día 20, durante el mes de mayo se alcanzó el valor máximo de 68% el día 10, en junio se registró el valor más alto alcanzando un 61% el día 17 (ver Figura N°5c).

Figura N° 5 Series temporales de radiación solar y reflectancia por nubosidad



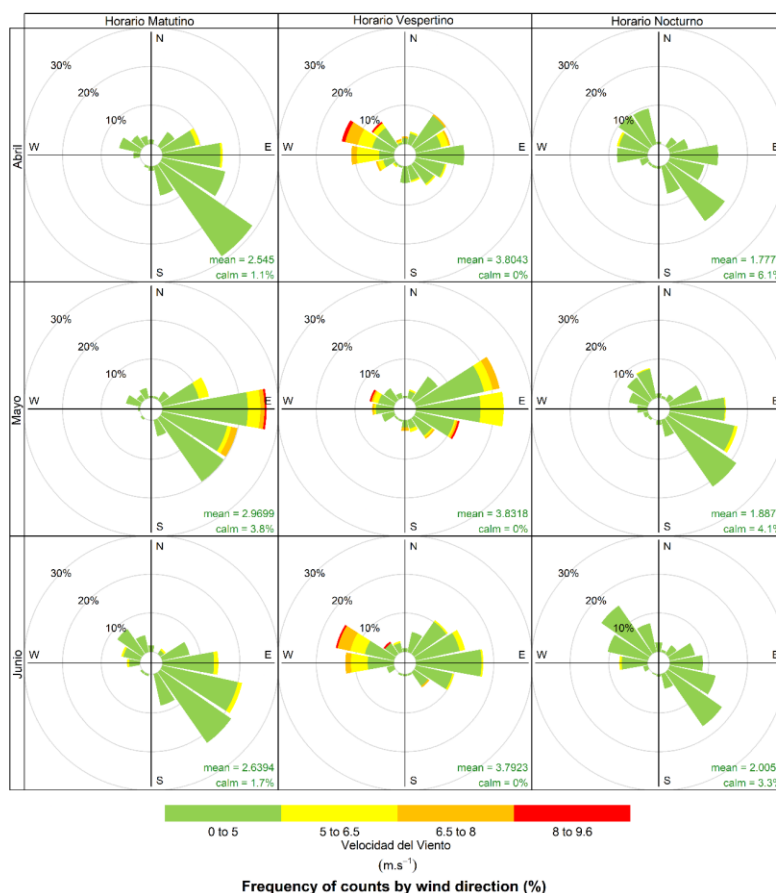
En la Figura N° 6, se observan las rosas de vientos para los horarios matutino (07:00 a 11:59 horas), vespertino (12:00 a 18:59 horas) y nocturno (19:00 a 06:59 horas) de los meses evaluados, en donde las categorías de la intensidad del viento corresponden a: débiles (0 – 5 m/s), moderados (5 – 6.5 m/s), fuertes (6.5 – 8 m/s) y extremos (>8m/s).

Durante el horario matutino, la dirección del viento predominante fue del sureste (SE) en el mes de abril y junio, con intensidad débil; mientras que en mayo se tuvo una dirección predominante del este (E) con intensidad extrema. Por otra parte, en el horario vespertino, la

dirección predominante fue del oeste-noroeste (ONO) en los meses de abril y junio y con una intensidad extrema; mientras que en mayo se tuvieron vientos con dirección predominante del este (E), con una intensidad moderada. Finalmente, para el horario nocturno, los vientos tuvieron una dirección predominante del sureste (SE), con una intensidad débil para todo el trimestre.

Cabe resaltar que, el horario vespertino presentó durante los tres meses vientos con intensidades máximas dentro de la categoría de extremo y para el horario matutino se presentaron en mayo.

Figura N° 6 Rosa de vientos por horario y mes del segundo trimestre 2025



IV. MONITOREO DE FOCOS DE CALOR

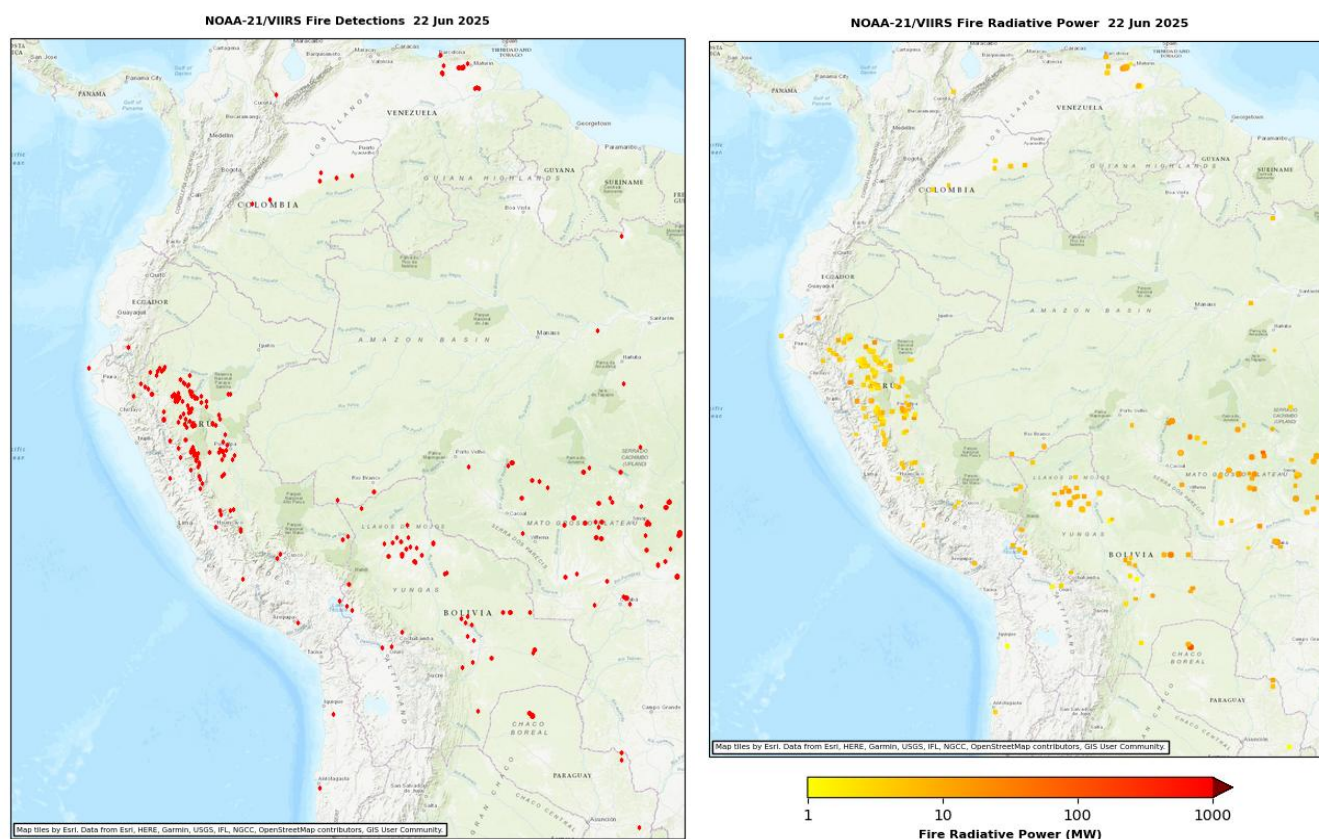
La quema de biomasa (vegetación viva o muerta) que se da durante los incendios en pastizales, bosques y residuos agrícolas constituye una importante fuente de emisiones gaseosas: gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄ y N₂O), gases reactivos (CO, NO₂, NO) e hidrocarburos que actúan como precursores de ozono troposférico, gases que agotan la capa de ozono como cloruro y bromuro de metilo (CH₃Cl y CH₃Br); así como de material particulado ⁵.

⁵ La quema de biomasa en Sudamérica vista desde el espacio. Obtenido de: https://www.researchgate.net/profile/Pablo-Canziani/publication/242093033_LA_QUEMA_DE_BIOMASA_EN_SUDAMERICA_VISTA_DESDE_EL_ESPACIO/links/00463528378a684dfd000000/LA-QUEMA-DE-BIOMASA-EN-SUDAMERICA-VISTA-DESDE-EL-ESPACIO.pdf

Por ello, es crucial realizar un seguimiento permanente de los focos de calor, no solo a nivel nacional, sino también en toda Sudamérica. Esto se debe a que los sistemas atmosféricos pueden transportar estos contaminantes desde países vecinos. Es así que, utilizando el producto VIIRS-EFIRE-VIIRSI-EDR del Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) del Satélite NOAA-21⁶, se realizó el seguimiento de los focos de calor durante el segundo trimestre del 2025.

En la Figura N°7 se presentan los focos de calor y su potencial radiativo de fuego en Sudamérica durante el 22 de junio del 2025, donde se destaca la presencia de energía térmica en la selva norte y central del Perú y de manera dispersa en países vecinos como Brasil y Bolivia.

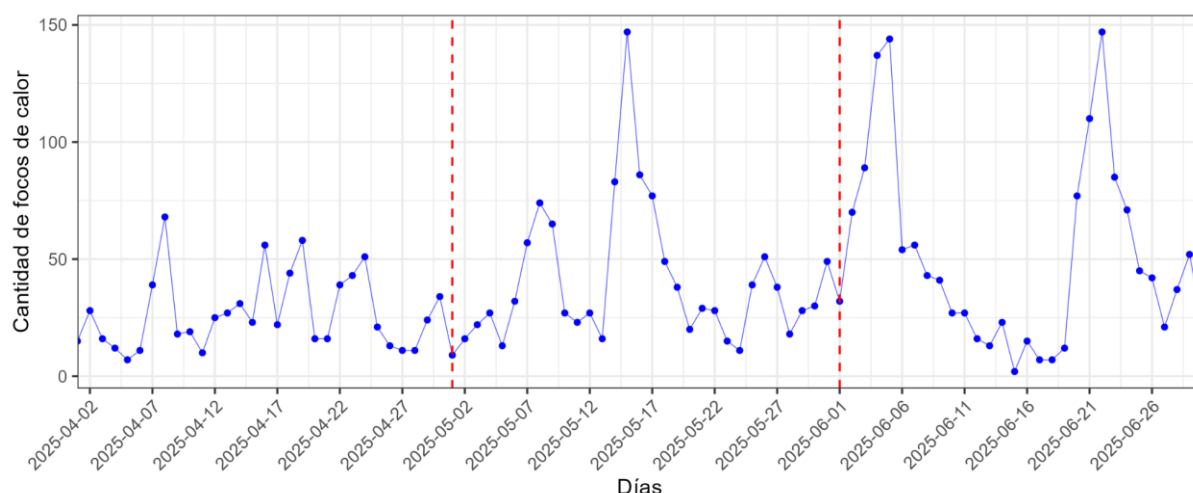
Figura N° 7 Focos de calor en Sudamérica y su potencial radiativo de fuego (FRP)



Por otro lado, en la Figura N° 8 se muestra una serie temporal de la cantidad diaria de focos de calor observados en el Perú durante el segundo trimestre del año. Se observa que, los valores más altos se presentaron en la segunda decadiaria de mayo y la primera y tercera decadiaria de junio, alcanzándose los 147, 144 y 147 focos de calor los días 15 de mayo, 5 de junio y 22 de junio, respectivamente. En términos generales, se evidencia una baja ocurrencia de focos de calor a lo largo del periodo analizado, con incrementos puntuales seguidos de descensos posteriores, registrándose menos de 50 focos de calor durante la mayor parte del trimestre.

⁶ Datos VIIRS : <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#d:24hrs:@0,0,0,3,0z>

Figura N° 8. Cantidad de focos de calor en el Perú durante el segundo trimestre de 2025



V. MONITOREO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LA ATMÓSFERA

V.1 ÁREA FOCAL DE OZONO

En el OVA Marcapomacocha, se realiza el monitoreo de la Columna Total de Ozono (CTO), a través del Espectrofotómetro Dobson (Ver Figura N°9).

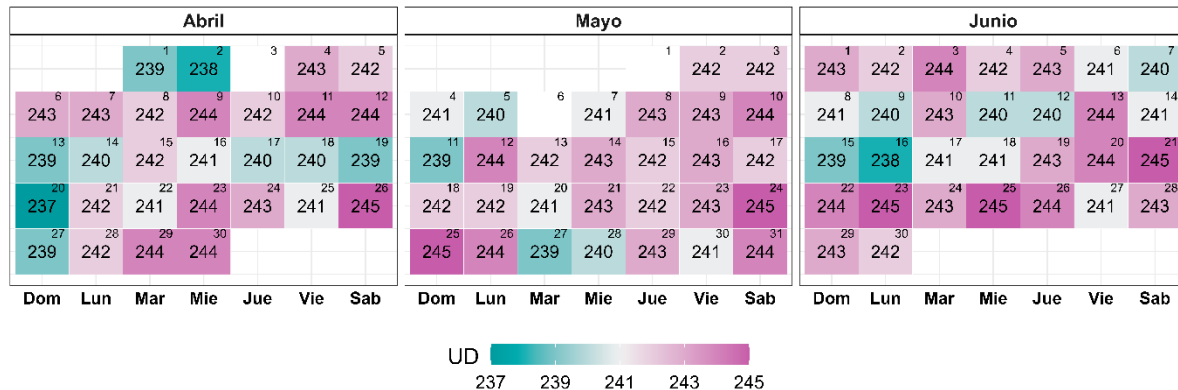
Figura N° 9 Espectrofotómetro Dobson N°087



En la Figura N° 10 se presentan los promedios diarios de la CTO en Unidades Dobson (UD) detallados en un calendario correspondiente al segundo trimestre del 2025. De esta manera, en abril se observa que los valores mínimos y máximos de la CTO varían entre 237 UD (día 20) y 245 UD (día 26). Para mayo, los valores oscilaron entre 239 UD (día 11 y 27) y 245 UD (día 24 y 25) y para junio, entre 238 UD (día 16) y 245 UD (día 21, 23 y 25). En general, los valores de CTO no estuvieron por debajo de 220 UD, por lo que no se observaron eventos de agujeros de ozono sobre el OVA Marcapomacocha. Cabe precisar que, los valores de la CTO en el observatorio son usualmente bajos en todas las estaciones del año

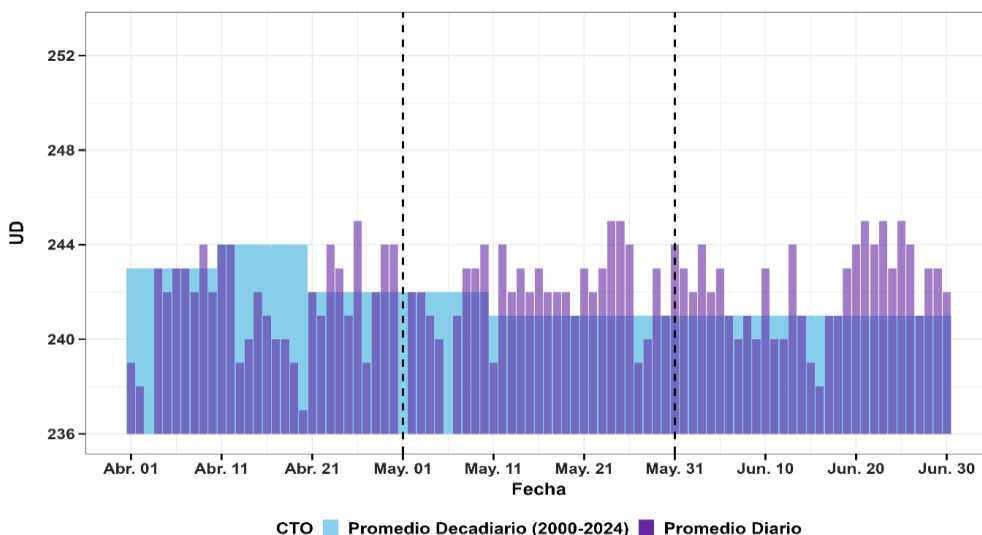
en comparación con latitudes medias y altas. Un análisis detallado del comportamiento de la CTO se encuentra en los boletines mensuales de vigilancia del ozono atmosférico realizados por el SENAMHI^{7, 8, 9}.

Figura N° 10 Calendario de promedios diarios de la CTO



Asimismo, se realizó una comparación de los valores promedio diarios de la CTO con respecto a los promedios decadiarios del periodo 2000- 2024 (Ver Figura N°11). En ese sentido, se evidencia que la mayoría de los valores diarios estuvieron por encima de su promedio decadiario, a excepción de la segunda decadiaria de abril. Con respecto a las excedencias, se evidencia que los mayores incrementos con respecto a la normal decadiaria, se encontraron en la tercera decadiaria de mayo (día 24 y 25) y la tercera decadiaria de junio (día 21, 23 y 25). En general, no se observa una tendencia en los valores durante el trimestre; presentándose los mayores valores en la última decadiaria de cada mes.

Figura N° 11 Variación de promedios diarios de la CTO



⁷ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DEL OZONO ATMOSFÉRICO EN EL OBSERVATORIO DE VIGILANCIA ATMOSFÉRICA MARCAPOMACOCCHA, ABRIL, 2025 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03203SENA-144.pdf>)

⁸ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DEL OZONO ATMOSFÉRICO EN EL OBSERVATORIO DE VIGILANCIA ATMOSFÉRICA MARCAPOMACOCCHA, MAYO, 2025 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03203SENA-145.pdf>)

⁹ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DEL OZONO ATMOSFÉRICO EN EL OBSERVATORIO DE VIGILANCIA ATMOSFÉRICA MARCAPOMACOCCHA, JUNIO, 2025 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03203SENA-146.pdf>)

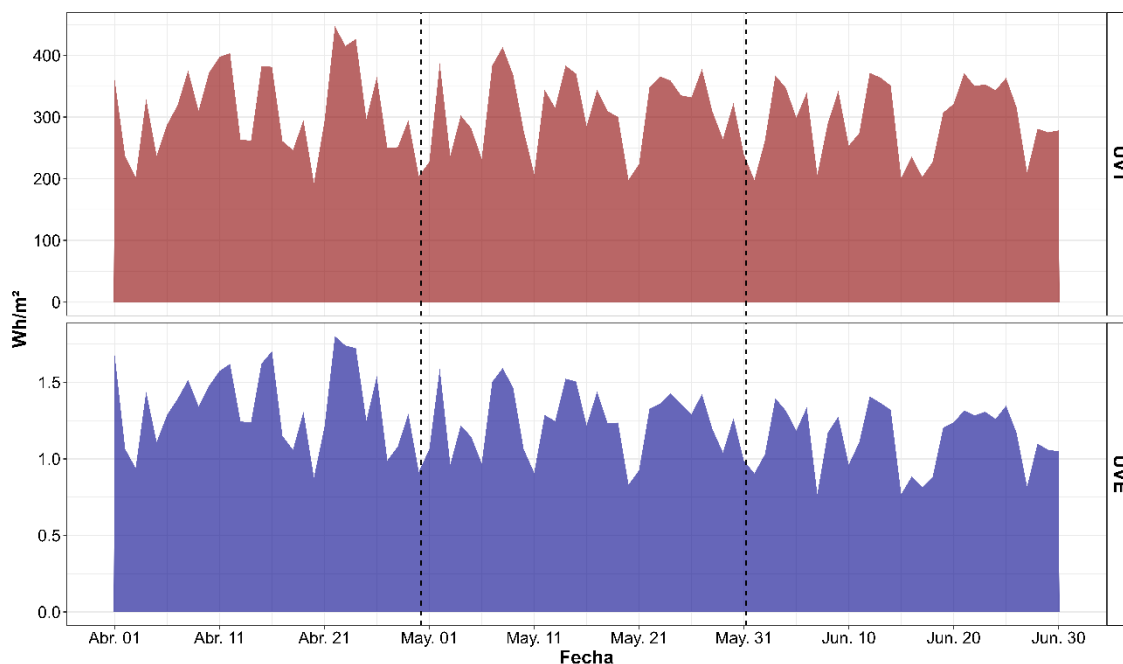
V.2 ÁREA FOCAL DE RADIACIÓN

A. RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

La radiación ultravioleta (UV) se divide en tres bandas principales según la longitud de onda: UVC (100-280 nm), UVB (280-315 nm) y UVA (315-400 nm). La radiación UV que alcanza la superficie terrestre se compone en su mayor parte de radiación UVA con una pequeña parte de radiación UVB; en cambio, la radiación UVC es absorbida en la atmósfera por lo cual no alcanza a llegar a la superficie terrestre.¹⁰ Por su parte, La radiación ultravioleta eritemática (UVE) es una medida específica de la capacidad de la radiación UV para causar eritema, o enrojecimiento de la piel (quemaduras solares). No toda la radiación UV contribuye igualmente al eritema; la UVB tiene un impacto mucho mayor que la UVA. Por lo tanto, la radiación UVE pondera las diferentes longitudes de onda de la radiación UV según su capacidad para causar eritema.¹¹

En la Figura N°12, se muestra la variación de los valores diarios acumulados de la radiación ultravioleta eritemática (UVE) y de la radiación ultravioleta total (UVT) para el segundo trimestre de 2025. Durante el mes de abril, se observaron valores acumulados entre 0.88 y 1.8 Wh/m² para el UVE y entre 193 y 447.4 Wh/m² para el UVT. Con respecto a mayo, el UVE se encontró entre 0.83 y 1.59 Wh/m² y el UVT entre 198.2 y 413.7 Wh/m². Por su parte, junio presentó oscilaciones del UVE entre 0.78 y 1.41 Wh/m²; y del UVT entre 198.1 y 371.6 Wh/m². En general, el mayor valor de la UVE y la UVT se encontraron en la tercera decadiaria de abril (día 22); mientras que, los menores valores de ambas variables se encontraron en la primera decadiaria de junio (día 1 para UVT y día 7 para UVE).

Figura N° 12 Variación de los acumulados diarios de la radiación UVE y UVT



¹⁰ Adaptado de Guía Práctica del Índice UV Solar Mundial. Obtenido de: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/d24c554a-aa30-4d9c-a6c0-df67484f7b7e/content>

¹¹ Adaptado de Nota Técnica N° 002-2016 SENAMHI. Obtenido de: <https://idesep.senamhi.gob.pe/portaldesep/files/tematica/pronostico/indiceuv/indiceuv.pdf>

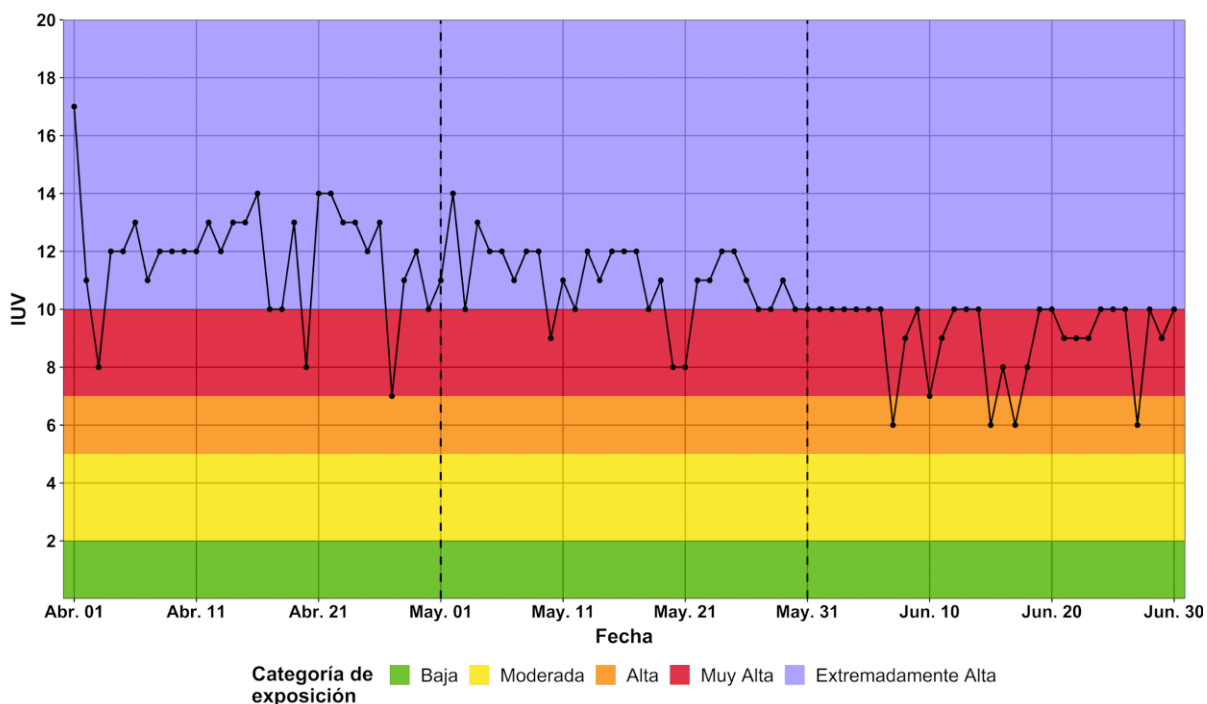
Asimismo, en promedio, la UVE representó el 0.41% de la UVT. Es importante señalar que el monitoreo de ambos tipos de radiación UV son complementarios y necesarios para una comprensión integral de la citada variable ambiental que contribuya al diseño de medidas adecuadas de protección a la salud de las personas ante los efectos nocivos por sobre exposición.

B. ÍNDICE ULTRAVIOLETA

El Índice Ultravioleta (IUV) es una magnitud adimensional que se expresa como un valor entero superior a cero; cuanto más alto es el valor, mayor es la probabilidad de sufrir lesiones cutáneas y oculares, y menos tiempo se necesita para que estas se produzcan¹². De esta manera, al igual que la radiación ultravioleta eritemática, el índice UV pondera la radiación UV según su capacidad para causar daño a la piel, utilizando la curva de acción eritemática¹³.

En la Figura N°13 se muestra la variación de los valores máximos diarios del IUV (promedios de 30 minutos) para cada categoría de exposición según la Organización Mundial de la Salud (OMS). Para abril, estos valores oscilaron entre 7 y 17; para mayo, entre 8 y 14; y para junio, entre 6 y 10. En general, se evidencia una tendencia a la disminución, ello debido al inicio del invierno en el hemisferio sur.

Figura N° 13 Variación de los valores máximos diarios del IUV



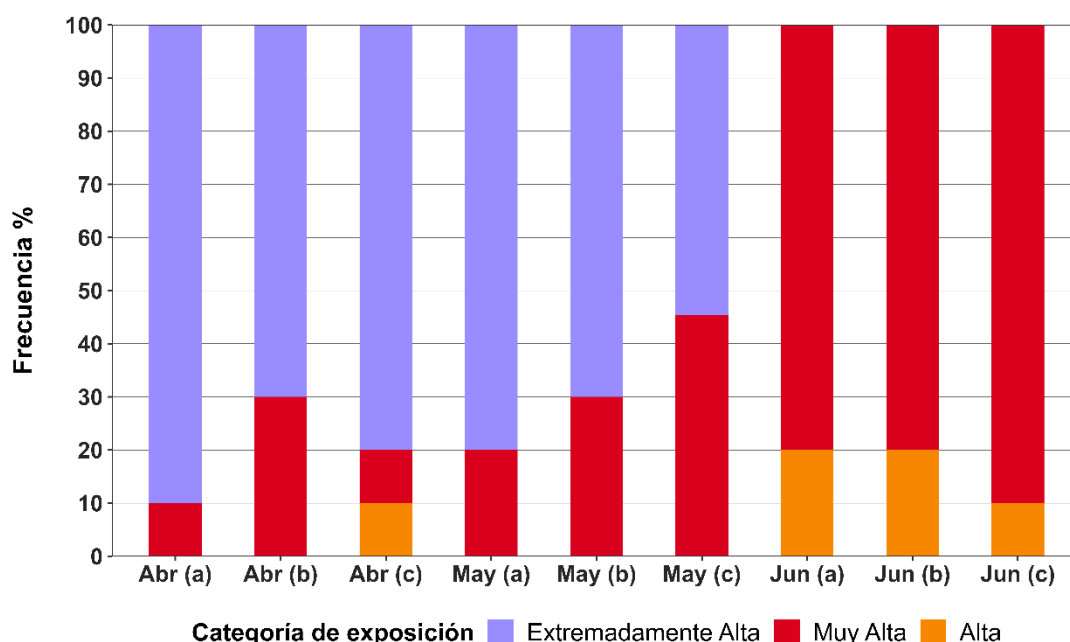
La Figura N° 14 presenta las frecuencias de las categorías de exposición de la OMS alcanzadas de acuerdo con los valores del IUV (máximos diarios) en el OVA

¹² Adaptado de Guía Práctica del Índice UV Solar Mundial. Obtenido de: <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/d24c554a-aa30-4d9c-a6c0-cf67484f7b7e/content>

¹³ Adaptado de Nota Técnica N° 002-2016 SENAMHI. Obtenido de: <https://idsep.senamhi.gob.pe/portaldesep/files/tematica/pronostico/indiceuv/indiceuv.pdf>

Marcapomacocha durante la decadiaria primera (a), segunda (b) y tercera (c) de los meses de abril, mayo y junio. Durante el segundo trimestre se evidencia aún una predominancia en la ocurrencia de la categoría de exposición Extremadamente Alta (por lo menos un 54.6%) durante abril y mayo. No obstante, para el mes de junio se evidencia una predominancia de la categoría de exposición Muy Alta (por lo menos un 80%). Cabe resaltar que la exposición a valores del IUV por encima de la categoría “moderada” representa un riesgo para la salud de las personas. Un análisis detallado del comportamiento del IUV se encuentra en los boletines mensuales de vigilancia de la Radiación UV-B realizados por el SENAMHI^{14, 15, 16}.

Figura N° 14 Frecuencia de las categorías de exposición del IUV por decadiaria



En general, mayores valores del IUV diario en el OVA Marcapomacocha estarían asociados a una menor cantidad de ozono en la atmósfera, es decir, disminuye la CTO (Figura N°11) y se reduce la capacidad de la atmósfera para filtrar la radiación ultravioleta, y viceversa, cuando hay valores altos de la CTO tienden a reducirse los valores del IUV. Esto se puede evidenciar en la primera decadiaria de junio (día 10) y la tercera decadiaria de junio (día 21 y 23).

Por otro lado, las condiciones meteorológicas también influyen en los valores altos del IUV, por ejemplo, a partir de una menor presencia de cobertura nubosa, que puede evidenciarse con menores valores de reflectancia de la banda 2 del satélite GOES16 (Figura N°5c) y viceversa, cuanto hay mayor nubosidad, ello se traduce en menores valores del IUV. Dicha asociación se presenta en gran medida en la

¹⁴ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DE LA VIGILANCIA DE RADIACIÓN UV-B EN CIUDADES DEL PAIS, ABRIL, 2025 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03202SENA-113.pdf>)
¹⁵ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DE LA VIGILANCIA DE RADIACIÓN UV-B EN CIUDADES DEL PAIS, MAYO, 2025 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03202SENA-114.pdf>)
¹⁶ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DE LA VIGILANCIA DE RADIACIÓN UV-B EN CIUDADES DEL PAIS, JUNIO, 2025 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03202SENA-115.pdf>)

segunda decadiaria de abril (día 20), la primera decadiaria de mayo (día 2) y la primera decadiaria de junio (día 7).

V.3 ÁREA FOCAL DE GASES REACTIVOS

Durante el cuarto trimestre del año, se ha realizado la vigilancia ambiental atmosférica del Ozono Troposférico (O_3) mediante el equipo monitor de marca 2B Technologies modelo 205 (ver Figura N°15) del OVA Marcapomacocha.

Figura N° 15 Monitor de O_3 troposférico del OVA Marcapomacocha



Asimismo, se ha utilizado imágenes satelitales obtenidas mediante el instrumento TROPOMI del satélite Sentinel-5 Precursor, parte del programa Copernicus, para los siguientes gases reactivos: Compuestos Orgánicos Volátiles - Formaldehído (HCHO), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO_2) y Dióxido de Azufre (SO_2). El análisis decadiario de los mencionados gases se desarrolla a continuación:

A. OZONO TROPOSFÉRICO (O_3)

El ozono troposférico no se emite directamente a la atmósfera, sino que se forma a partir de reacciones químicas entre óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COVs). Esto ocurre cuando los contaminantes emitidos por automóviles, centrales eléctricas, entre otras fuentes, reaccionan químicamente en presencia de luz solar.¹⁷ La velocidad y el grado de formación de O_3 troposférico depende fuertemente de la radiación solar, de las emisiones antropogénicas de precursores y del ciclo biogénico de los COV. Sus concentraciones suelen ser mayores en zonas rurales o en la periferia urbana, ya que la generación fotoquímica de O_3 requiere cierta distancia desde las fuentes de emisión. Asimismo, en áreas urbanas con altos niveles de NO , el O_3 se destruye rápidamente al oxidar NO a NO_2 , lo que explica sus bajas concentraciones. Por el contrario, en entornos menos contaminados, donde no hay suficiente NO para consumirlo, se puede observar mayores niveles de O_3 generado o transportado desde áreas urbanas e industriales.¹⁸

La Figura N° 16 presenta la evolución temporal del O_3 troposférico, expresado en microgramos por metro cúbico ($\mu g/m^3$), correspondiente al segundo trimestre de 2025. Los valores fueron obtenidos a partir de promedios móviles de 8 horas y se emplearon para su comparación con el Estándar de Calidad Ambiental para Aire (ECA-aire), establecido en $100 \mu g/m^3$. Cabe señalar que durante algunos días del mes de abril y mayo de 2025 no se contó con registros de O_3 troposférico debido a trabajos de mantenimiento al sistema fotovoltaico del OVA Marcapomacocha.

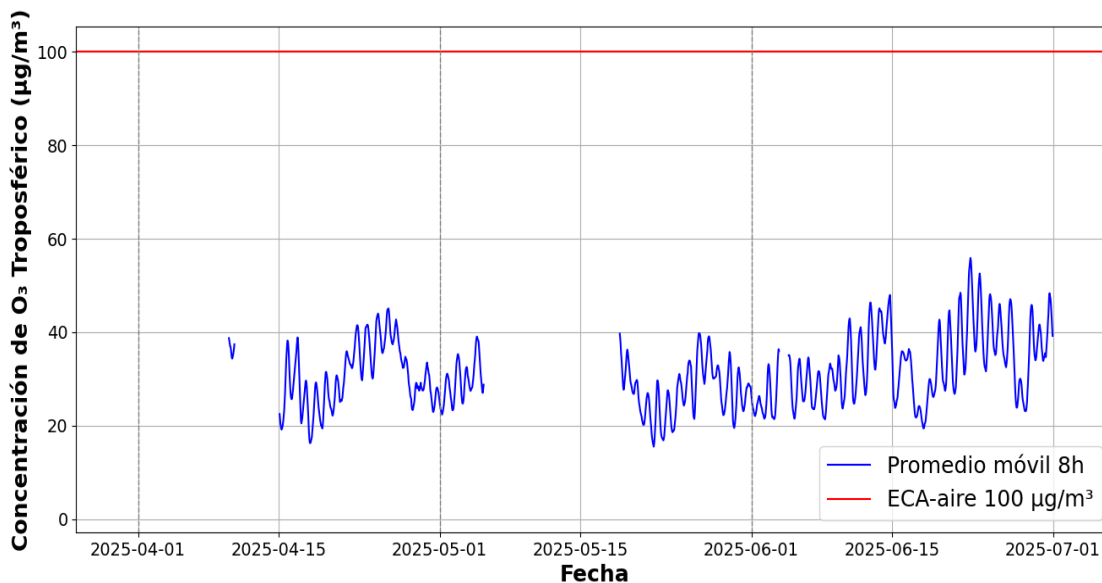
En abril, las concentraciones de O_3 registraron un valor mínimo de $16.3 \mu g/m^3$ (día 18) y un valor máximo de $45.1 \mu g/m^3$ (día 25), con un promedio mensual de 31.0

¹⁷ Ground-level Ozone Basics. Obtenido de: <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics>

¹⁸ Ozono. Obtenido de: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/glosario-de-terminos/glosario-contaminantes/ozono.html>

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ y un percentil 90 de $40.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En mayo, el valor mínimo fue de $15.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (día 22) y el máximo de $39.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (día 26), alcanzando un promedio mensual de $28.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un percentil 90 de $35.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por su parte, en junio las concentraciones presentaron un valor mínimo de $19.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (día 18) y un valor máximo de $55.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (día 22), con un promedio mensual de $33.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un percentil 90 de $44.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Asimismo, durante el periodo evaluado no se registraron excedencias al ECA-aire.

Figura N° 16 Comportamiento del O₃ troposférico durante el segundo trimestre (promedio móvil de 8h)



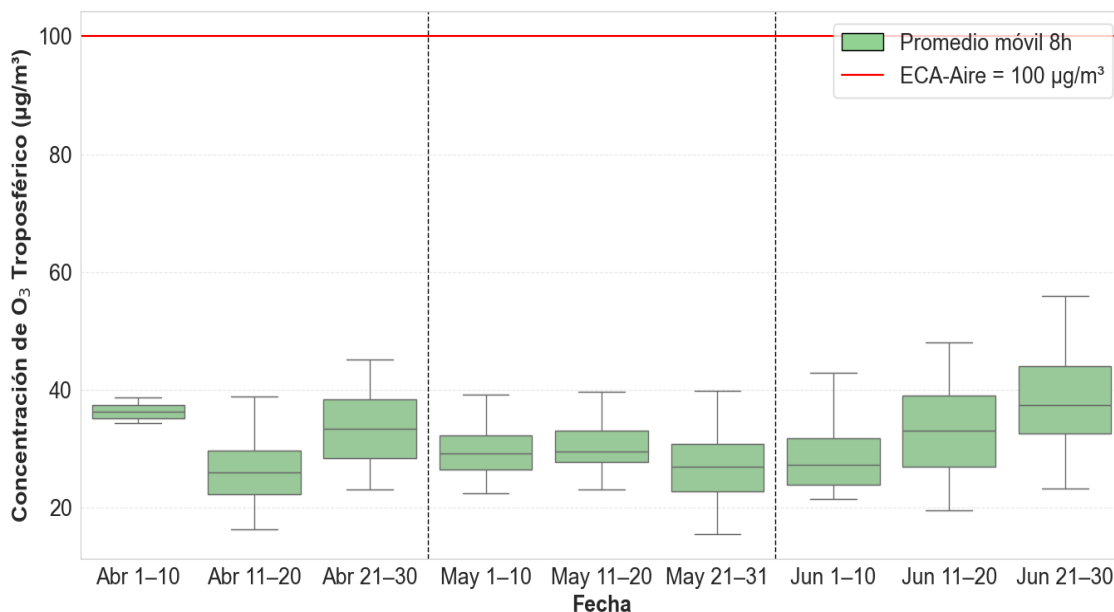
Asimismo, se realizó el análisis decadiario de la variabilidad de los promedios móviles de 8 horas del O₃ troposférico (Figura N°17). Al respecto, la primera decadiaria de abril presentó una mediana de $36.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un rango intercuartílico (IQR) de $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y valores entre 34.4 y $38.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La segunda decadiaria de abril registró una disminución en las concentraciones, con una mediana de $25.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un IQR de $7.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, registrándose valores entre 16.3 y $38.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por su parte, la tercera decadiaria de abril presentó una mediana de $33.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un IQR de $9.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con concentraciones entre 23.0 y $45.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Durante mayo, la primera decadiaria registró una mediana de $29.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un IQR de $5.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con valores entre 22.4 y $39.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La segunda decadiaria presentó una mediana similar ($29.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y un IQR de $5.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con concentraciones entre 23.1 y $39.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En la tercera decadiaria se observó una ligera disminución en la mediana ($27.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y una variabilidad ligeramente mayor (IQR de $8.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$), con valores entre 15.5 y $39.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En junio, la primera decadiaria registró una mediana de $27.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un IQR de $7.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con valores entre 21.4 y $42.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La segunda decadiaria registró una mediana de $33.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la mayor variabilidad del mes (IQR de $12.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$), con concentraciones entre 19.4 y $48.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Finalmente, la tercera decadiaria presentó la mediana más alta del trimestre ($37.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y un IQR de $11.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con valores entre 23.1 y $55.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En general, las concentraciones de O₃ mostraron una tendencia a la disminución desde abril hacia mayo, seguida de un incremento durante junio, registrándose la mediana más alta del trimestre en la tercera decadiaria de este último mes.

Figura N° 17 Variabilidad de las concentraciones de O₃ troposférico por decadiaria

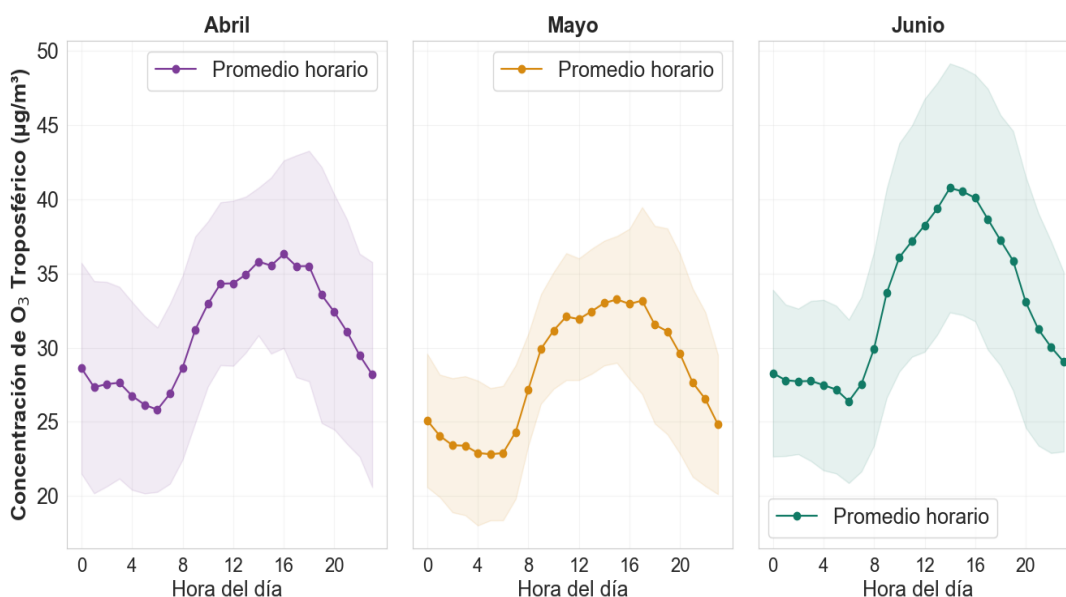


Respecto al ciclo horario de las concentraciones de O₃ troposférico (ver Figura N°18), en abril se registró un promedio horario mínimo de 25.82 µg/m³ a las 6:00 h y un promedio horario máximo de 36.30 µg/m³ a las 16:00 h. En cuanto a la variabilidad horaria, la desviación estándar mínima fue de 4.97 µg/m³ a las 14:00 h, mientras que la máxima alcanzó 8.63 µg/m³ a las 19:00 h. El promedio mensual para este mes fue de 31.07 µg/m³ con una desviación estándar de 7.34 µg/m³.

Durante mayo, el promedio horario mínimo fue de 22.82 µg/m³ a las 5:00 h y el promedio horario máximo de 33.25 µg/m³ a las 15:00 h. La desviación estándar mínima por hora se registró a las 9:00 h con un valor de 3.69 µg/m³, mientras que la máxima ocurrió a las 19:00 h con 6.94 µg/m³. El promedio mensual fue de 28.17 µg/m³ con una desviación estándar de 6.23 µg/m³, inferior a la observada en abril, lo que indica una menor variabilidad de las concentraciones durante mayo.

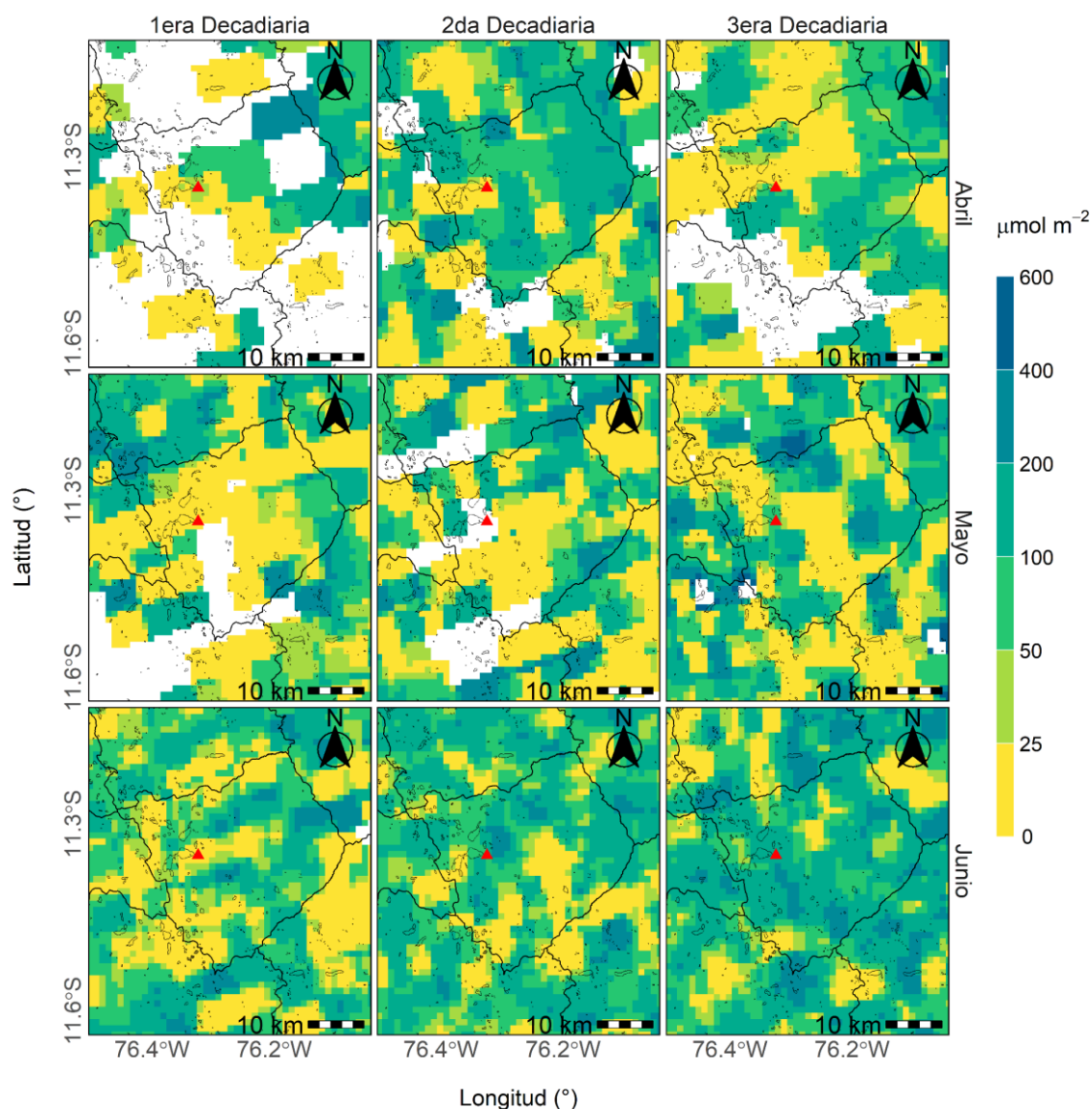
En junio, el promedio horario mínimo fue de 26.39 µg/m³ a las 6:00 h y el promedio horario máximo de 40.76 µg/m³ a las 14:00 h. La desviación estándar mínima por hora se registró a las 2:00 h con un valor de 4.90 µg/m³, mientras que la máxima ocurrió a las 17:00 h con 8.79 µg/m³. El promedio mensual fue de 33.03 µg/m³ con una desviación estándar de 8.70 µg/m³, superior a la observada en abril y mayo, lo que indica una mayor variabilidad de las concentraciones durante junio.

Figura N° 18 Ciclo horario promedio del O₃ troposférico por cada mes del trimestre



B. FORMALDEHIDO (HCHO)

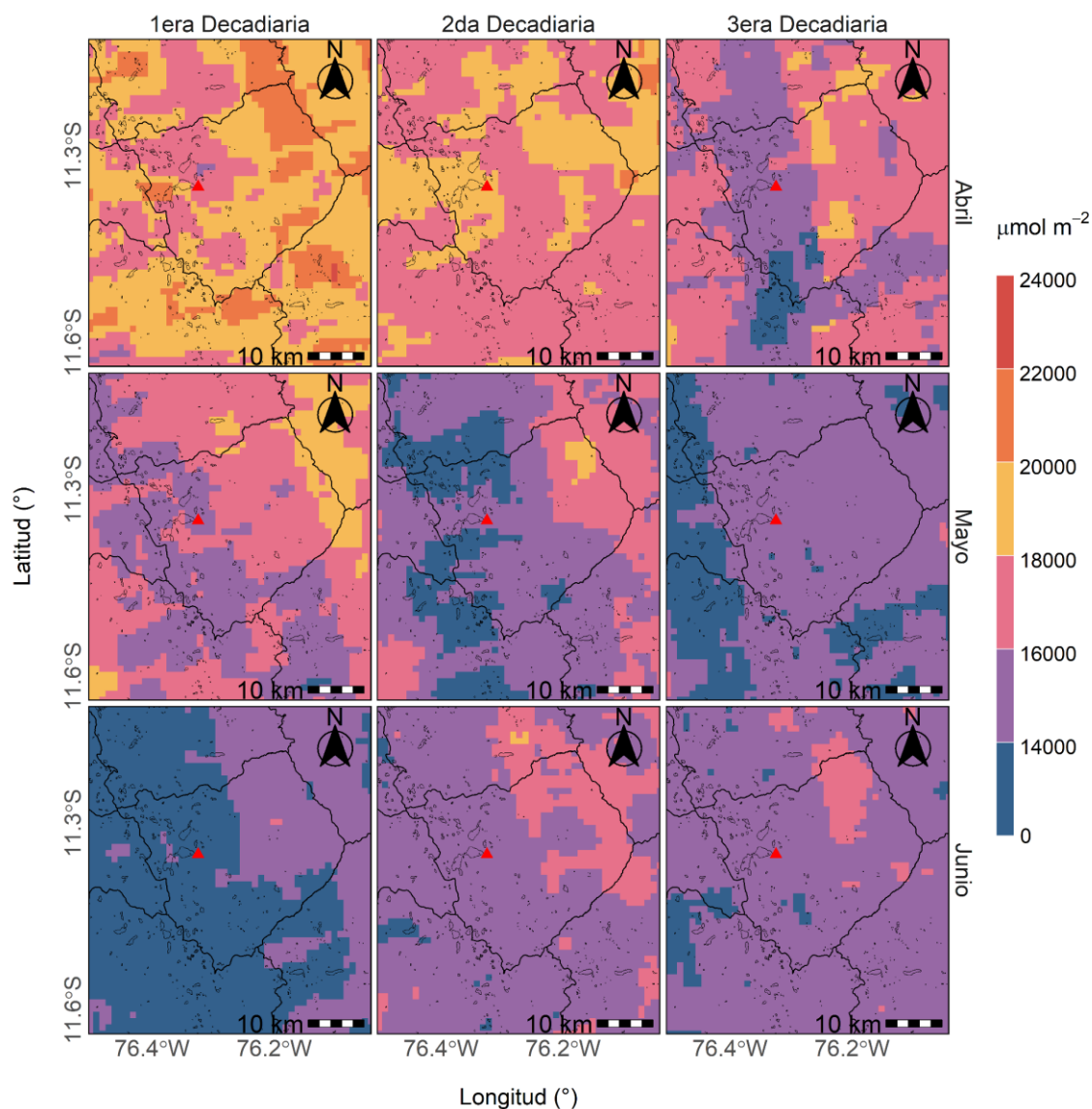
En el distrito de Marcapomacocha la densidad de HCHO en la columna troposférica presentó diferencias entre las decadiarias analizadas (ver Figura N°19). El valor máximo distrital se registró en la tercera decadiaria de mayo con 535.64 µmol/m², mientras que los promedios areales se ubicaron entre 78.98 µmol/m² en la tercera decadiaria de abril y 127.36 µmol/m² en la tercera decadiaria de junio. La desviación estándar alcanzó un máximo de 91.08 µmol/m² en la tercera decadiaria de mayo y presentó un mínimo de 49.82 µmol/m² en la tercera decadiaria de abril. Asimismo, para la ubicación del OVA Marcapomacocha se alcanzó un valor máximo de 149.71 µmol/m² en la segunda decadiaria de junio y un mínimo de 11.20 µmol/m² en la segunda decadiaria de abril.

Figura N° 19 Variación espacial del HCHO por decadiaria del trimestre


C. MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

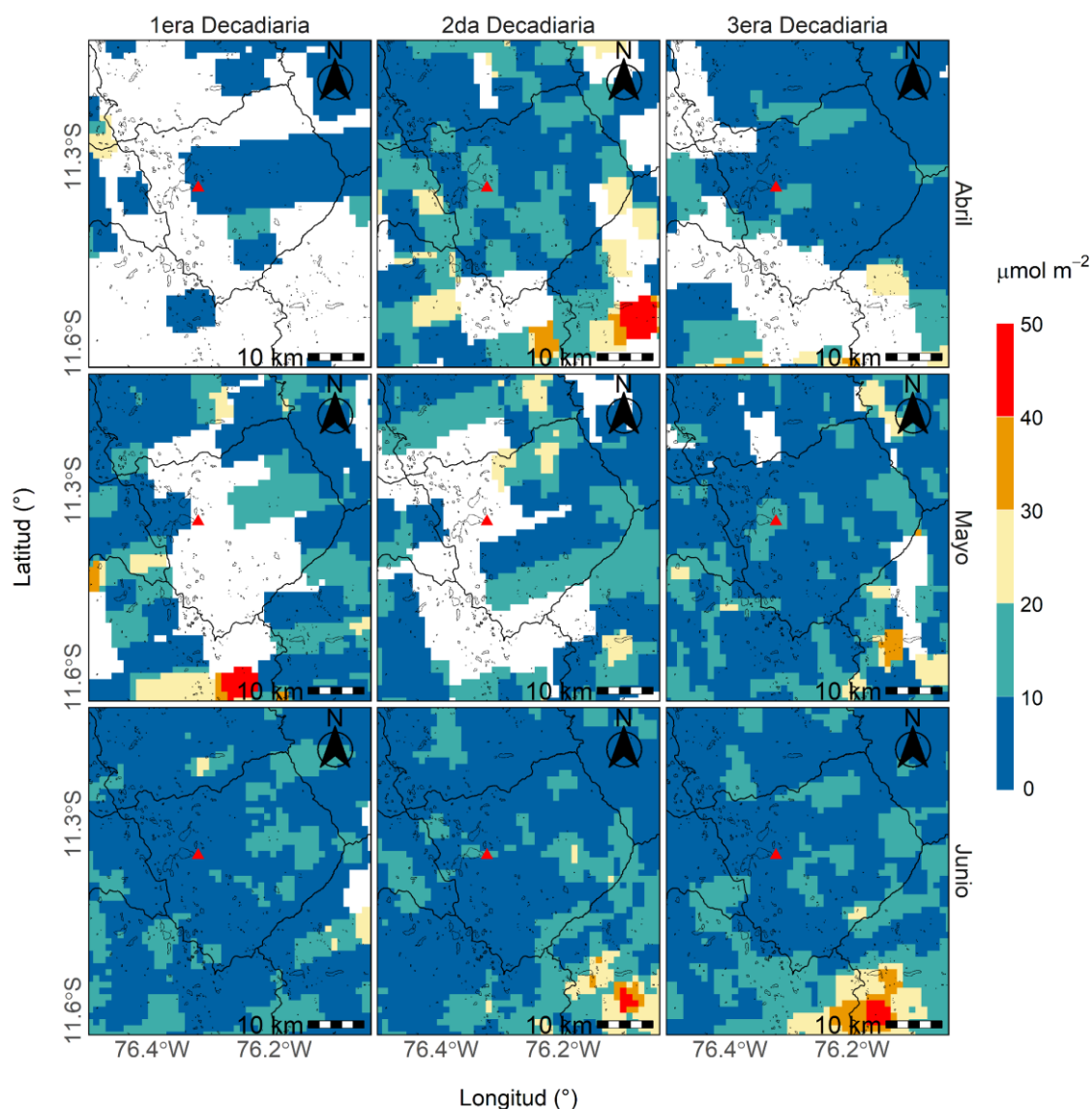
En relación a la variación espacial de la densidad de CO en la columna troposférica para el distrito de Marcapomacocha (ver Figura N°20), se registró el valor máximo distrital en la primera decadiaria de abril con $21810.56 \mu\text{mol/m}^2$, mientras que los promedios areales se ubicaron entre $13800.64 \mu\text{mol/m}^2$ en la primera decadiaria de junio y $18640.85 \mu\text{mol/m}^2$ en la primera decadiaria de abril. La desviación estándar alcanzó un máximo de $1462.89 \mu\text{mol/m}^2$ en la tercera decadiaria de abril y presentó un mínimo de $371.51 \mu\text{mol/m}^2$ en la tercera decadiaria de mayo. Asimismo, en el OVA Marcapomacocha se alcanzó un valor máximo de $18672.77 \mu\text{mol/m}^2$ en la segunda decadiaria de abril y un mínimo de $13451.94 \mu\text{mol/m}^2$ en la primera decadiaria de junio. En general, se evidencia una disminución de la densidad CO en la columna troposférica hacia la primera decadiaria de junio.

Figura N° 20 Variación espacial del CO por decadiaria del trimestre



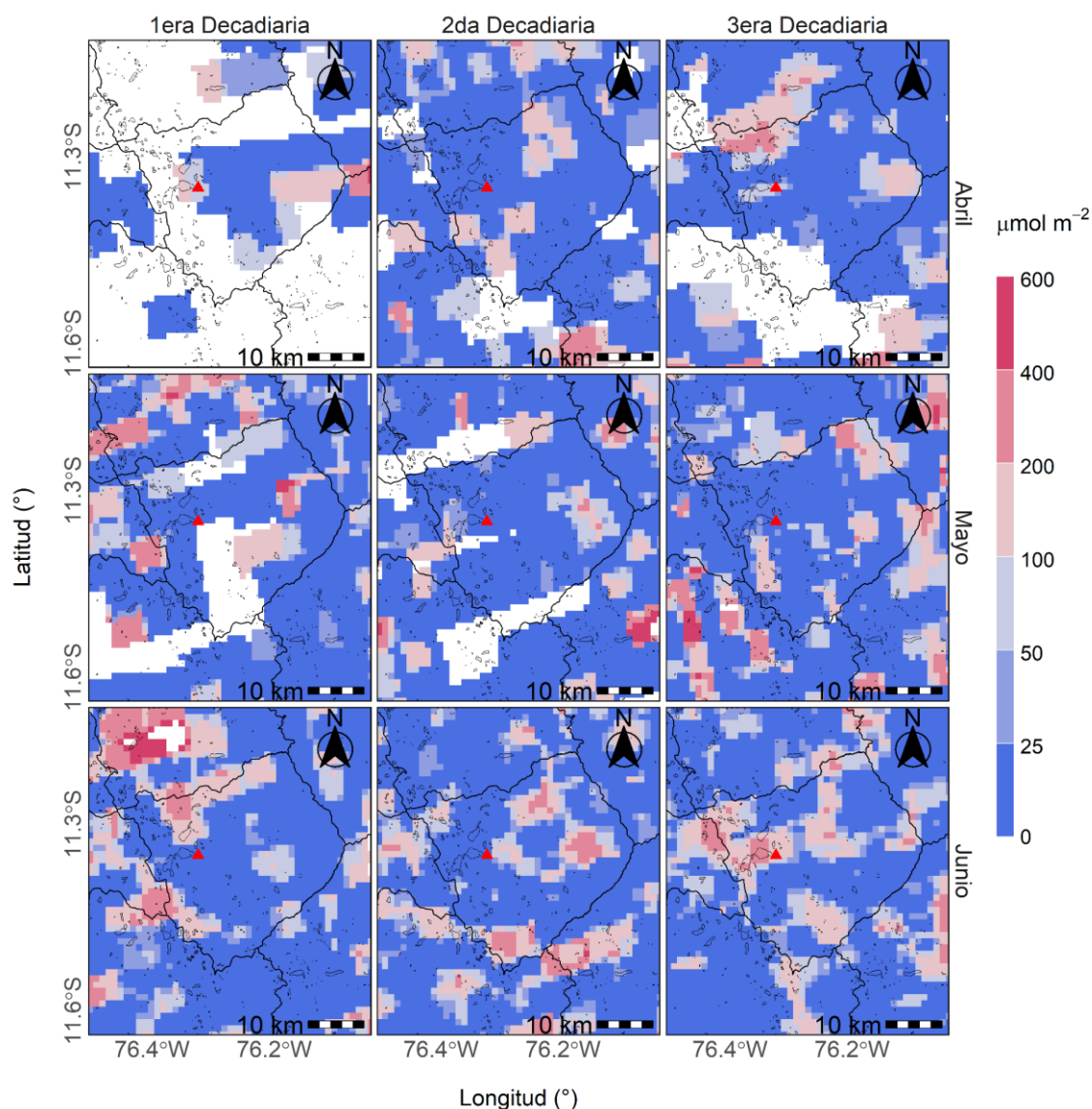
D. DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO_2)

En relación a la variación espacial de la densidad de NO_2 en la columna troposférica para el distrito de Marcapomacocha (ver Figura N°21), se registró el valor máximo distrital en la segunda decadiaria de abril con $26.32 \mu\text{mol/m}^2$, mientras que los promedios areales se ubicaron entre $7.18 \mu\text{mol/m}^2$ en la segunda decadiaria de junio y $11.06 \mu\text{mol/m}^2$ en la segunda decadiaria de mayo. La desviación estándar alcanzó un máximo de $6.43 \mu\text{mol/m}^2$ en la segunda decadiaria de mayo y presentó un mínimo de $1.93 \mu\text{mol/m}^2$ en la primera decadiaria de abril. Asimismo, en el OVA Marcapomacocha se alcanzó un valor máximo de $17.04 \mu\text{mol/m}^2$ en la tercera decadiaria de mayo y un mínimo de $1.78 \mu\text{mol/m}^2$ en la tercera decadiaria de junio. En general, se evidencia un aumento de la densidad de NO_2 hacia mayo que luego tiende a disminuir hacia las decadiarias de junio.

Figura N° 21 Variación espacial del NO₂ por decadiaria del trimestre


E. DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)

En relación a la variación espacial de la densidad de columna troposférica de SO₂ en el distrito de Marcapomacocha (ver Figura N°22), se registró el valor máximo distrital en la primera decadiaria de mayo con 541.10 $\mu\text{mol/m}^2$, mientras que los promedios areales se ubicaron entre 61.06 $\mu\text{mol/m}^2$ en la segunda decadiaria de mayo y 99.39 $\mu\text{mol/m}^2$ en la segunda decadiaria de junio. La desviación estándar alcanzó un máximo de 84.46 $\mu\text{mol/m}^2$ en la primera decadiaria de mayo y presentó un mínimo de 38.21 $\mu\text{mol/m}^2$ en la primera decadiaria de abril. Asimismo, en el OVA Marcapomacocha se alcanzó un valor máximo de 177.79 $\mu\text{mol/m}^2$ en la tercera decadiaria de junio y un mínimo de 6.41 $\mu\text{mol/m}^2$ en la segunda decadiaria de junio. En general, se evidencia una disminución de la densidad de columna troposférica de SO₂ hacia la segunda decadiaria de mayo, seguida de un incremento hacia las decadiarias de junio.

Figura N° 22 Variación espacial del SO₂ por decadiaria del trimestre


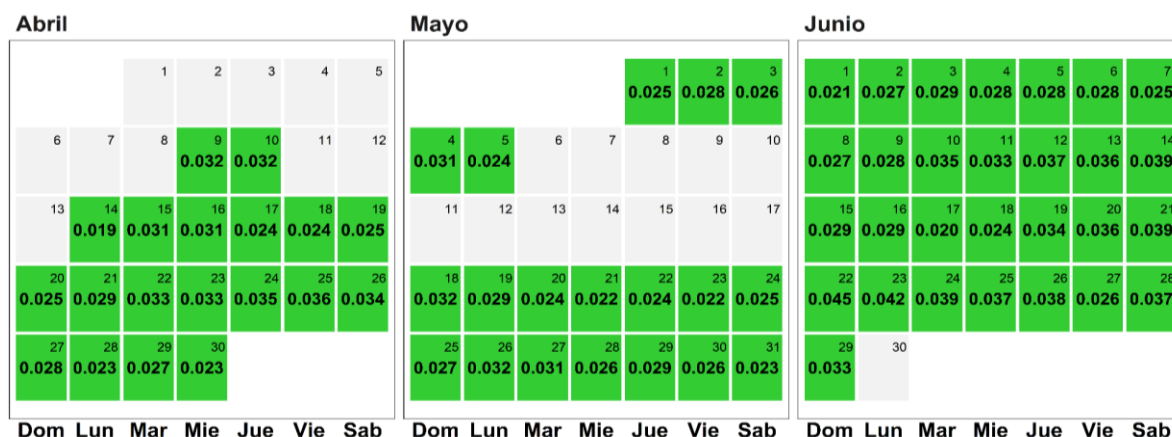
F. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE PARA O₃

El índice de calidad del aire (ICA), está basado en valores establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA por sus siglas en inglés). Asimismo, permite informar a la población sobre el estado de la calidad del aire, es decir, que tan limpio o saludable está el aire y los efectos que podría causar en la salud.¹⁹

La Figura N° 23 muestra los estados de calidad del aire para el O₃ troposférico a partir de máximos diarios de promedios de cada 8 horas. Se observa que durante el mes de abril se presentó 19 días con una calidad del aire "Buena". Para el mes de mayo, se presentó 19 días una calidad del aire "Buena". Finalmente, en el mes de junio se presentó 29 días con una calidad del aire "Buena".

¹⁹ Air Quality Index. A guide to Air Quality and Your Health. Obtenido de: https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/air_quality_brochure_02_14_0.pdf

Figura N° 23 Estados de calidad del aire para O₃ troposférico



Concentración O ₃ (ppm)		Estado	Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	0.054	Buena	0	50
0.055	0.070	Moderada	51	100
0.071	0.085	Insalubre para grupos sensibles	101	150
0.086	0.105	Insalubre	151	200

V.4 DEPOSICIÓN ATMOSFÉRICA TOTAL

Durante el segundo trimestre, no se realizaron mediciones respecto a la deposición atmosférica húmeda, debido al mantenimiento y calibración de equipos utilizados en el monitoreo.

V.5 ÁREA FOCAL DE AEROSOLES

En el OVA Marcapomacocha, se realiza la vigilancia de aerosoles mediante equipos automáticos (ver Figura N°26) para determinar la concentración en masa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y en número de aerosoles (cantidad de partículas/ m^3).

Figura N° 26 Equipamiento de medición para aerosoles en el OVA Marcapomacocha



Además, se complementa con el uso de imágenes satelitales sobre el Índice UV Aerosol derivadas del instrumento TROPOMI del satélite Sentinel-5 Precursor, parte del programa Copernicus, y sobre la profundidad óptica de aerosoles (AOD por sus siglas en inglés) a partir del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) a bordo de los satélites Terra y Aqua de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA por sus siglas en inglés).

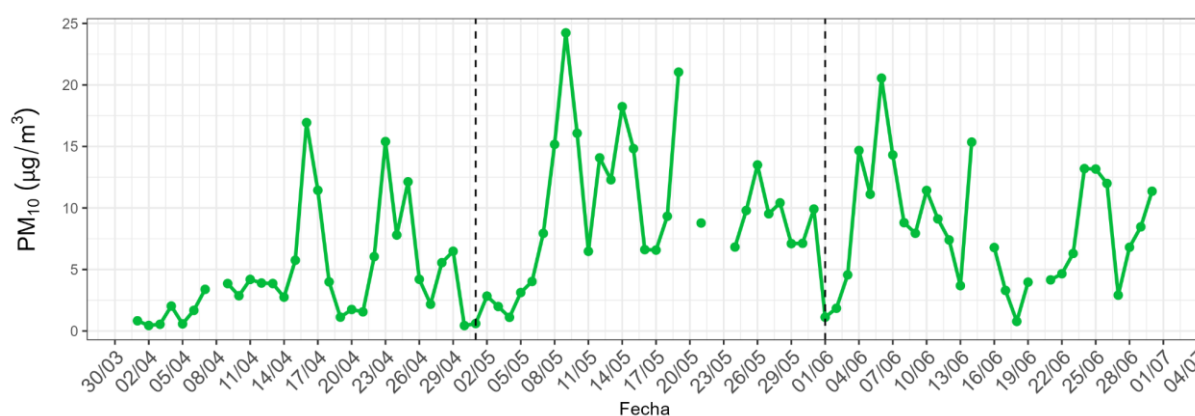
A. CONCENTRACIONES EN MASA

Con los datos del equipo METONE - 412 y monitor PurpleAir basado en sensores de bajo costo, se analizó la variabilidad diaria de las concentraciones de PM₁₀ (Material Particulado con diámetro menor a 10 micras) y PM_{2.5} (Material Particulado con diámetro menor a 2.5 micras) registradas en el OVA Marcapomacocha.

A.1. CONCENTRACIÓN EN MASA DE PM₁₀

La Figura N° 27 muestra la evolución temporal de las concentraciones promedio diarias de PM₁₀ registradas en el OVA Marcapomacocha durante el segundo trimestre del año, a partir de mediciones provenientes del perfilador de partículas METONE – 412. Durante el periodo analizado, se destaca que los promedios diarios más altos se presentaron entre el 8 y el 10 de mayo, alcanzando el 9 de mayo el valor máximo del trimestre de 24.2 µg/m³. En menor medida, se registraron incrementos entre el 17 y 19 de mayo, alcanzando el 19 de mayo el promedio diario de 21 µg/m³. Dichos incrementos estarían asociados al aumento de la temperatura, condiciones que favorecieron la resuspensión de polvo por acción del viento durante dichos días. Finalmente, se resalta que durante todos los meses no se registraron concentraciones diarias de PM₁₀ superiores al ECA – aire de 100 µg/m³ (como promedio diario)²⁰. En general, la concentración promedio mensual más alta ocurrió en el mes de mayo, con 9.6 µg/m³.

Figura N° 27 Variación de la concentración promedio diaria de PM₁₀

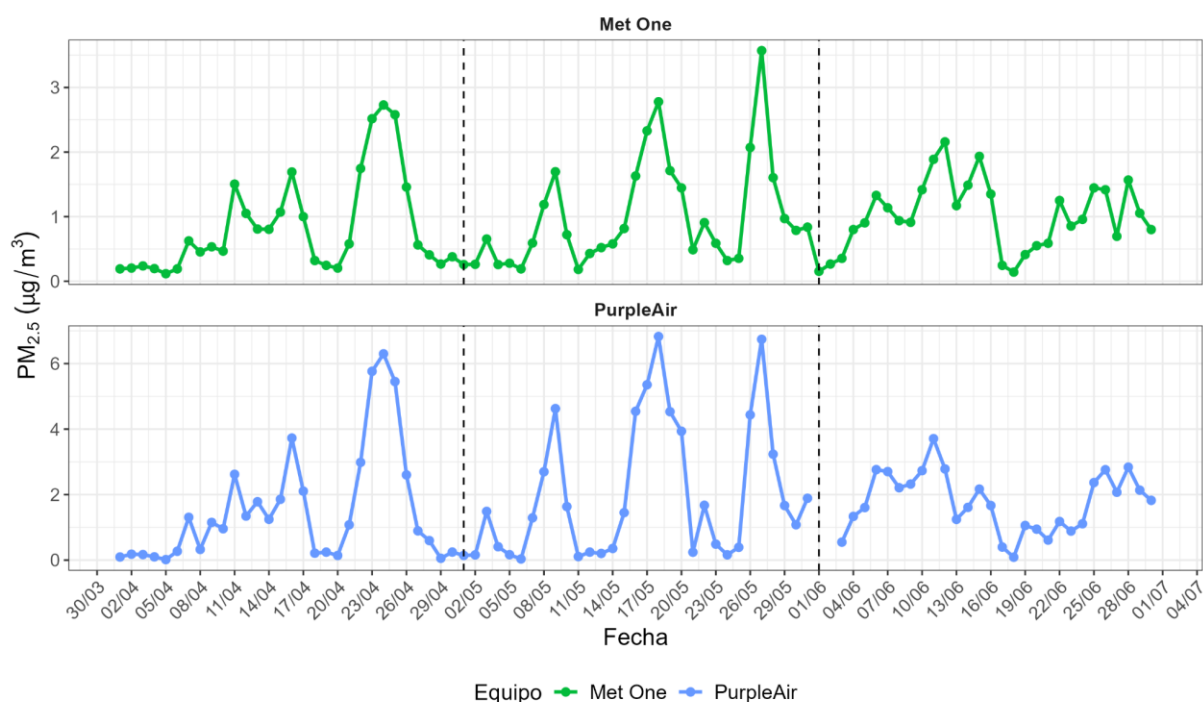


²⁰ De acuerdo con el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire (DS N° 010-2019-MINAM), para que un procedimiento alternativo automático – como el perfilador METONE-412 o el sensor PurpleAir – pueda ser comparados con los ECA correspondientes, es necesario que pase por un proceso de intercomparación. En este sentido, los procedimientos alternativos automáticos utilizados en el OVA para la medición de PM₁₀ y PM_{2.5}, se encuentran actualmente en proceso de intercomparación; por ello, la comparación con los ECA presentada en este Boletín debe considerarse únicamente de carácter referencial.

A.2. CONCENTRACIÓN EN MASA PARA EL PM_{2.5}

La Figura N° 28 presenta la evolución temporal de las concentraciones promedio diarias de PM_{2.5} registradas en el OVA Marcapomacocha durante el segundo trimestre, a partir de los datos obtenidos por el perfilador de partículas METONE – 412 y un sensor PurpleAir. En general, se observan concentraciones bajas durante el período de análisis, con episodios de incrementos ligeros que se presentan con mayor frecuencia hacia finales del mes de abril y durante el mes de mayo. Entre estos episodios destaca el registrado entre el 22 y 26 de abril, alcanzando el 24 de abril el valor promedio diario de 2.7 µg/m³ (MetOne 412) y 6.3 µg/m³ (PurpleAir); así como, el incremento registrado entre el 15 y 20 de mayo, alcanzando el 18 de mayo el valor de 2.8 µg/m³ (MetOne) y 6.8 µg/m³ (PurpleAir), con los máximos horarios alrededor de las primeras horas de la madrugada y en horas de la noche. Estos episodios, podrían encontrarse asociados a la mayor presencia de focos de calor, potencialmente vinculados a incendios forestales (Figura N° 8). Finalmente, se resalta que durante todo el periodo de análisis no se registraron concentraciones diarias de PM_{2.5} superiores al ECA – aire de 50 µg/m³ (como promedio diario).

Figura N° 28 Variación de la concentración promedio diaria de PM_{2.5}

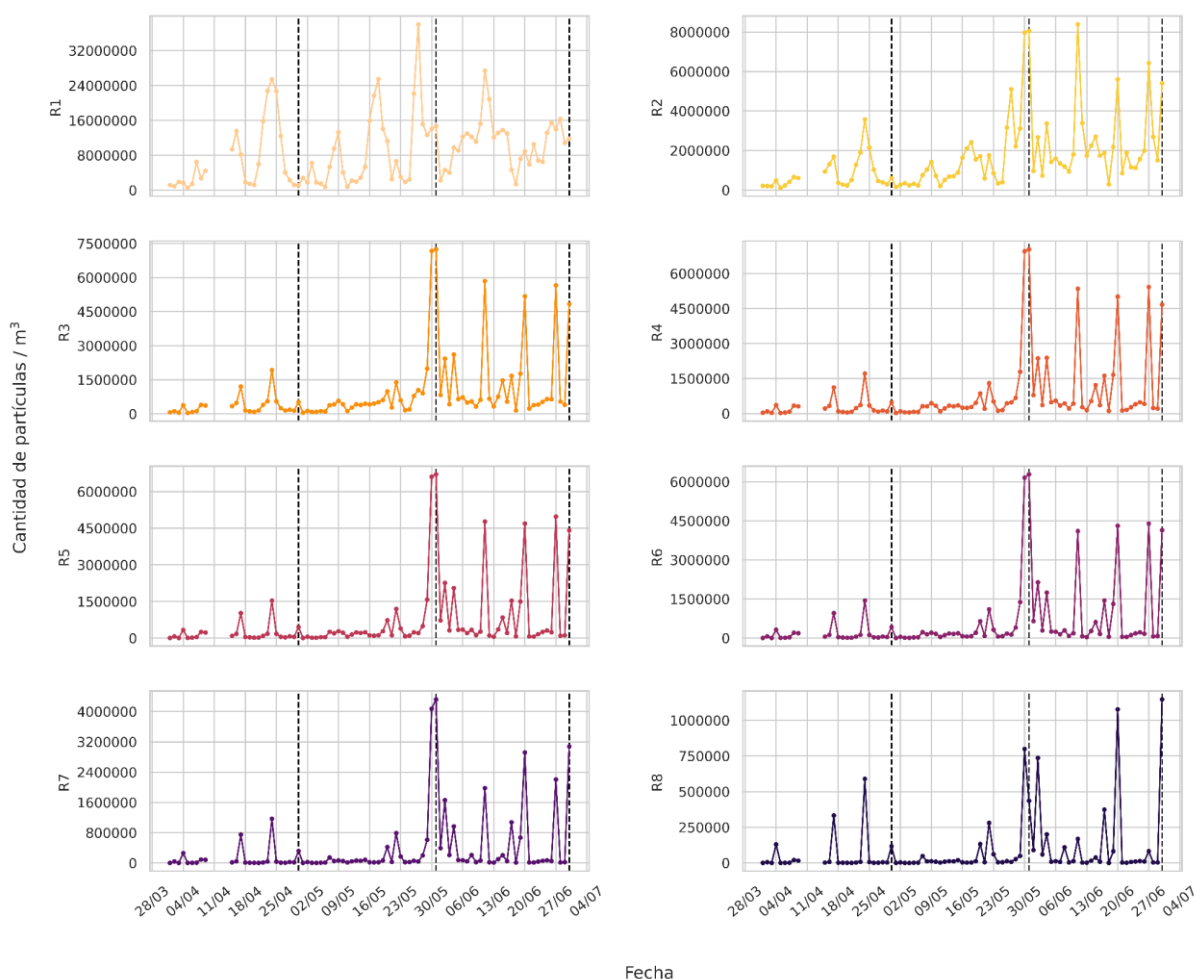


Generalmente, las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ en esta zona son bajas, atribuible a la limitada actividad antropogénica cercana. Las concentraciones más elevadas de PM₁₀ están asociadas a la resuspensión de polvo generada por la acción del viento, el paso de animales o vehículos en las proximidades del observatorio. Por otro lado, las concentraciones de PM_{2.5} se vinculan principalmente con la ocurrencia de quemas reducidas o incendios forestales, los cuales no se presentaron en gran medida durante el periodo estudiado.

B. CONCENTRACIÓN EN NÚMERO DE AEROSOL

La mayoría de los estudios sobre la concentración de contaminantes atmosféricos se enfocan en la medición en masa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). No obstante, existe evidencia que sugiere que las concentraciones basadas en el número de partículas y su composición química tienen mayor relevancia para evaluar ciertos impactos en la salud que las concentraciones en masa^{21 22}. Para describir el comportamiento de la concentración en número de partículas en el OVA Marcapomacocha se han establecido rangos (R), los cuales están categorizados de acuerdo al diámetro aerodinámico (d)²³: R1 ($0,3 \mu\text{m} \leq d < 0,5 \mu\text{m}$), R2 ($0,5 \mu\text{m} \leq d < 0,7 \mu\text{m}$), R3 ($0,7 \mu\text{m} \leq d < 1,0 \mu\text{m}$), R4 ($1,0 \mu\text{m} \leq d < 2,0 \mu\text{m}$), R5 ($2,0 \mu\text{m} \leq d < 3,0 \mu\text{m}$), R6 ($3,0 \mu\text{m} \leq d < 5,0 \mu\text{m}$), R7 ($5,0 \mu\text{m} \leq d < 10,0 \mu\text{m}$) y R8 ($10,0 \mu\text{m} \leq d < 20,0 \mu\text{m}$)²⁴. En este contexto, la concentración en número de partículas se expresa como el total de partículas por unidad de volumen de aire.

Figura N° 29 Variación del promedio diario de la concentración en número de aerosoles



Durante el segundo trimestre (ver Figura N°29), las mayores concentraciones promedio diarias en número de partículas se observaron en el rango R1 alcanzando

²¹ "[...] Dado que la concentración de masa de las partículas ultrafinas es insignificante en comparación con la de las partículas de mayor tamaño, parece más adecuado correlacionar su concentración numérica con los efectos sobre la salud en lugar de su concentración de masa [...]". Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231097002604>

²² UK AIR Air Information Resource (2022). Particle Numbers and Concentrations Network. Revisado el 1 de octubre del 2022 desde: <https://bit.ly/3D80Ap4>

²³ El diámetro aerodinámico es un indicador del tamaño de la partícula (World Health Organization Europe, 2005).

²⁴ Cangiamila, S. (2019). Utilizzo e prestazioni di sensori low-cost per il monitoraggio di varie frazioni dimensionali di particolato atmosferico. Universidad de Bologna.

un máximo de 38 027 646 el día 27 de mayo, seguidamente del rango R2, que alcanzó un máximo de 8 389 442 partículas/m³ el 11 de junio. Por otro lado, los rangos R3, R4, R5, R6 y R7 alcanzaron un máximo de 7 243 732, 7 039 368, 6 707 909, 6 285 421 y 4 324 173, respectivamente el 31 de mayo. Finalmente, el rango R8 registró valores máximos de hasta 1 147 698 partículas/m³ el 30 de junio.

En general, respecto a los aerosoles en la ubicación del OVA Marcapomacocha, las partículas finas (diámetro menor a 2.5 micras) están asociadas a la ocurrencia de incendios, incluyendo los incendios forestales ocurridos en otras latitudes (transporte transfronterizo). Por otro lado, las partículas en el rango de la fracción gruesa (diámetro entre 2.5 y 10 micras) provienen del polvo resuspendido por efecto de la actividad vehicular en caminos de trocha o por acción de los vientos.

C. INDICE UV DE AEROSOLES

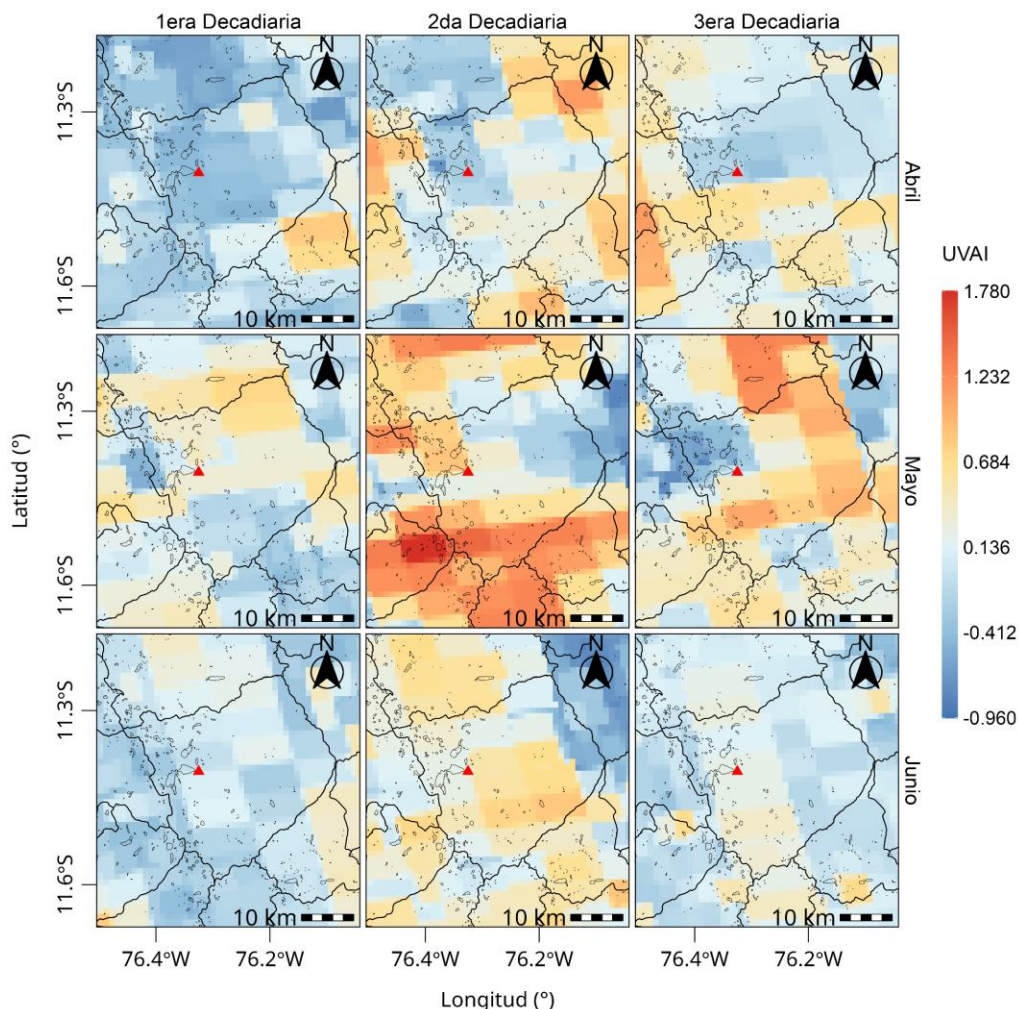
El índice UV Aerosol (UVAI), es una medida de la prevalencia de los aerosoles en la atmósfera, el cual se basa en la diferencia entre la reflectancia observada y la modelada para un par de longitudes de onda (354 y 388 nm) en el rango espectral ultravioleta (UV) que genera un valor residual. Cuando este valor residual es positivo, indica la presencia de aerosoles que absorben los rayos UV, como el polvo y el humo (p.ej. debido a la quema de biomasa), y a menudo se denomina índice de aerosoles absorbentes (IAA).²⁵ Las nubes generan valores residuales cercanos a cero, y los valores residuales muy negativos pueden indicar la presencia de aerosoles no absorbentes, incluidos los aerosoles de sulfato.²⁶

En relación a la variación espacial de los valores máximos del UVAI por cada decadiaria del segundo trimestre para el distrito de Marcapomacocha (ver Figura N° 30), se observó que se alcanzaron valores máximos de hasta 1.46 en la segunda decadiaria de mayo y 1.21 en la tercera decadiaria de mayo. Asimismo, el promedio areal, indica que el mayor valor corresponde a la tercera decadiaria de mayo (0.45). En general, para la ubicación del OVA Marcapomacocha, hacia finales del trimestre predominaron valores positivos con una tendencia incremento, cuyo valor máximo se alcanzó en la segunda decadiaria del mes de junio (0.23). Dichos valores estarían asociados a la disminución de las precipitaciones y mayor ocurrencia de incendios forestales en la amazonía del Perú y países cercanos como Brasil y Bolivia.

²⁵ European Space Agency & KNMI, Sentinel-5P Level-2 Product User Manual – Aerosol Index (AER_AI), S5P-KNMI-L2-0026-MA, 2022. Disponible en: <https://sentinel.esa.int/documents/247904/2474726/Sentinel-5P-Level-2-Product-User-Manual-Aerosol-Index-product.pdf>

²⁶ European Space Agency (ESA) & KNMI, Sentinel-5P TROPOMI Algorithm Theoretical Basis Document: UV Aerosol Index (UVAI), S5P-KNMI-L2-0008-RP, 2018. Disponible en: <https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/2476257/Sentinel-5P-TROPOMI-ATBD-UV-Aerosol-Index.pdf>

Figura N° 30 Variación espacial del UVAI por decadiaria del trimestre



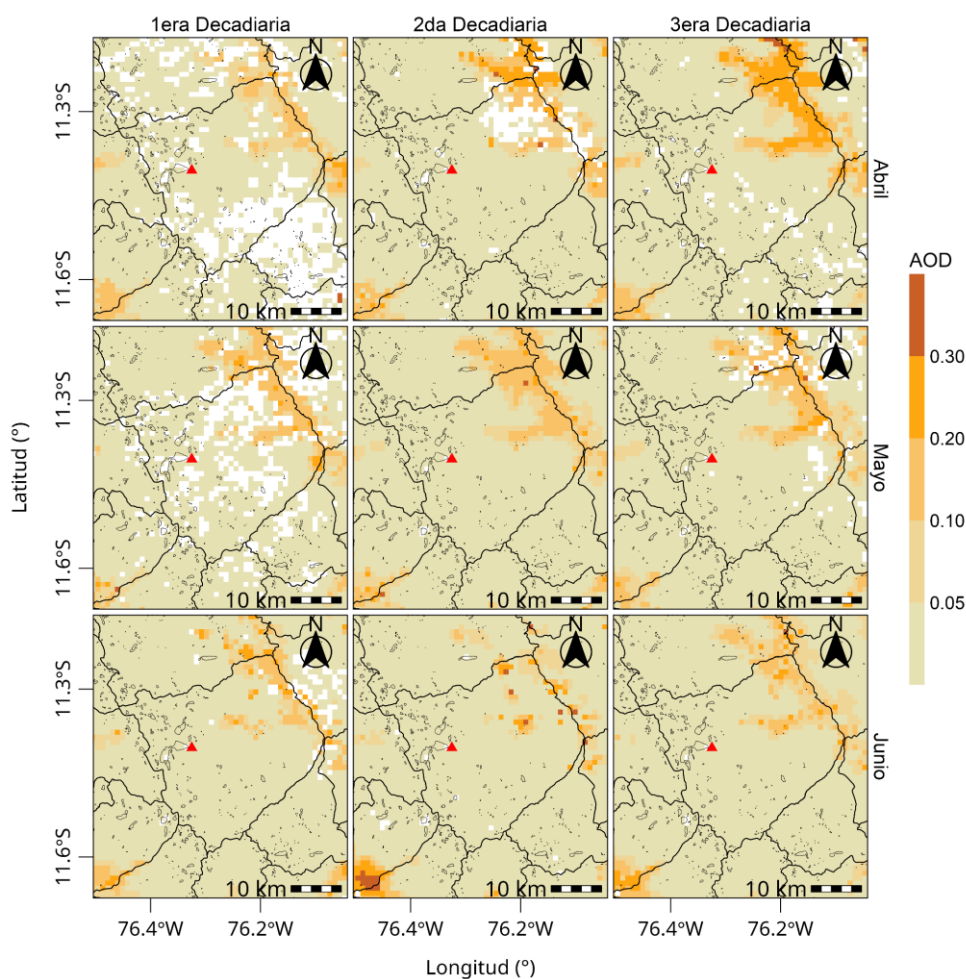
D. PROFUNDIDAD ÓPTICA DE AEROSOL

La profundidad óptica de aerosoles (AOD por sus siglas en inglés), es una medida de cuánto reducen las partículas en el aire el paso de la luz a través de la atmósfera. Los aerosoles absorben y dispersan la luz solar entrante, reduciendo así la visibilidad y aumentando la carga óptica. En términos generales, un AOD inferior a 0.1 indica un cielo cristalino con máxima visibilidad, mientras que valores cercanos a 1 indica la presencia de aerosoles tan densos que la gente tendría dificultades para ver el Sol incluso al mediodía.²⁷

En relación a la variación espacial de los valores máximos del AOD por cada decadiaria del segundo trimestre para el distrito de Marcapomacocha (ver Figura N° 31), se observó que se alcanzaron valores máximos de hasta 0.324 en la primera decadiaria de mayo. Asimismo, el promedio areal, indica que la decadiaria con el mayor valor corresponde a la primera decadiaria de junio (0.048).

²⁷ Aerosol Optical Depth. Obtenido de: https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MODAL2_M_AER_OD
https://neo.gsfc.nasa.gov/view.php?datasetId=MODAL2_M_AER_OD&date=2025-11-01

Figura N° 31 Variación espacial del AOD por decadiaria del trimestre



E. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE

La estimación del índice de calidad del aire (ICA) por material particulado ²⁸ consideró los promedios diarios de los valores de concentración en masa registrados por el METONE – 412.

E.1. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM₁₀

La Figura N° 32 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM₁₀ asociados a su respectivo estado de la calidad del aire. Se observa que todos los días de los meses de abril, mayo y junio presentaron una calidad del aire “Buena”.

²⁸ Final Updates to the Air Quality Index (AQI) for Particulate Matter. Obtenido de: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-02/pm-naaqs-air-quality-index-fact-sheet.pdf> <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-02/pm-naaqs-air-quality-index-fact-sheet.pdf>

Figura N° 32 Estados de calidad del aire para PM₁₀

Abril							Mayo							Junio						
			1	2	3	4	5				1	2	3	1	2	3	4	5	6	7
			0.8	0.4	0.5	2	0.6				0.6	2.8	2	1.1	1.8	4.6	14.7	11.1	20.6	14.3
6	7	8	9	10	11	12	4	5	6	7	8	9	10	8	9	10	11	12	13	14
1.7	3.4		3.9	2.9	4.2	3.9	1.1	3.1	4	7.9	15.2	24.2	16.1	8.8	7.9	11.4	9.1	7.4	3.7	15.4
13	14	15	16	17	18	19	11	12	13	14	15	16	17	15	16	17	18	19	20	21
3.9	2.8	5.8	16.9	11.4	4	1.1	6.5	14.1	12.3	18.2	14.8	6.6	6.6		6.8	3.3	0.8	4		4.2
20	21	22	23	24	25	26	18	19	20	21	22	23	24	22	23	24	25	26	27	28
1.7	1.6	6	15.4	7.8	12.1	4.2	9.3	21		8.8			6.8	4.7	6.3	13.2	13.2	12	2.9	6.8
27	28	29	30				25	26	27	28	29	30	31	29	30					
2.2	5.6	6.5	0.4				9.8	13.5	9.5	10.4	7.1	7.1	9.9	8.5	11.4					
Dom	Lun	Mar	Mie	Jue	Vie	Sab	Dom	Lun	Mar	Mie	Jue	Vie	Sab	Dom	Lun	Mar	Mie	Jue	Vie	Sab

Concentración PM ₁₀ (µg/m ³)		Estado	Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	54	Buena	0	50
55	154	Moderada	51	100
155	254	Insalubre para grupos sensibles	101	150
255	354	Insalubre	151	200

E.2. INDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM_{2.5}

La Figura N° 33 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM_{2.5} asociados a su respectivo estado de la calidad del aire. Se observa que, al igual que en el caso del PM₁₀, todos los días de los meses de abril, mayo y junio presentaron una calidad del aire “Buena”.

Figura N° 33 Estados de calidad del aire para PM_{2.5}

Abril							Mayo							Junio						
			1	2	3	4	5				1	2	3	1	2	3	4	5	6	7
			0.2	0.2	0.2	0.2	0.1				0.3	0.3	0.7	0.2	0.3	0.4	0.8	0.9	1.3	1.1
6	7	8	9	10	11	12	4	5	6	7	8	9	10	8	9	10	11	12	13	14
0.2	0.6	0.5	0.5	0.5	1.5	1	0.3	0.3	0.2	0.6	1.2	1.7	0.7	0.9	0.9	1.4	1.9	2.2	1.2	1.5
13	14	15	16	17	18	19	11	12	13	14	15	16	17	15	16	17	18	19	20	21
0.8	0.8	1.1	1.7	1	0.3	0.2	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1.6	2.3	1.9	1.4	0.2	0.1	0.4	0.6	0.6
20	21	22	23	24	25	26	18	19	20	21	22	23	24	22	23	24	25	26	27	28
0.2	0.6	1.7	2.5	2.7	2.6	1.5	2.8	1.7	1.4	0.5	0.9	0.6	0.3	1.2	0.9	1	1.4	1.4	0.7	1.6
27	28	29	30				25	26	27	28	29	30	31	29	30					
0.6	0.4	0.3	0.4				0.4	2.1	3.6	1.6	1	0.8	0.8	1.1	0.8					
Dom	Lun	Mar	Mie	Jue	Vie	Sab	Dom	Lun	Mar	Mie	Jue	Vie	Sab	Dom	Lun	Mar	Mie	Jue	Vie	Sab

Concentración PM _{2.5} (µg/m ³)		Estado	Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	9	Buena	0	50
9.1	35.4	Moderada	51	100
35.5	55.4	Insalubre para grupos sensibles	101	150
55.5	125.4	Insalubre	151	200

V.6 ÁREA FOCAL DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

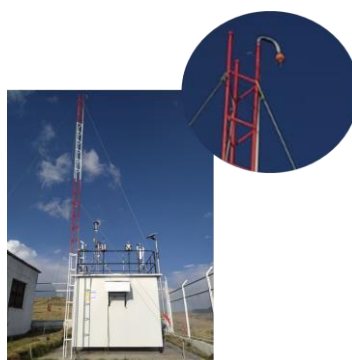
Durante el segundo trimestre del 2025, se realizó la vigilancia de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el OVA Marcapomacocha mediante el equipo analizador de gases de la marca Picarro modelo G2401 (ver Figura N° 34). Dicho equipo tiene el principio de medición basado en la técnica de espectroscopía de cavidad "ring-down" (CDRS, por sus siglas en inglés) que permite medir las concentraciones de dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄)²⁹, con una resolución temporal de 2.5 segundos.

Figura N° 34 Equipo analizador de GEI - Picarro G2401



Asimismo, la toma de muestra de GEI, se ubica a una altura de 11 m del suelo (ver Figura N° 35).

Figura N° 35 Ubicación de la toma de muestra del equipo Picarro G2401



A. DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)

El CO₂ es el gas de efecto invernadero o gas que atrapa el calor, más abundante en la atmósfera, contribuye en aproximadamente el 66 % al forzamiento radiativo producido por estos gases de larga vida. Asimismo, es responsable de alrededor del

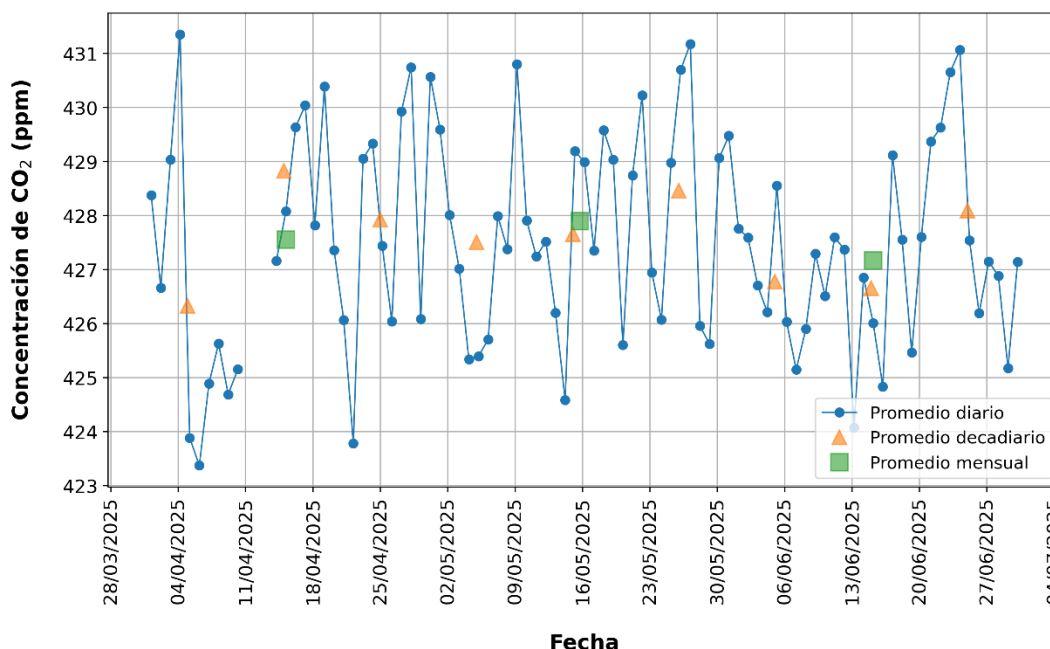
²⁹ Datos referenciales que se encuentran en proceso de adecuación a las Directrices de medición para las observaciones de CO₂, CH₄ y N₂O en las estaciones de vigilancia de la atmósfera global de la Organización Meteorológica Mundial.

79% del aumento del forzamiento radiativo durante la última década y alrededor del 77% del aumento en los últimos cinco años.³⁰

Este gas que tiene valores más elevados en primavera y más bajos en otoño, proviene de la extracción y quema de combustibles fósiles (como carbón, petróleo y gas natural), de incendios forestales y de procesos naturales como erupciones volcánicas.³¹ Si bien las emisiones de CO₂ provienen de diversas fuentes naturales, las emisiones relacionadas con las actividades del ser humano son las responsables del aumento que se ha registrado en la atmósfera desde la revolución industrial. Estas actividades añaden más CO₂ a la atmósfera e influyen en la capacidad de los disipadores naturales (como los bosques) para eliminarlo de la atmósfera a través del almacenamiento de carbono en el suelo.³²

La Figura N° 36 muestra la evolución del promedio diario de CO₂ durante el segundo trimestre, donde se destaca que los valores más altos se encontraron en la primera decadiaria de abril (día 4 - 431.4 ppm) y tercera decadiaria de mayo (día 27 - 431.2 ppm). Por otro lado, el valor más bajo se encontró en la primera decadiaria de abril (día 6 - 423.4 ppm). Asimismo, el promedio decadiario más alto corresponde a la segunda decadiaria de abril con 428.8 ppm; mientras que, el valor más bajo corresponde a la primera decadiaria de abril con 426.3 ppm. En general, mayo presentó el promedio más alto (427.9 ppm) en comparación a los meses de abril y junio.

Figura N° 36 Evolución del promedio diario, decadiario y mensual de CO₂ durante el segundo trimestre



Respecto al ciclo horario de las concentraciones de CO₂ (ver Figura N° 37), se observa para cada mes del trimestre que, en promedio los mayores valores se dan

³⁰ WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 20. Obtenido de: <https://library.wmo.int/records/item/69057-no-20-28-october-2024>

³¹ Dióxido de carbono. Obtenido de: <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/dioxido-de-carbono/>

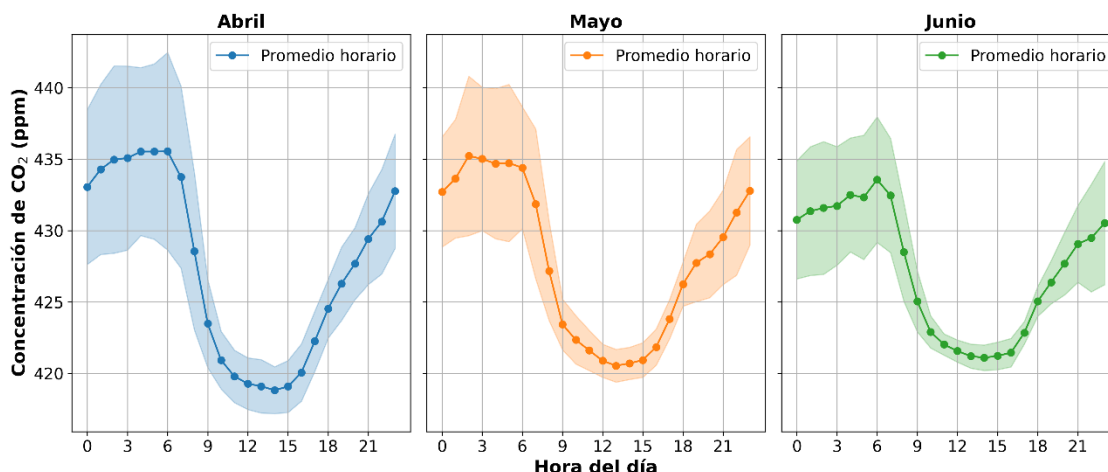
³² Emisiones de dióxido de carbono. Obtenido de: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>

durante el horario nocturno, alcanzando los mayores valores entre las 00:00 horas a 07:00 horas; mientras que entre las 10:00 a 16:00 horas se alcanzan los menores valores. Esto, puede deberse a la estabilidad atmosférica de horas de la noche, lo que provoca que el CO₂ no se mezcle en la atmósfera, a diferencia del horario matutino y vespertino. Los valores bajos de CO₂ durante el horario matutino y vespertino, puede deberse también al proceso de fotosíntesis de las plantas, por ello la menor concentración durante las horas de mayor radiación solar.

Durante abril, el promedio horario de CO₂ osciló entre 418.8 ppm (14:00 horas) y 435.5 ppm (06:00 horas), con desviaciones estándar de 1.64 ppm a 6.91 ppm. En mayo, el rango de los promedios horarios estuvo entre 420.5 ppm (13:00 horas) y 435.2 ppm (02:00 horas), con desviaciones estándar entre 1.12 ppm y 5.58 ppm. En junio, los promedios horarios se presentaron de 421.1 ppm (14:00 horas) a 433.6 ppm (06:00 horas), con desviaciones estándar de 0.74 ppm a 4.65 ppm.

En general, se puede apreciar que, para el trimestre, tanto los promedios horarios más altos como más bajos se encontraron en el mes de abril; mientras que, la menor variabilidad se presentó en el mes de junio.

Figura N° 37 Ciclo horario promedio del CO₂ por mes del trimestre



B. METANO (CH₄)

El CH₄ es un gas de efecto invernadero que contribuye con aproximadamente el 16% del forzamiento radiativo producido por estos gases de larga vida. Asimismo, alrededor del 40% del metano se emite a la atmósfera proviene de fuentes naturales (por ejemplo, humedales y descomposición por termitas), y alrededor del 60% proviene de fuentes antropogénicas (por ejemplo, rumiantes, agricultura del arroz, explotación de combustibles fósiles, vertederos, aguas residuales y quema de biomasa).³³

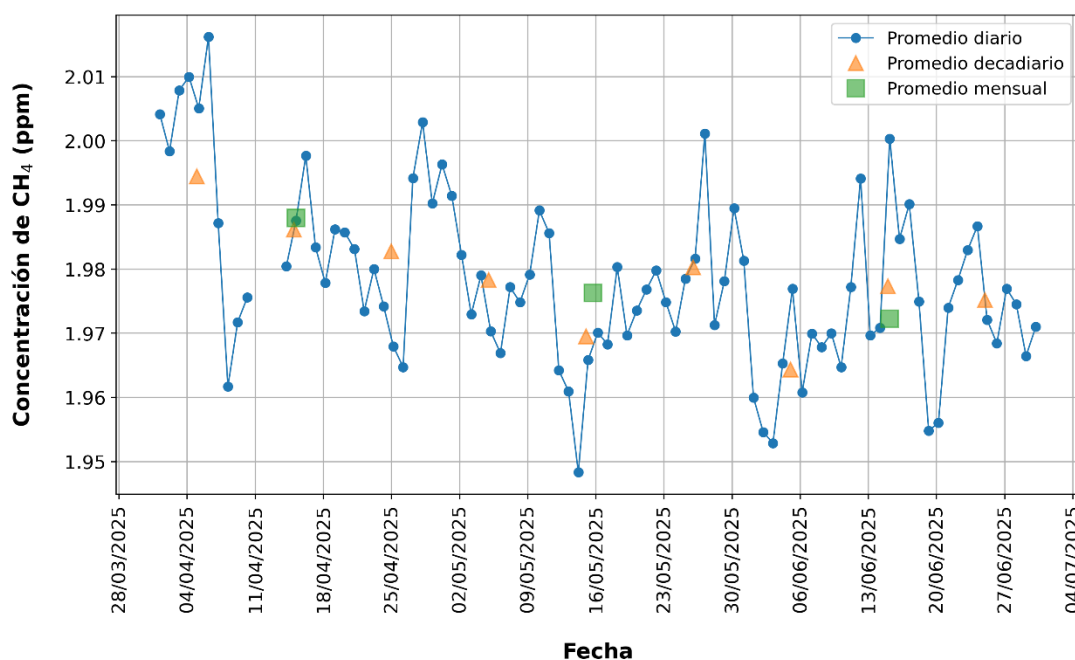
Este potente gas de efecto invernadero es el segundo contribuyente más grande al calentamiento climático después del dióxido de carbono (CO₂). Una molécula de metano atrapa más calor que una molécula de CO₂; no obstante, el metano

³³ WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 20. Obtenido de: <https://library.wmo.int/records/item/69057-no-20-28-october-2024>

tiene una vida relativamente corta de 7 a 12 años en la atmósfera, mientras que el CO₂ puede persistir durante cientos de años o más.³⁴

La Figura N° 38 muestra la evolución del promedio diario de CH₄ durante el segundo trimestre, donde se destaca que los valores más altos se encontraron en la primera decadiaria de abril (día 6 – 2.016 ppm y día 4 – 2.01 ppm). Por otro lado, el valor más bajo se encontró en la segunda decadiaria de mayo (día 14 – 1.948 ppm). Asimismo, el promedio decadiario más alto corresponde a la primera decadiaria de abril con 1.994 ppm; mientras que, el valor más bajo corresponde a la primera decadiaria de junio con 1.964 ppm. En general, abril presentó el promedio más alto (1.988 ppm) y en contraparte, junio presentó el promedio más bajo (1.972 ppm).

Figura N° 38 Evolución del promedio diario, decadiario y mensual de CH₄ durante el segundo trimestre



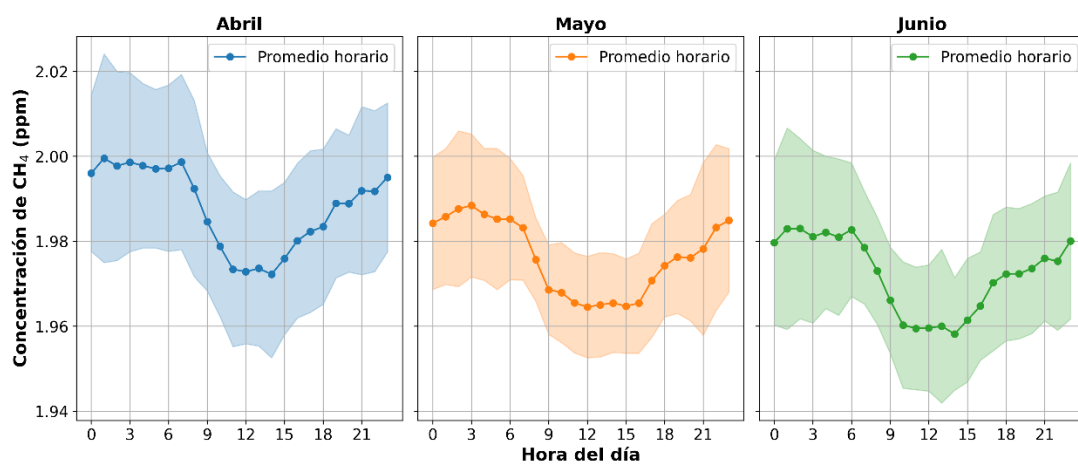
Respecto al ciclo horario de las concentraciones de CH₄ (ver Figura N° 39), se observa para cada mes del trimestre que, en promedio los mayores valores se dan entre las 19:00 horas a 07:00 horas; mientras que entre las 10:00 a 16:00 horas se alcanzan los menores valores. Esto, puede deberse a la estabilidad atmosférica de horas de la noche, lo que provoca que el CH₄ no se mezcle en la atmósfera, a diferencia del horario matutino y vespertino.

Durante abril, el promedio horario de CH₄ osciló entre 1.972 ppm (14:00 horas) y 1.999 ppm (01:00 horas), con desviaciones estándar de 0.016 ppm a 0.024 ppm. En mayo, el rango de los promedios horarios estuvo entre 1.964 ppm (12:00 horas) y 1.988 ppm (03:00 horas), con desviaciones estándar entre 0.009 ppm y 0.02 ppm. En junio, los promedios horarios se presentaron de 1.958 ppm (14:00 horas) a 1.983 ppm (02:00 horas), con desviaciones estándar de 0.012 ppm a 0.023 ppm.

En general, se puede apreciar que, para el trimestre, los promedios horarios más altos se encontraron en el mes de abril; mientras que, los promedios más bajos se presentaron en el mes de junio.

³⁴ Metano. Obtenido de: <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/metano/>

Figura N° 39 Ciclo horario promedio del CH₄ por cada mes del trimestre



VI. CONCLUSIONES

- Durante el segundo trimestre del año, las masas de aire que llegaron al OVA Marcapomacocha para 500 hPa tuvieron una predominancia variable de procedencia, las cuales se encontraron principalmente entre el Sur-suroeste (SSO) y Sur-sureste (SSE).
- En cuanto a las condiciones meteorológicas locales, los vientos mostraron intensidades extremas en el horario vespertino para todo el trimestre y en el horario matutino para el mes de mayo. Por su parte, la precipitación presentó una tendencia a disminuir hacia junio con un máximo acumulado diario de 6 mm, al igual que la humedad relativa que descendió a un promedio diario de 57%. Respecto a la temperatura, también se presentaron máximos diarios más bajos hacia el mes de junio con un promedio de 10.4 °C. En cuanto al comportamiento de la radiación solar no fue la excepción con una disminución en los picos mensuales, descendiendo hasta acumulados diarios de 7201 W/m² en junio.
- Durante los meses de mayo y junio se presentaron las mayores cantidades de focos de calor y de potencia radiativa, lo cual estaría asociado a la disminución progresiva de las precipitaciones y mayor ocurrencia de incendios forestales en el interior del país.
- Respecto a la Columna Total de Ozono, el mayor valor del trimestre fue 245 UD, los cuales se alcanzaron en todos los meses y estuvieron por encima de su normal climática; mientras que, el valor más bajo fue de 237 UD, el cual se presentó en la segunda decadiaria de abril (día 20) y que estuvo por debajo de su normal climática. En general, los valores diarios se mantuvieron por encima de 220 UD, indicando la ausencia de agujeros de ozono.
- La radiación UVE y UVT alcanzaron sus mayores valores en la tercera decadiaria de abril (día 22); mientras que, los menores valores en la segunda decadiaria de junio (día 15). Asimismo, en promedio durante el trimestre, la radiación UVE representó el 0.45% de la radiación UVT.
- Durante los meses de abril y mayo predominó el IUV máximo diario de categoría Extremadamente Alta; mientras que los menores valores del IUV máximo diario se encontraron en la tercera decadiaria de abril y todas las decadiarias de junio (categoría Alta).
- En relación al O₃ troposférico, los promedios móviles de 8 horas registraron el mayor valor del trimestre en la tercera decadiaria de junio (55.9 µg/m³) y un mínimo en la tercera decadiaria de febrero (15.5 µg/m³). En general, los niveles se mantuvieron por debajo del Estándar de Calidad Ambiental para Aire (ECA-aire, 100 µg/m³) durante todo el periodo evaluado. La dispersión de las concentraciones fue mayor en junio en comparación con los otros meses, especialmente en la segunda y tercera decadiaria. Los ciclos horarios mostraron valores mínimos en las primeras horas de la mañana y máximos durante la tarde, comportamiento habitual del O₃ troposférico, reflejando la influencia de la radiación solar. Por otro lado, para abril, mayo y junio, se presentaron días con estado de calidad del aire "Buena".

- En cuanto a la vigilancia satelital de gases reactivos para el distrito de Marcapomacocha, las densidades de columna troposférica de CO presentaron valores promedios decadiarios con una tendencia general a la disminución desde abril hacia junio. Por su parte, el HCHO mostró incrementos hacia la tercera decadiaria de mayo y valores relativamente mayores hacia finales de junio. Respecto al NO₂, se evidenció un incremento hacia el mes de mayo, seguido de una disminución durante las decadiarias de junio. Finalmente, el SO₂ presentó una disminución hacia la segunda decadiaria de mayo, seguida de un incremento hacia el mes de junio.
- En relación a la vigilancia de aerosoles, las mayores concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} se registraron durante el mes de mayo. Respecto al estado de la calidad del aire, durante todo el trimestre se presentaron días con calidad del aire "Buena" tanto para PM_{2.5} y PM₁₀. Asimismo, los valores de concentración estarían presentando una tendencia ligera al incremento hacia fines del trimestre vinculados a la disminución de las precipitaciones y mayor ocurrencia de incendios forestales ocurridos tanto en el interior del país como en Brasil y Bolivia, así como a la resuspensión de polvo generada por el paso de vehículos y la acción de los vientos.
- Por su parte la vigilancia satelital de aerosoles mostró que el UVAI alcanzó su máximo promedio areal para el distrito de Marcapomacocha en la tercera decadiaria de mayo (0.45) y en cuanto a la ubicación del OVA se alcanzó un valor de 0.23 en la segunda decadiaria del mes de junio. Respecto al AOD, se obtuvieron máximos valores en la primera decadiaria de mayo (0.324). En general, se observaron valores más altos a mediados y al final del trimestre, lo cual estaría asociado a la disminución progresiva de las precipitaciones y el incremento de incendios forestales en la amazonía del Perú y países cercanos como Brasil y Bolivia.
- Por otro lado, en cuanto a los gases de efecto invernadero, se evidencia valores más altos de las concentraciones de CO₂ durante la temporada de otoño, lo cual estaría asociado a una menor actividad fotosintética de las plantas y, por ende, de la demanda de CO₂. Por su parte, para el CH₄ se presenta una tendencia a la disminución hacia finales del trimestre, debido a que los suelos se encuentran más secos por una menor ocurrencia de precipitaciones y mayor ingreso de la radiación solar favorecido por cielos despejados, esto no favorece la producción microbiana de este gas.

.....

Para más información sobre el presente boletín, contactar con:

Elvis Anthony Medina Dionicio (eamedina@senamhi.gob.pe)
Subdirector de la Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico

Elaboración

José Hitoshi Inoue Velarde (jinoue@senamhi.gob.pe)
Maria Lourdes Isabel Urteaga Tirado
Hanns Kevin Gómez Muñoz
Brian Daygolo Chávez Lino
Steven Gilber Arce Quispe
Sháneri Sheyla Sánchez Calderón
Dayana Lucero Acuña Valverde

Apoyo

Juan Tacza Ordoñez
Julia Amelia Astudillo Capcha
Rosalinda Cedy Aguirre Almeyda

.....

Suscríbete al **BOLETÍN TRIMESTRAL DE MONITOREO DE LA ATMÓSFERA EN EL OBSERVATORIO DE VIGILANCIA ATMOSFÉRICA MARCAPOMACOCHA** en el siguiente enlace:

https://docs.google.com/forms/d/1ep1Gdkz_s1W7L-xUbrJKjJs4LovFal85AbGaR7sjskA/viewform?chromeless=1&edit_requested=true

Próxima actualización: Octubre del 2025

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

