



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

Julio – Septiembre 2025



PRESENTACIÓN

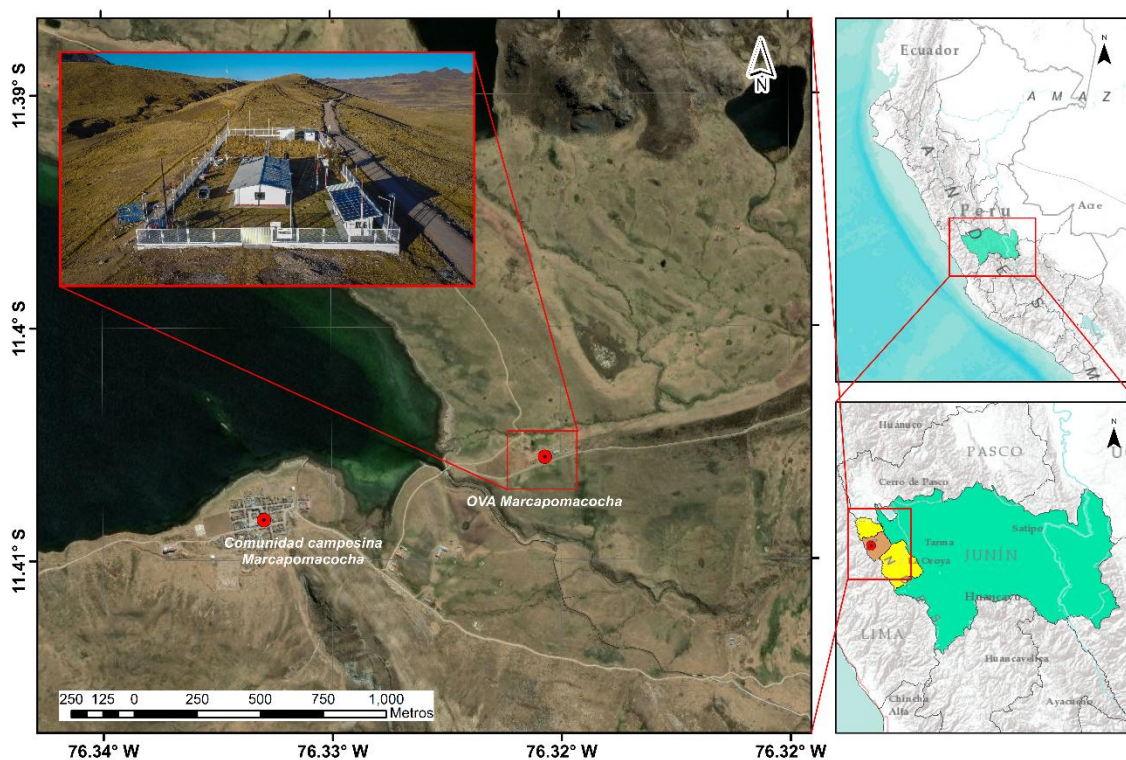
El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) a través de la Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico (SEA) de la Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica (DMA) publica el boletín trimestral de Monitoreo de la Atmósfera en el Observatorio de Vigilancia 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 tercer 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 julio², 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 y Colombia, principalmente. Asimismo, desde los 10°S hacia latitudes mayores prevalecieron vientos del oeste con componente zonal dominante a partir de los 15°S, asociado a una onda con buena curvatura ubicada entre los 25°S a 55°S (Ver Figura N°2a). En niveles medios, predominaron flujos del oeste con componente zonal dominante desde los 20°S hacia latitudes mayores, asociados a una onda que se reflejó desde niveles altos, que presentó una vaguada sobre el centro-sur de Chile y Argentina; por otro lado, hacia el Ecuador prevalecieron flujos de viento del este. También, predominaron patrones de circulación antihoraria, uno configurado sobre el Océano Pacífico (con núcleo no definido), alrededor de los 10°S, y otro sobre el este de Brasil (que se extendió desde el Océano Atlántico). 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°2d).

En agosto³, en niveles altos se observó con mayor frecuencia una dorsal de configuración zonal, que favoreció inestabilidad localizada sobre el norte de Brasil, Venezuela y Colombia. Desde los 10°S hacia latitudes mayores predominaron vientos del oeste con componente zonal predominante a partir de los 15°S, asociados a ondas entre los 25°S y 55°S (Ver Figura N°2b). En niveles medios, prevalecieron flujos del oeste con componente zonal desde los 20°S hacia latitudes mayores, reflejando la circulación de niveles altos, con presencia de ondas sobre el centro-sur de Chile y Argentina; por otro lado, hacia el Ecuador persistieron flujos del este. También se configuraron circulaciones anticiclónicas, una sobre el Pacífico subtropical alrededor de los 10°S, y otra sobre el este de Brasil extendida desde el Atlántico. Estos sistemas favorecieron el ingreso de flujos del este con humedad cercana al 70% hacia Colombia y Venezuela (Ver Figura N°2e).

Durante setiembre⁴, en niveles altos, predominó una circulación zonal sobre gran parte de Sudamérica. En el norte del continente, especialmente sobre Perú, Bolivia, Brasil, Venezuela y Colombia, se mantuvo una dorsal subtropical extendida desde el Pacífico tropical oriental hacia el interior del continente, generando condiciones de estabilidad y débil divergencia en altura, que limitaron la convección sobre la vertiente oriental y el norte del país. En contraste, sobre el sur del Perú se observó flujo divergente en altura en el borde norte del chorro subtropical, lo que favoreció el ascenso del aire y la convección en el sur andino (Ver Figura N°2c). En niveles medios, predominó un flujo del oeste con componente zonal desde los 20°S hacia latitudes mayores, asociado al desplazamiento de ondas de corta longitud y a la presencia de una vaguada sobre el centro y sur de Chile y Argentina, que favoreció el ingreso de humedad e inestabilidad hacia el sur andino y la Amazonía, donde se registraron valores de humedad relativa entre 60% y 70%, coherentes con las anomalías positivas de precipitación observadas. En contraste, sobre el norte de Sudamérica se extendió una dorsal subtropical desde el Pacífico tropical oriental hasta el Atlántico tropical, la cual generó condiciones de estabilidad y subsidencia sobre la vertiente oriental peruana y la costa norte y central, con valores de humedad inferiores al 40%, limitando así la ocurrencia de precipitaciones. Esta configuración explica el contraste pluviométrico observado durante el

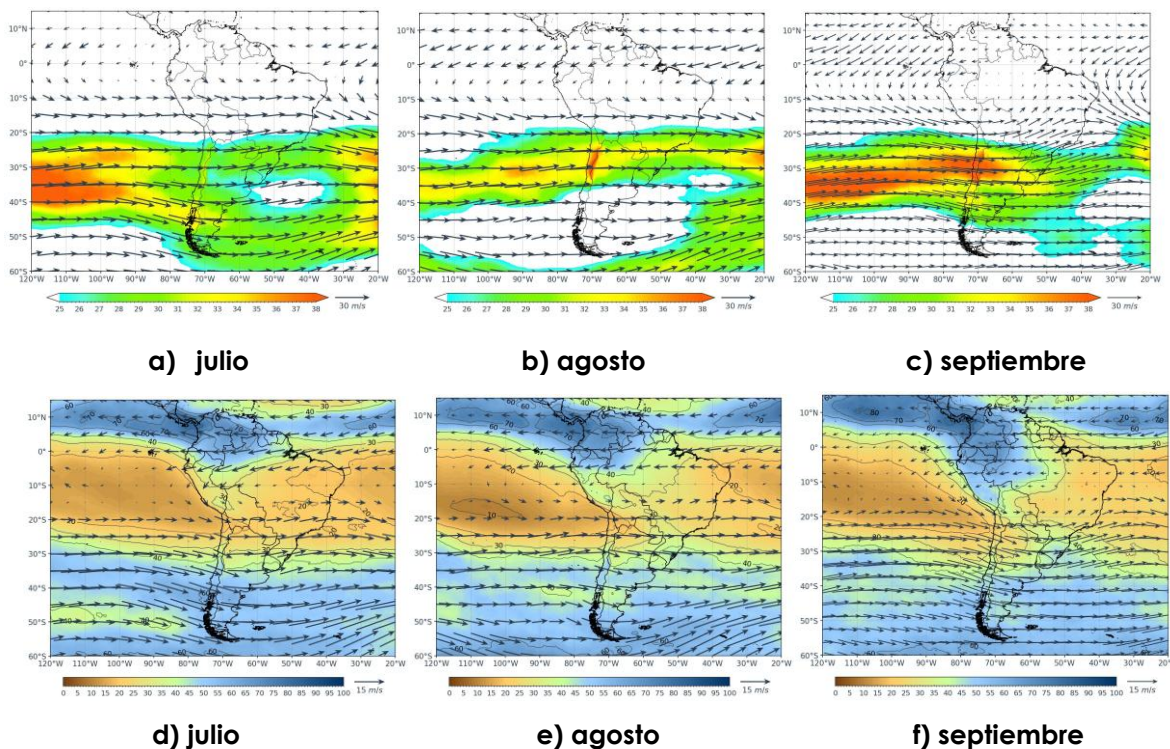
² VIGILANCIA SINÓPTICA DE SUDAMÉRICA, JULIO: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-125.pdf>

³ VIGILANCIA SINÓPTICA DE SUDAMÉRICA, AGOSTO: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-126.pdf>

⁴ VIGILANCIA SINÓPTICA DE SUDAMÉRICA, SETIEMBRE: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-127.pdf>

mes, con condiciones más húmedas e inestables al sur y este del país, y mayor estabilidad atmosférica en el norte y centro (Ver Figura N°2f).

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).



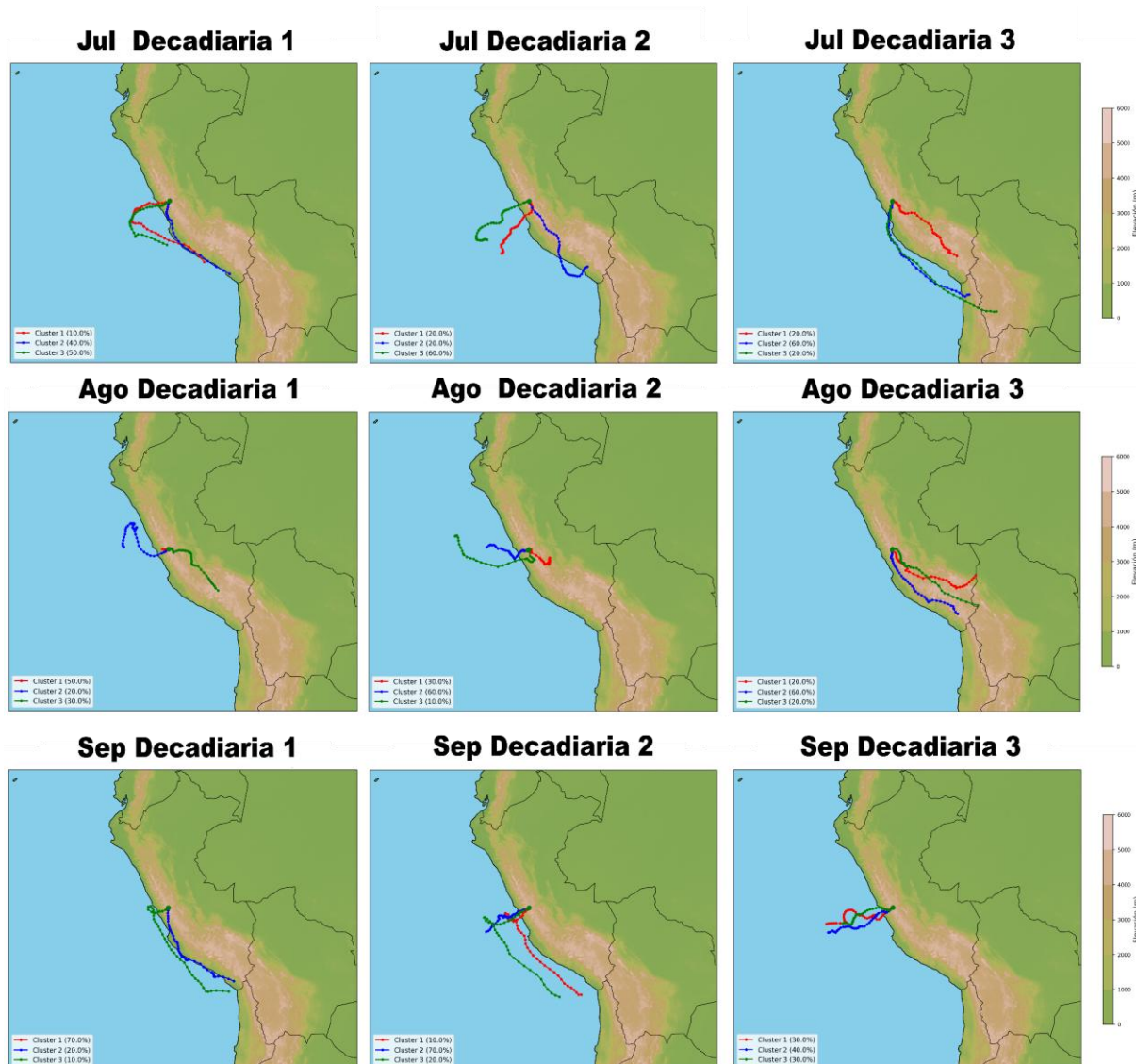
II. ANÁLISIS DE TRAYECTORIAS

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 (HYSPPLIT) y para lo cual se utilizó datos de reanálisis. Dichas retrotrayectorias para 500h Pa 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 julio, se observó que, en las dos primeras decadiarias analizadas, predominan masas de aire provenientes del oeste (O), con origen principalmente marítimo; no obstante, durante la tercera decadiaria el trayecto de dichas masas de aire fue más largo y proveniente desde el sur (S) del Perú y norte de Chile, con gran influencia marítima. En el mes de agosto, se observa que durante la primera decadiaria el mayor flujo proviene del O desde condiciones locales, para la segunda decadiaria este provino desde el O, pero con influencia marítima y para la tercera decadiaria esta fue originaria desde el Sur sureste (SSE) con tendencias netamente continentales. Finalmente, en el mes de septiembre, se presentaron condiciones de flujo de masas de aire del SSE para la primera y segunda

decadaria; en cuanto a la tercera decadaria esta provino netamente del O con influencia netamente marítima.

Figura N° 3 Clúster de retro trayectorias por cada decadaria y mes del tercer 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 tercer trimestre del año 2025.

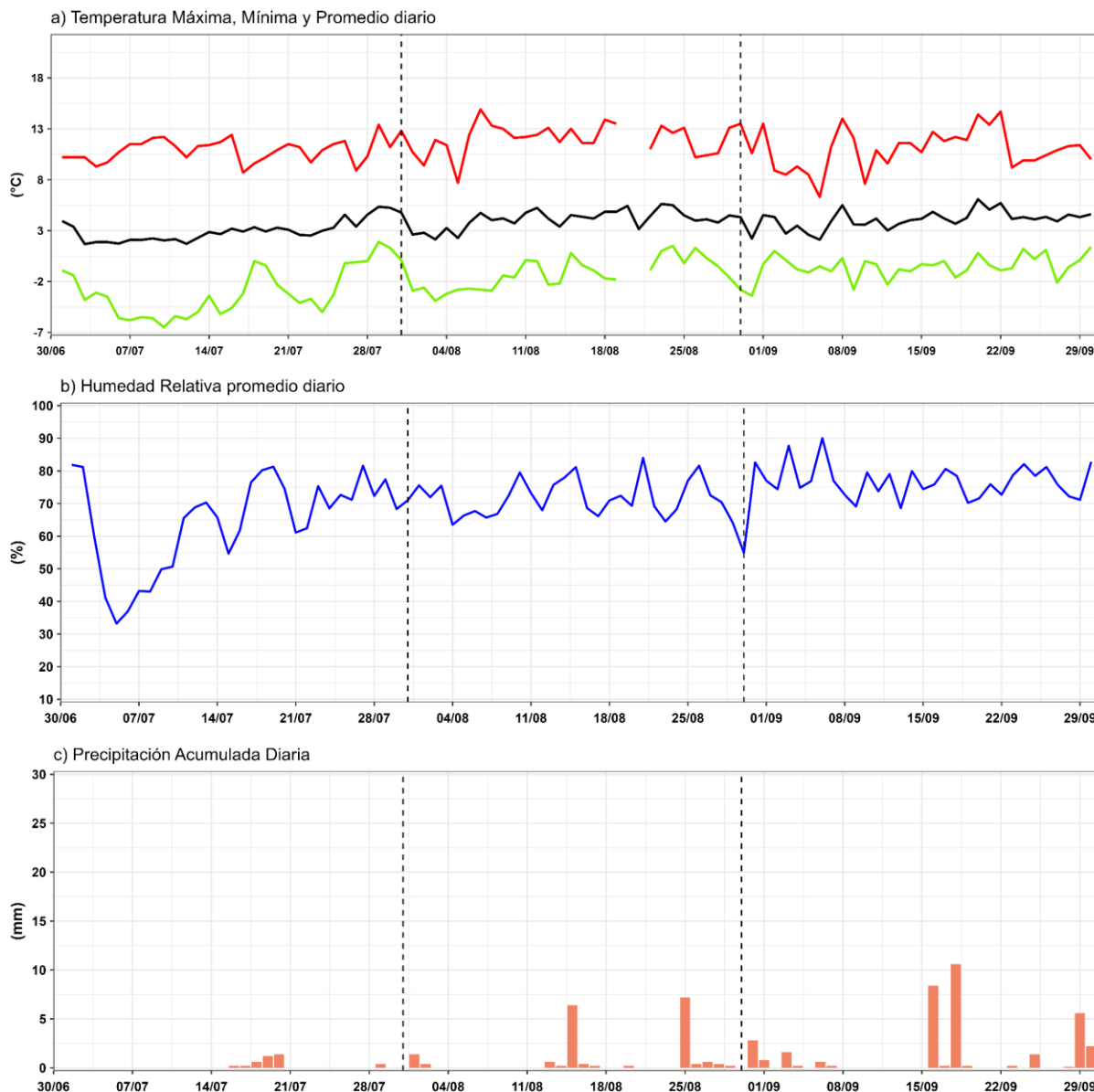
En julio, la temperatura máxima promedio del aire fue de 10.9°C, mientras que la mínima promedio fue de -3.0°C. En agosto, se registró una temperatura máxima promedio de 11.9°C y una mínima promedio de -1.3°C. Para septiembre, la temperatura máxima promedio fue de 10.9°C, mientras que la mínima promedio subió a -0.4°C (Figura N°4a).

En cuanto a la humedad relativa promedio diario, en julio se alcanzó una máxima de 81.8%, una mínima de 33.2% y un promedio mensual de 64.5%. En agosto, se registró una máxima

de 84.0%, una mínima de 54.9% y un promedio mensual de 71.5%. En septiembre, se registró una máxima de 90%, una mínima de 68.5% y un promedio mensual de 76.7% (Figura N°4b).

En relación con la precipitación acumulada diaria, en julio se alcanzó un valor máximo de 1.4 mm y un acumulado mensual de 4 mm. En agosto, se obtuvo un valor máximo de 7.2 mm y un acumulado mensual de 21.4 mm. En septiembre, se obtuvo un valor máximo de 10.6 mm y un acumulado mensual de 32.3 mm.

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



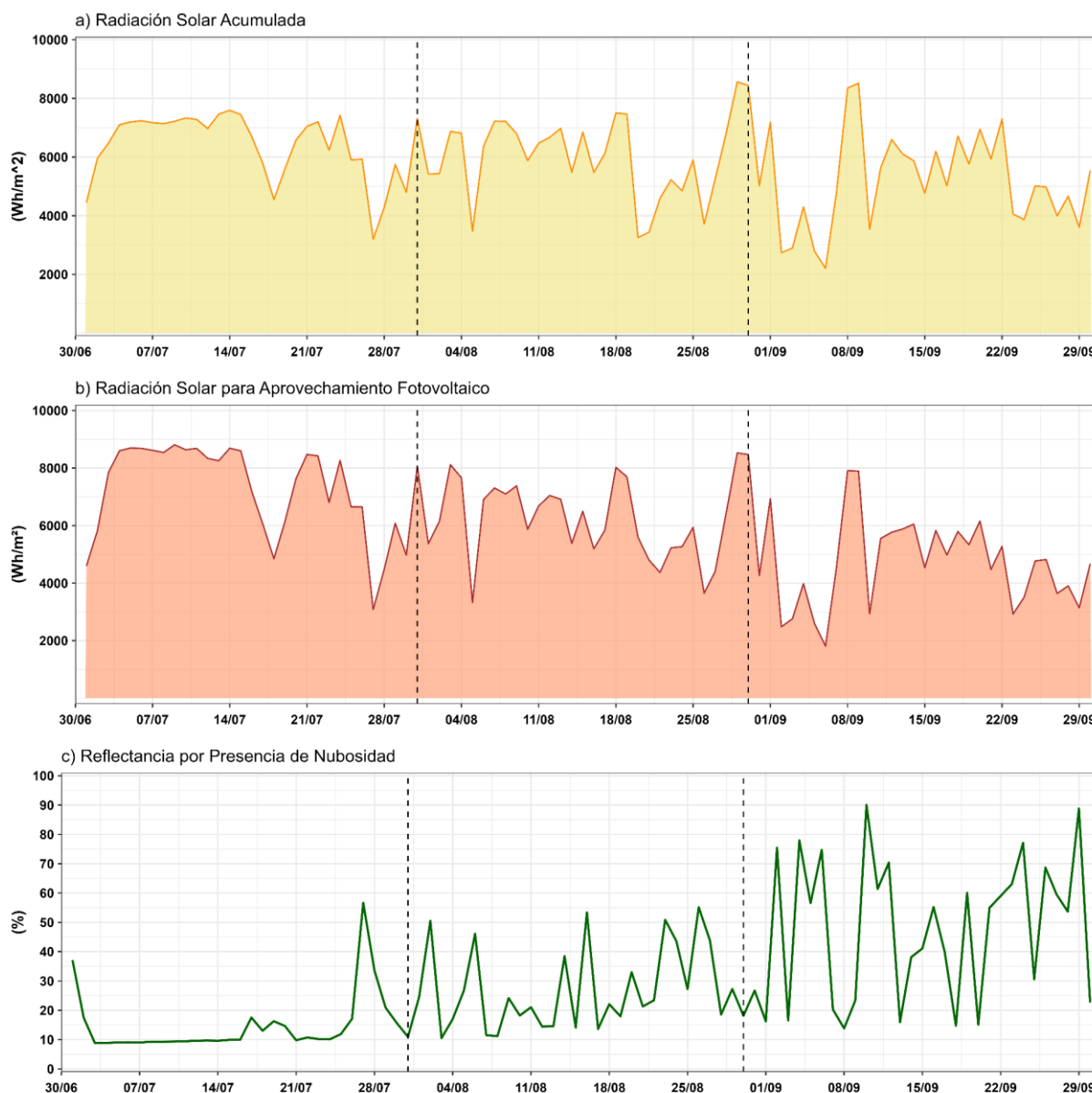
Respecto a la radiación solar global acumulada, en julio se obtuvo una máxima de 7594 W/m² (día 14), mientras que el valor mínimo fue de 3200 W/m² (día 27). Durante agosto, se alcanzó una máxima de 8563 W/m² (día 28), mientras que el valor mínimo fue de 3256 W/m² alcanzado (día 20). En septiembre, se alcanzó una máxima de 8519 W/m² (día 9), mientras que el valor mínimo fue de 2208 W/m² (día 6) (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 8809 W/m² para el 9 de julio. Para

agosto, se registró un valor máximo de 8527 W/m² (día 28) y finalmente, en septiembre se encontró un valor máximo de 7915 W/m² (día 8) (ver Figura N°5b).

Con respecto a la reflectancia por nubosidad, se observó que durante julio se alcanzó un valor máximo de 56%, registrado el día 27, durante el mes de agosto se alcanzó el valor máximo de 51% el día 26, en septiembre se registró el valor más alto alcanzando un 90% el día 10 (ver Figura N°5c).

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

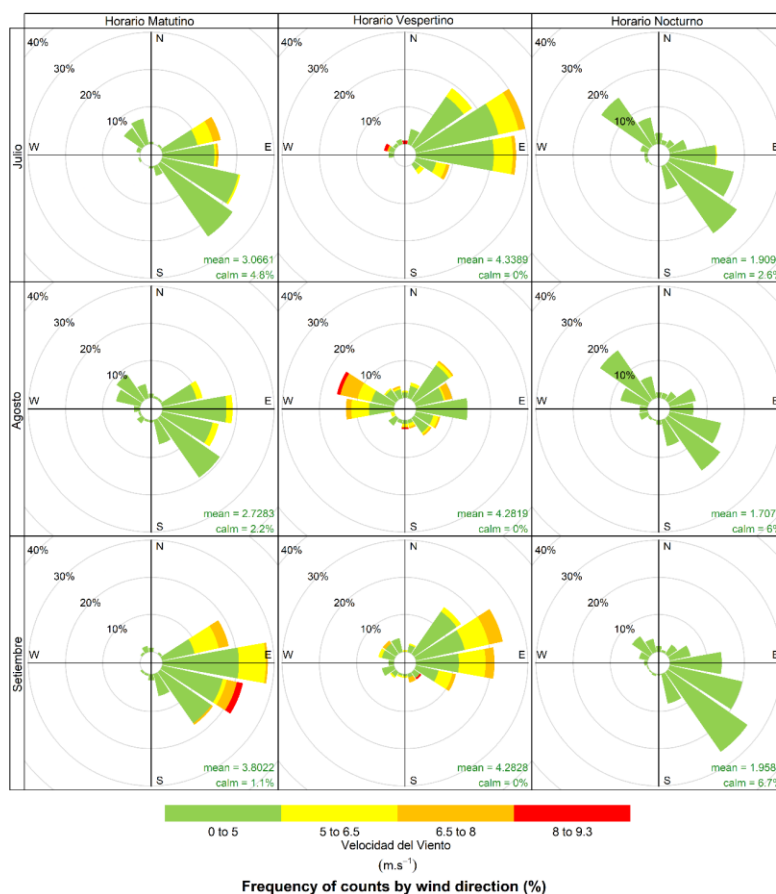


En la Figura N° 6, se observan las rosas de vientos para los horarios matutino (07:00 a 11:59 horas), vespertino (12:00 a 18:59 horas) y nocturno (19:00 a 06:59 horas) de los meses evaluados, en donde las categorías de la intensidad del viento corresponden a: débiles (0 – 5 m/s), moderados (5 – 6.5 m/s),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

Durante el horario matutino, la dirección del viento predominante fue del sureste (E) en julio y agosto, con intensidad débil; mientras que en septiembre se tuvo una dirección predominante del este (E) con intensidad fuerte. Por otra parte, en el horario vespertino, la dirección predominante fue del este noreste (ENE) en los meses de julio y septiembre y con una intensidad de fuerte; mientras que en agosto se tuvo vientos con dirección predominante del oeste noroeste (ONO), con una intensidad de extrema. 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 de estudio vientos con intensidades máximas dentro de la categoría de fuerte y extremo. De igual manera, en el horario matutino en el mes de septiembre.

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



IV. MONITOREO DE FOCOS DE CALOR

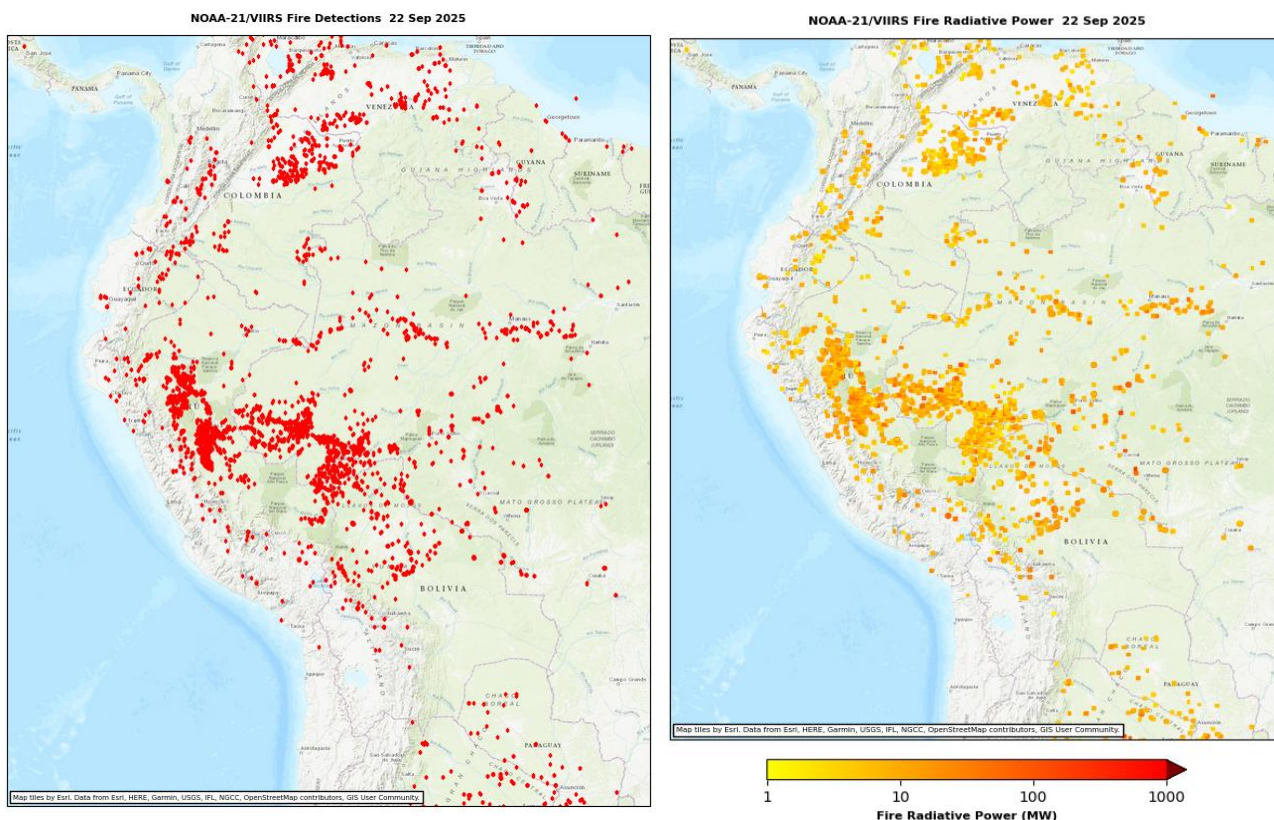
La quema de biomasa (vegetación viva o muerta) que se da durante los incendios en pastizales, bosques y residuos agrícolas constituye una importante fuente de emisiones gaseosas: gases de efecto invernadero (CO₂, CH₄ y N₂O), gases reactivos (CO, NO₂, NO) e hidrocarburos que actúan como precursores de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

capa de ozono como cloruro y bromuro de metilo (CH_3Cl y CH_3Br); así como de material particulado⁵.

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 tercer 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 septiembre del 2025, donde se destaca la presencia de energía térmica en la selva norte y central del Perú y en países vecinos como Brasil, Colombia, Venezuela y Bolivia.

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

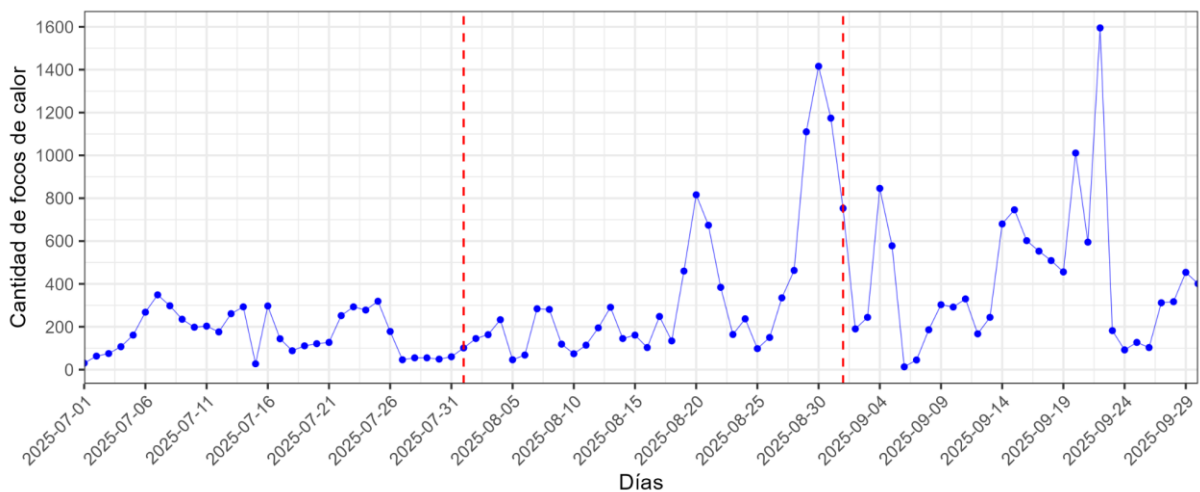


Por otro lado, en la Figura N° 8 se muestra una serie temporal de la cantidad diaria de focos de calor en el Perú durante el tercer trimestre del año, evidenciándose los picos más altos en la tercera decadiaria del mes de agosto y tercera decadiaria del mes de septiembre, alcanzando los 1416 y 1595 focos de calor, respectivamente. En este sentido, de manera general, se observó que la cantidad diaria de focos de calor fue incrementándose hacia el mes de septiembre, con descensos notorios durante algunos días de la primera y tercera decadiaria de septiembre.

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/00463528378a684dfd00000/LA-QUEMA-DE-BIOMASA-EN-SUDAMERICA-VISTA-DESDE-EL-ESPACIO.pdf

⁶ Datos VIIRS : <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#d:24hrs:@0.0,0.0,3.0z>

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



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

V.1 ÁREA FOCAL DE OZONO

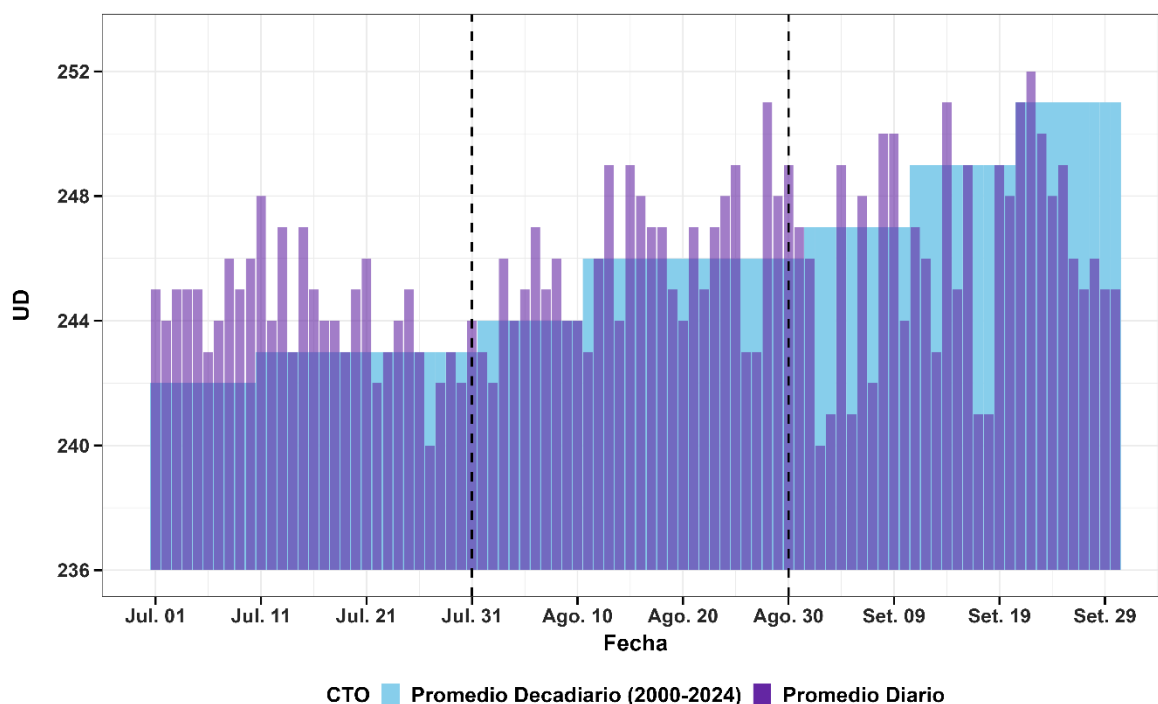
En el OVA Marcapomacocha, se realiza el monitoreo de la Columna Total de Ozono (CTO), a través del Espectrofotómetro Dobson (Ver Figura N°9).

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 tercer trimestre del 2025. De esta manera, en julio se observa que los valores mínimos y máximos de la CTO varían entre 240 UD (día

Figura N° 11 Variación de promedios diarios de la CTO



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

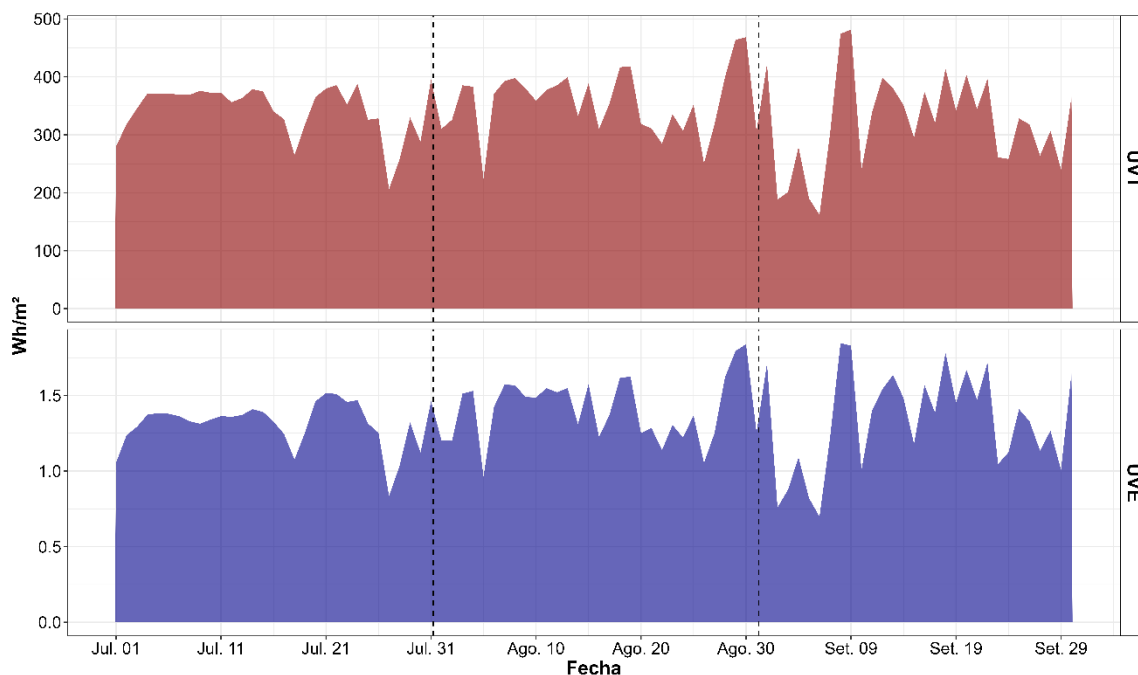
En la Figura N°12, se muestra la variación de los valores diarios acumulados de la radiación ultravioleta eritemática (UVE) y de la radiación ultravioleta total (UVT) para el tercer trimestre de 2025. Durante el mes de julio, se observaron valores acumulados entre 0.83 y 1.52 Wh/m² para el UVE y entre 206.3 y 395.4 Wh/m² para el UVT. Con respecto a agosto, el UVE se encontró entre 0.96 y 1.84 Wh/m² y el UVT entre 224.5 y 468.4 Wh/m². Por su parte, septiembre presentó oscilaciones del UVE entre 0.7 y 1.85 Wh/m²; y del UVT entre 161.9 y 481.7 Wh/m². En general, el mayor valor de la UVE y la UVT se encontraron en la primera decadal de septiembre (día 8 para UVE y día 9

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/portaledesep/files/tematica/pronostico/indiceuv/indiceuv.pdf>

para UVT); de igual manera, los menores valores de ambas variables se encontraron en la primera decadiaria de septiembre (día 6).

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



Asimismo, en promedio, la UVE representó el 0.4% 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

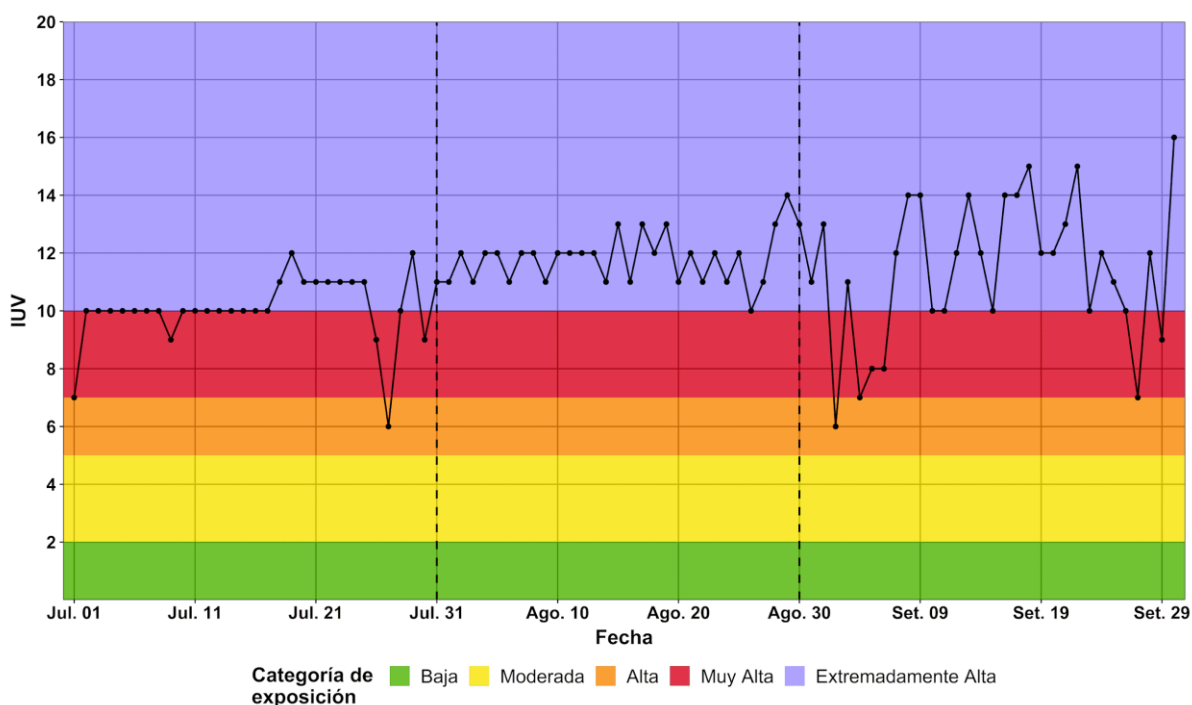
El Índice Ultravioleta (IUV) es una magnitud adimensional que se expresa como un valor entero superior a cero; cuanto más alto es el valor, mayor es la probabilidad de sufrir lesiones cutáneas y oculares, y menos tiempo se necesita para que estas se produzcan.¹² De esta manera, al igual que la radiación ultravioleta eritemática, el índice UV pondera la radiación UV según su capacidad para causar daño a la piel, utilizando la curva de acción eritemática.¹³

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 julio, estos valores oscilaron entre 6 y 12; para agosto, entre 10 y 14; y para septiembre, entre 6 y 16. En general, los valores del IUV tienen una tendencia al incremento, ello debido al cese del invierno en el hemisferio sur.

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>

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



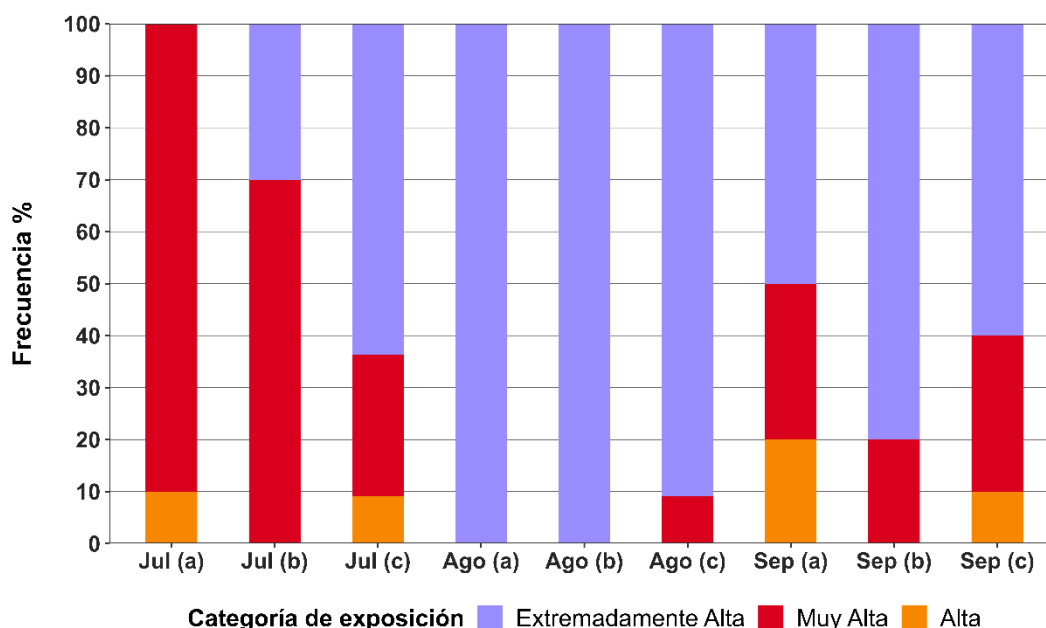
La Figura N° 14 presenta las frecuencias de las categorías de exposición de la OMS alcanzadas de acuerdo con los valores del IUV (máximos diarios) en el OVA Marcapomacocha durante la decadiaria primera (a), segunda (b) y tercera (c) de los meses de julio, agosto y septiembre. Durante el tercer trimestre se evidencia una predominancia en la ocurrencia de la categoría de exposición Extremadamente Alta (por lo menos un 50%). En ese sentido, para la primera y segunda decadiaria de agosto se evidencia que todos los días presentaron una categoría de exposición Extremadamente Alta. 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}.

¹⁴ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DE LA VIGILANCIA DE RADIACIÓN UV-B EN CIUDADES DEL PAIS, JULIO, 2025 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03202SENA-116.pdf>)

¹⁵ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DE LA VIGILANCIA DE RADIACIÓN UV-B EN CIUDADES DEL PAIS, AGOSTO, 2025 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03202SENA-117.pdf>)

¹⁶ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DE LA VIGILANCIA DE RADIACIÓN UV-B EN CIUDADES DEL PAIS, SEPTIEMBRE, 2025 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03202SENA-118.pdf>)

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 septiembre (día 5) y la segunda decadiaria de septiembre (día 18).

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 tercera decadiaria de julio (día 27), primera decadiaria de agosto (día 3) y la tercera decadiaria de septiembre (día 30).

V.3 ÁREA FOCAL DE GASES REACTIVOS

Durante el cuarto trimestre del año, se ha realizado la vigilancia ambiental atmosférica del Ozono Troposférico (O₃) mediante el equipo monitor de marca 2B Technologies modelo 205 (ver Figura N°15) del OVA Marcapomacocha.

Figura N° 15 Monitor de O₃ 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 (NO₂) y Dióxido de Azufre (SO₂). El análisis decadiario de los mencionados gases se desarrolla a continuación:

A. OZONO TROPOSFÉRICO (O₃)

El ozono troposférico no se emite directamente a la atmósfera, sino que se forma a partir de reacciones químicas entre óxidos de nitrógeno (NOX) 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 O₃ 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 O₃ requiere cierta distancia desde las fuentes de emisión. Asimismo, en áreas urbanas con altos niveles de NO, el O₃ se destruye rápidamente al oxidar NO a NO₂, 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 O₃ generado o transportado desde áreas urbanas e industriales.¹⁸

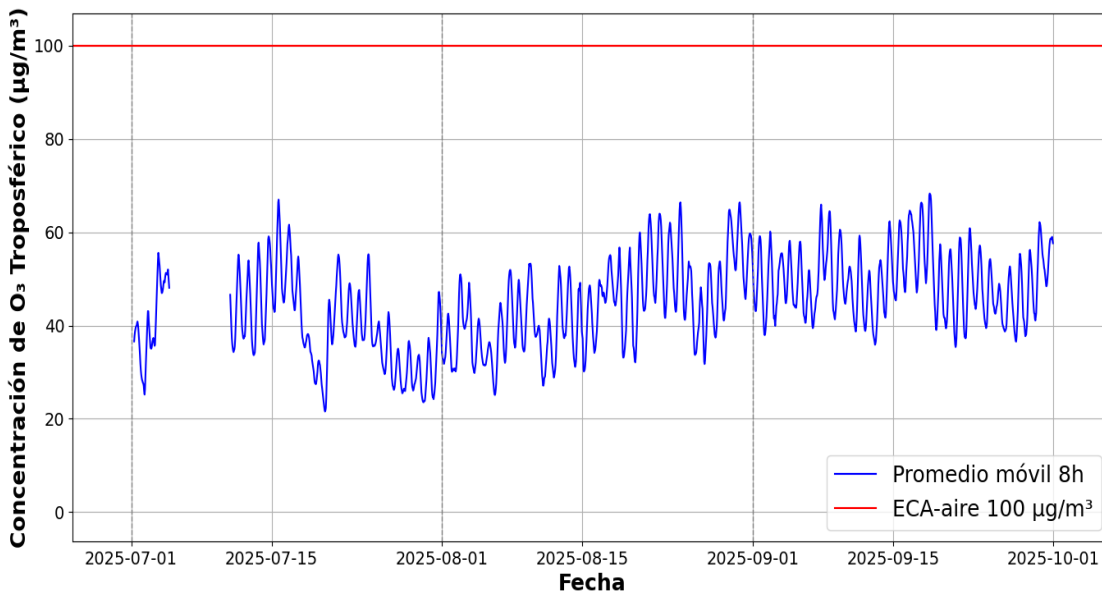
La Figura N° 16 presenta la evolución temporal de O₃ troposférico, expresada en microgramos por metro cúbico (µg/m³), durante el tercer trimestre de 2025. Los valores corresponden a promedios móviles de 8 horas, empleado para su comparación con el Estándar de Calidad Ambiental para Aire (ECA-aire), establecido en 100 µg/m³.

En julio, las concentraciones de O₃ registraron un valor mínimo de 21.6 µg/m³ (día 20) y un valor máximo de 67.0 µg/m³ (día 15), con un promedio mensual de 39.8 µg/m³ y un percentil 90 de 53.1 µg/m³. En agosto, el valor mínimo fue de 25.1 µg/m³ (día 6) y el máximo de 66.4 µg/m³ (día 24), alcanzando un promedio mensual de 44.1 µg/m³ y un percentil 90 de 57.2 µg/m³. En septiembre, las concentraciones presentaron un valor mínimo de 35.4 µg/m³ (día 21) y un valor máximo de 68.3 µg/m³ (día 18), con un promedio mensual de 49.6 µg/m³ y un percentil 90 de 59.4 µg/m³. Asimismo, durante el periodo evaluado no se registraron excedencias al ECA-aire.

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>

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

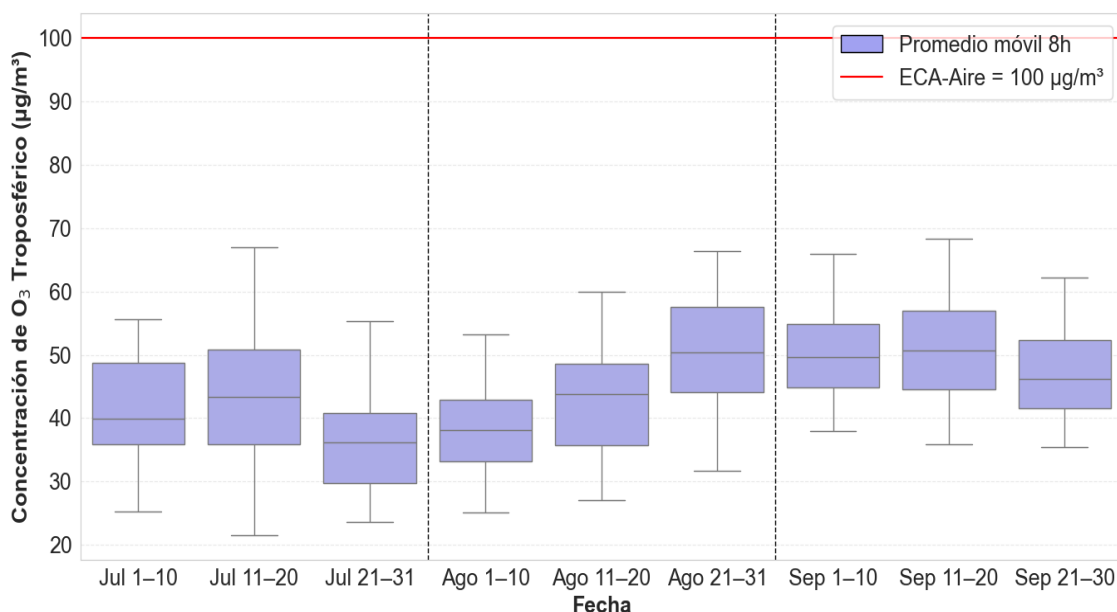


Asimismo, se realizó el análisis decadiario de la variabilidad de los promedios móviles de 8 horas del O₃ troposférico (Figura N°17). Al respecto, la primera decadiaria de julio presentó una mediana de 39.9 µg/m³, con un rango intercuartílico (IQR) de 12.9 µg/m³ y valores entre 25.2 y 55.6 µg/m³. La segunda decadiaria registró la mediana más alta del mes (43.4 µg/m³) y la mayor variabilidad (IQR de 14.9 µg/m³), con concentraciones entre 21.6 y 67.0 µg/m³. Por su parte, la tercera decadiaria mostró una disminución en la mediana (36.2 µg/m³) y un IQR de 11.1 µg/m³, con valores comprendidos entre 23.6 y 55.3 µg/m³.

Durante agosto, la primera decadiaria registró una mediana de 38.1 µg/m³ y un IQR de 9.7 µg/m³, con valores entre 25.1 y 53.3 µg/m³. La segunda decadiaria presentó una mediana de 43.8 µg/m³ y un IQR de 12.8 µg/m³, con concentraciones entre 27.1 y 59.9 µg/m³. En la tercera decadiaria se observó un incremento en las concentraciones, registrándose la mediana más alta del mes (50.4µg/m³) y un IQR de 13.3 µg/m³, con valores entre 31.8 y 66.4 µg/m³.

En septiembre, la primera decadiaria registró una mediana de 49.6 µg/m³ y un IQR de 10.1 µg/m³, con valores entre 37.9 y 65.9 µg/m³. La segunda decadiaria presentó la mediana más alta del mes (50.7 µg/m³) y un IQR de 12.4 µg/m³, con concentraciones entre 35.9 y 68.3 µg/m³. Finalmente, la tercera decadiaria mostró una ligera disminución en la mediana (46.2 µg/m³) y un IQR de 10.7 µg/m³, con valores comprendidos entre 35.4 y 62.1 µg/m³.

En general, las concentraciones de O₃ mostraron una tendencia al incremento desde julio hacia septiembre, registrándose las medianas más altas durante agosto y septiembre, particularmente en la tercera decadiaria de agosto y la segunda decadiaria de septiembre.

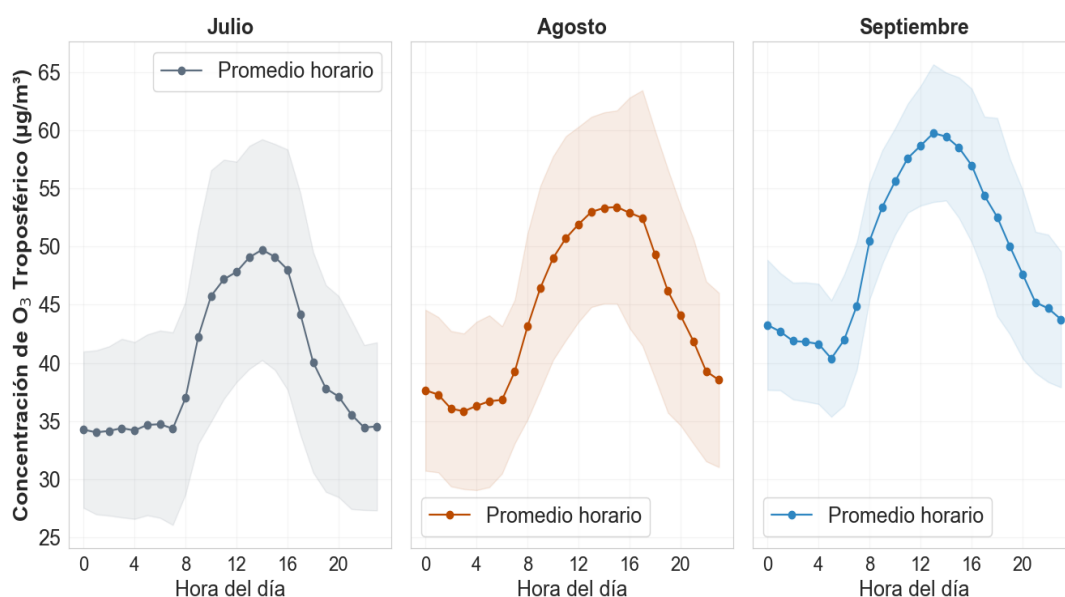
Figura N° 17 Variabilidad de las concentraciones de O₃ troposférico por decadiaria


Respecto al ciclo horario de las concentraciones de O₃ troposférico (ver Figura N°18), en julio se registró un promedio horario mínimo de 34.03 µg/m³ a las 1:00 h y un promedio horario máximo de 49.73 µg/m³ a las 14:00 h. En cuanto a la variabilidad horaria, la desviación estándar mínima fue de 6.72 µg/m³ a las 0:00 h, mientras que la máxima alcanzó 10.82 µg/m³ a las 10:00 h. El promedio mensual para este mes fue de 39.81 µg/m³ con una desviación estándar de 10.45 µg/m³.

Durante agosto, el promedio horario mínimo fue de 35.83 µg/m³ a las 3:00 h y el promedio horario máximo de 53.41 µg/m³ a las 15:00 h. La desviación estándar mínima por hora se registró a las 7:00 h con un valor de 6.18 µg/m³, mientras que la máxima ocurrió a las 17:00 h con 10.98 µg/m³. El promedio mensual para este mes fue de 44.22 µg/m³ con una desviación estándar de 10.51 µg/m³, ligeramente superior a la observada en julio, lo que indica una mayor variabilidad de las concentraciones durante agosto.

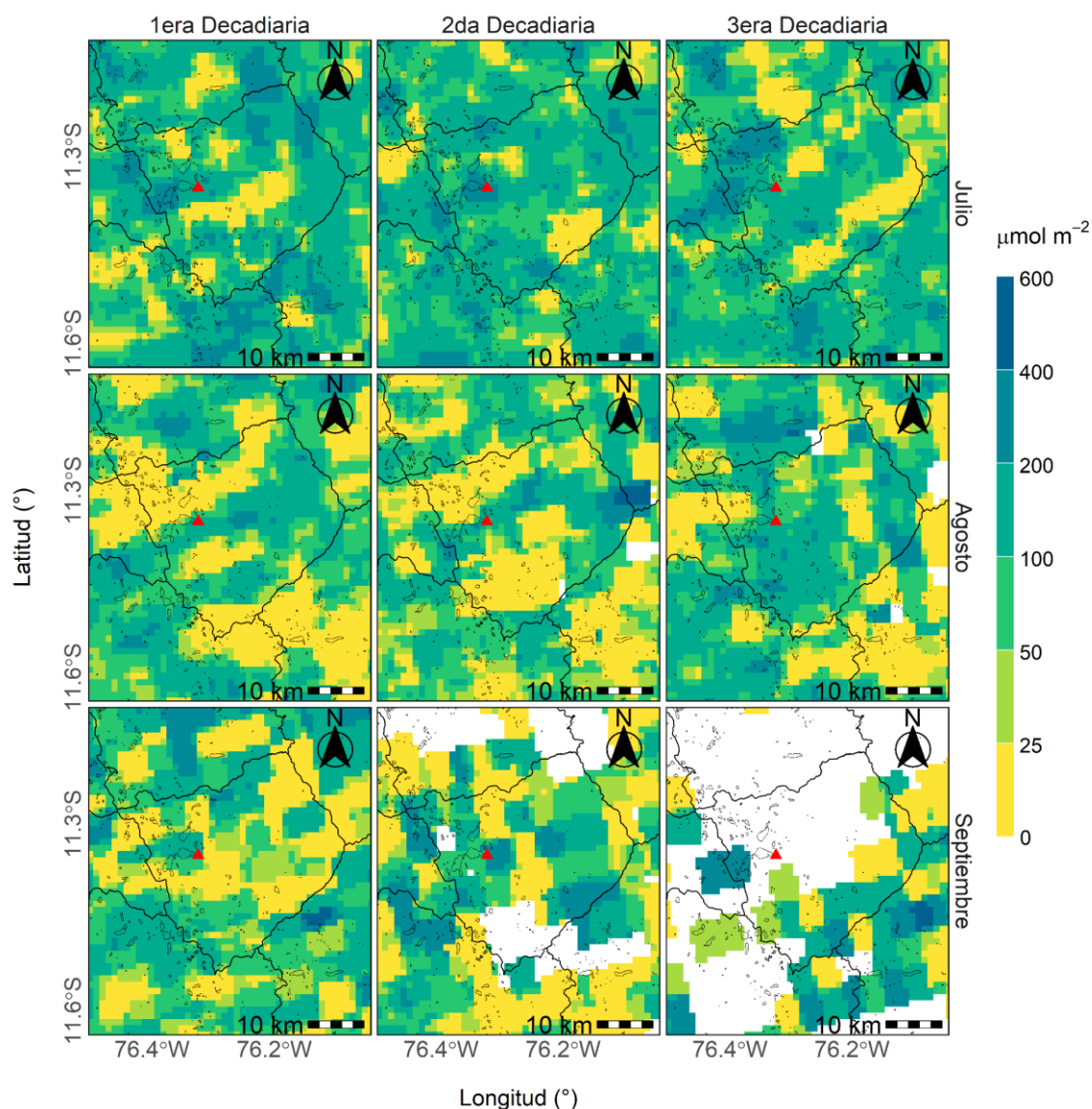
En septiembre, el promedio horario mínimo fue de 40.37 µg/m³ a las 5:00 h y el promedio horario máximo de 59.76 µg/m³ a las 13:00 h. La desviación estándar mínima por hora se registró a las 10:00 h con un valor de 4.58 µg/m³, mientras que la máxima ocurrió a las 18:00 h con 8.52 µg/m³. El promedio mensual para este mes fue de 49.46 µg/m³ con una desviación estándar mensual fue de 8.86 µg/m³, inferior a la observada en julio y agosto, lo que indica una menor variabilidad de las concentraciones durante septiembre.

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



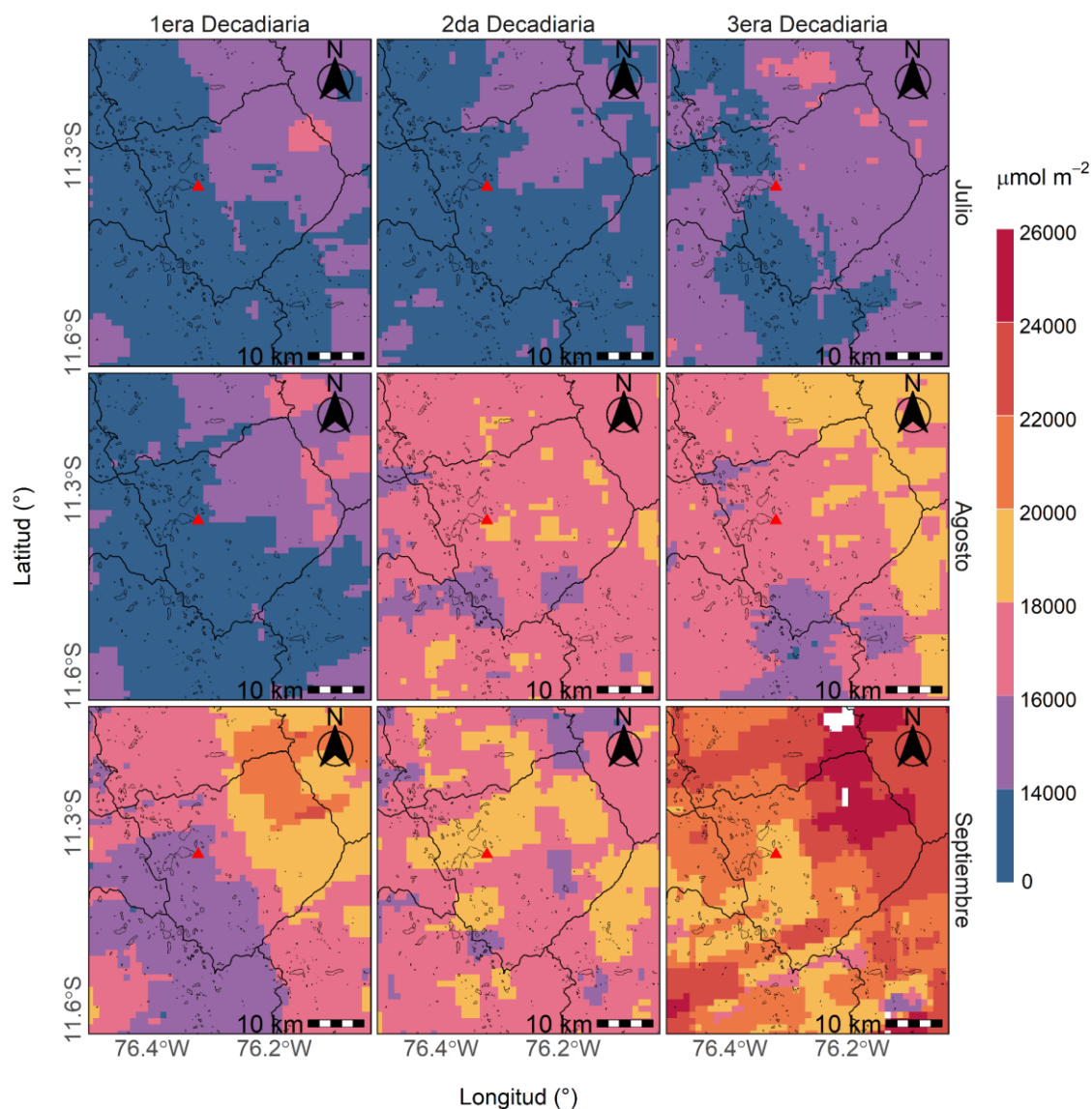
B. FORMALDEHIDO (HCHO)

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 segunda decadiaria de agosto con 424.20 µmol/m²; mientras que, los promedios areales se ubicaron entre 71.30 µmol/m² en la primera decadiaria de septiembre y 129.61 µmol/m² en la tercera decadiaria del mismo mes. La desviación estándar alcanzó un máximo de 84.80 µmol/m² en la tercera decadiaria de septiembre y presentó un mínimo con 48.19 µmol/m² para la primera decadiaria del mismo mes. Asimismo, para la ubicación del OVA Marcapomacocha se alcanzó un valor máximo de 273.73 µmol/m² en la segunda decadiaria de julio y un mínimo de 73.62 µmol/m² en la tercera decadiaria de agosto.

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


C. MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

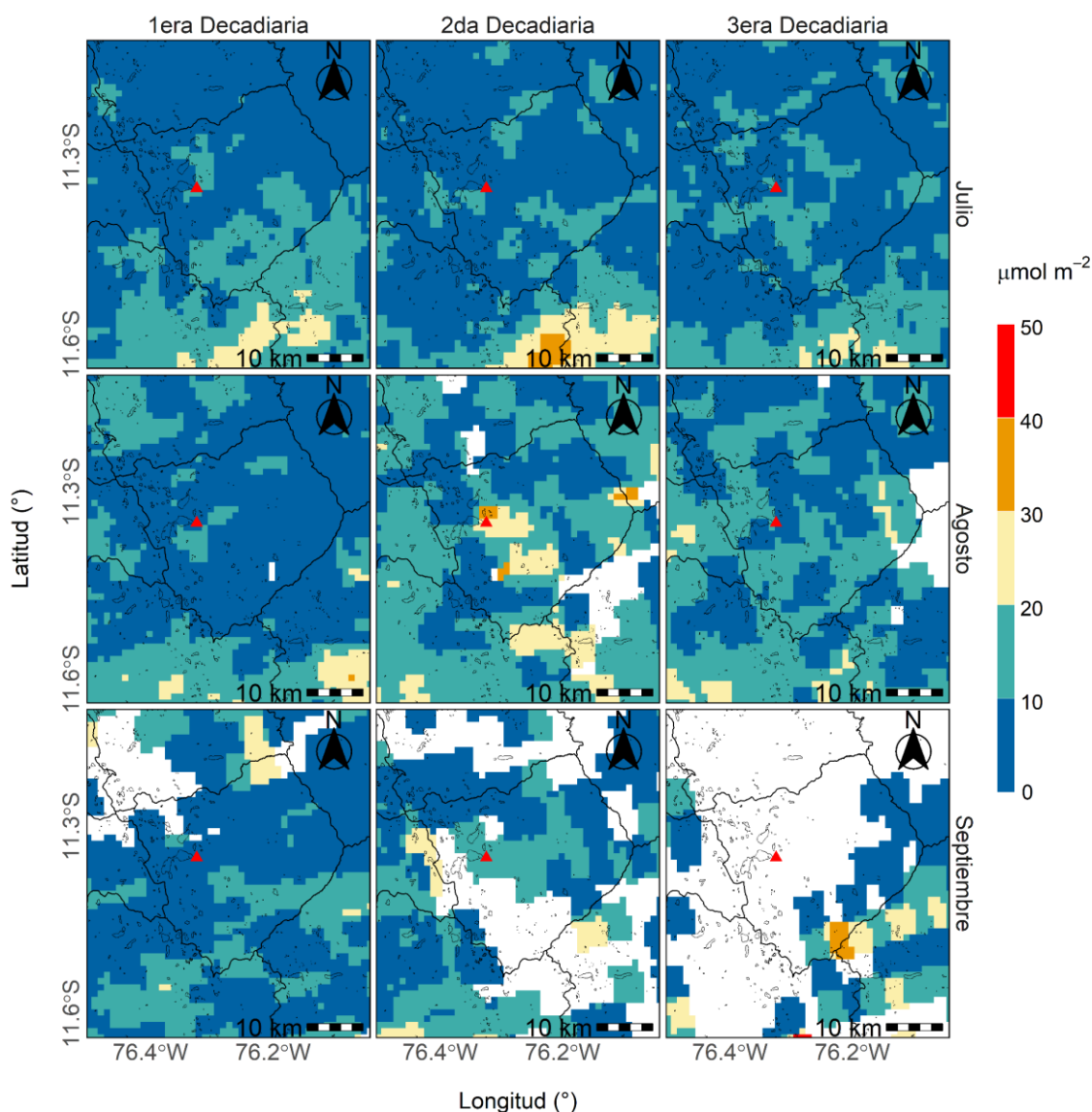
En relación a la variación espacial de la densidad de CO en la columna troposférica para el distrito de Marcapomacocha (ver Figura N°20), el valor máximo distrital se registró en la tercera decadiaria de septiembre con $26\ 355.55 \mu\text{mol/m}^2$, mientras que los promedios areales se ubicaron entre $13\ 644.38 \mu\text{mol/m}^2$ en la segunda decadiaria de julio y $21\ 760.32 \mu\text{mol/m}^2$ en la tercera decadiaria de septiembre. La desviación estándar alcanzó un máximo de $1946.32 \mu\text{mol/m}^2$ en la tercera decadiaria de septiembre y presentó un mínimo de $609.69 \mu\text{mol/m}^2$ para la segunda decadiaria de julio. Asimismo, en el OVA Marcapomacocha se alcanzó un valor máximo de $19626.68 \mu\text{mol/m}^2$ en la segunda decadiaria de septiembre y un mínimo de $12809.90 \mu\text{mol/m}^2$ en la primera decadiaria de julio. En general, se evidencia una tendencia al aumento de la densidad de columna de CO conforme avanza el trimestre.

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 de para el distrito de Marcapomacocha (ver Figura N°21), el valor máximo distrital se registró en la tercera decadiaria de septiembre con 37.25 $\mu\text{mol/m}^2$, mientras que los promedios areales se ubicaron entre 6.24 $\mu\text{mol/m}^2$ en la primera decadiaria de agosto y 11.39 $\mu\text{mol/m}^2$ en la segunda decadiaria del mismo mes. La desviación estándar alcanzó un máximo de 8.41 $\mu\text{mol/m}^2$ en la tercera decadiaria de septiembre y presentó un mínimo de 2.97 $\mu\text{mol/m}^2$ para la segunda decadiaria de julio. Asimismo, para la ubicación del OVA Marcapomacocha, los valores máximos se observaron en la segunda decadiaria de agosto con 29.41 $\mu\text{mol/m}^2$, mientras que el mínimo corresponde a la segunda decadiaria de julio con 4.64 $\mu\text{mol/m}^2$.

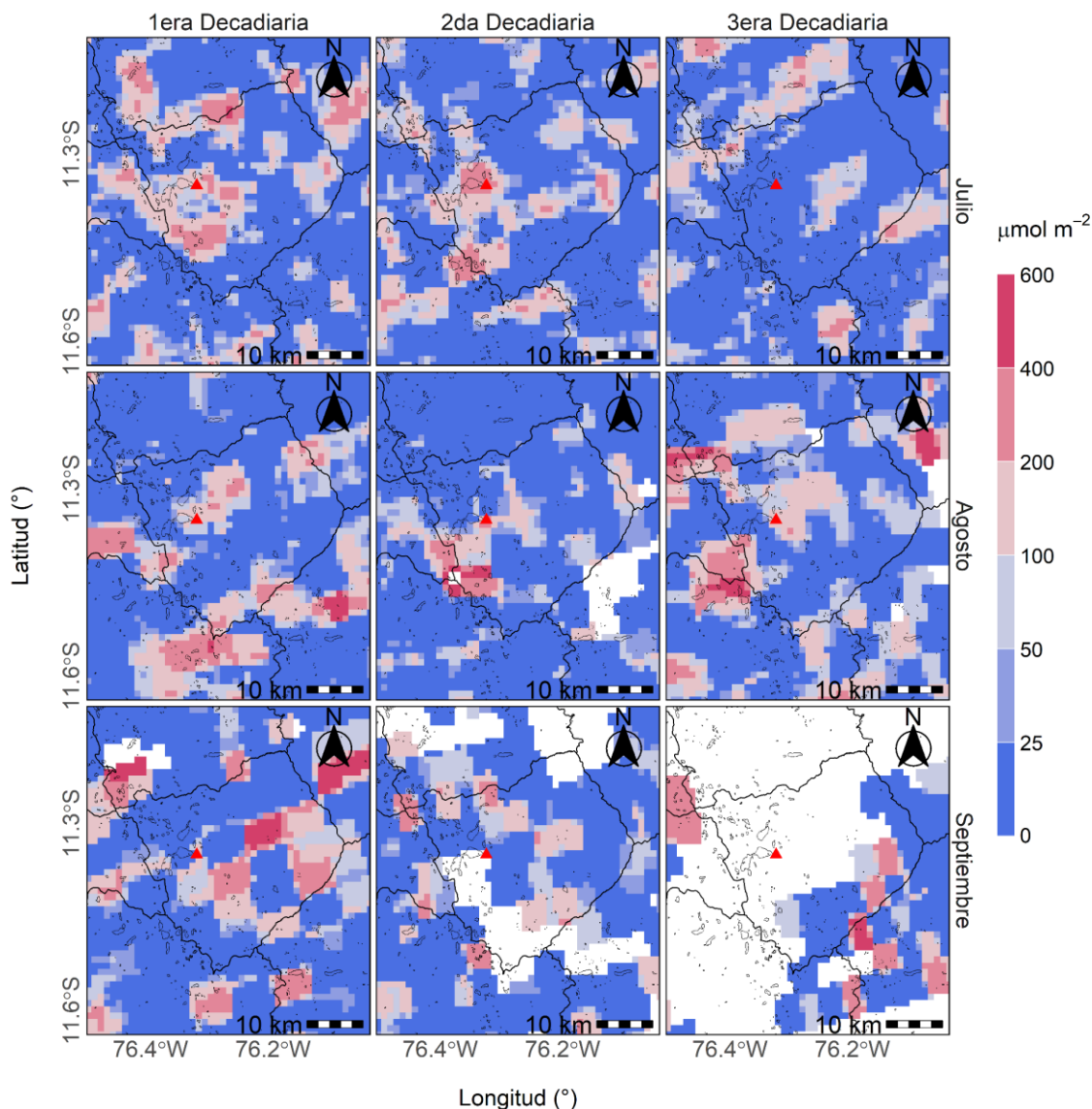
Figura N° 21 Variación espacial del NO₂ por decadiaria del trimestre



E. DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)

En relación a la variación espacial de la densidad de SO₂ en la columna troposférica para el distrito de Marcapomacocha (ver Figura N°22), el valor máximo distrital se registró en la segunda decadiaria de agosto con 526.75 μmol/m², mientras que los promedios areales se ubicaron entre 60.42 μmol/m² en la tercera decadiaria de julio y 151.72 μmol/m² en la tercera decadiaria de septiembre. La desviación estándar alcanzó un máximo de 116.63 μmol/m² en la tercera decadiaria de septiembre y presentó un mínimo de 46.14 μmol/m² para la tercera decadiaria de julio. Asimismo, para la ubicación del OVA Marcapomacocha se alcanzó un valor máximo de 277.57 μmol/m² en la segunda decadiaria de agosto y un mínimo de 113.24 μmol/m² en la primera decadiaria del mismo mes. En general, se evidencia una disminución de la densidad de columna de SO₂ hacia la tercera decadiaria de julio seguida de un aumento hacia la primera decadiaria de septiembre.

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 julio se presentó 26 días con una calidad del aire “Buena”. Para el mes de agosto, se presentó 31 días con una calidad del aire “Buena”. Finalmente, en el mes de septiembre se presentó 28 días con una calidad del aire “Buena” y 1 día con una calidad del aire “Moderada”.

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 tercer trimestre del año 2025, se ha realizado la vigilancia ambiental atmosférica de la deposición atmosférica húmeda, a través de un muestreador semiautomático (ver Figura N°24) y posterior análisis de las muestras en laboratorio considerando lo estipulado en el Manual Técnico: MT-DMA-001²⁰.

Figura N° 24 Muestreador de deposición atmosférica



²⁰ MONITOREO DE LA DEPOSICIÓN HÚMEDA Manual Técnico: MT-DMA-001 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/00711SENA-93.pdf>)

Las variables más importantes para el monitoreo de la calidad de agua de lluvia son el Potencial de Hidrógeno (pH) y la conductividad eléctrica. Para su determinación, se utilizan equipos especializados y que permiten realizar un monitoreo de frecuencia semanal siguiendo lineamientos técnicos establecidos por la OMM con fines de garantizar la representatividad y calidad de los datos obtenidos.

Para la determinación de la calidad del agua de lluvia, se emplean umbrales establecidos internacionalmente. Se considera lluvia ácida cuando la muestra posee un pH menor a 4.4²¹, mientras que, para la conductividad eléctrica, valores superiores a 20 µS/cm ²² indican también la presencia de lluvia ácida.

En el Cuadro N°1 y en la Figura N°25a, se observan los valores de pH de la deposición atmosférica húmeda recolectados por el muestreador, donde los valores mínimo y máximo fueron 7.2 y 8.9, respectivamente. Se puede observar que todos los valores de pH registrados se encontraron por encima del umbral de lluvia ácida (4.4).

Respecto a la conductividad eléctrica de la deposición atmosférica húmeda, en el Cuadro N°1 y la Figura N°25b, se muestran los registros, donde los valores mínimo y máximo fueron 5.9 y 19.7, respectivamente. Asimismo, se observa que no se registraron valores por encima del umbral de lluvia ácida (20 µS/cm).

Cuadro N°1 Resultados de pH y conductividad eléctrica de las muestras de deposición atmosférica húmeda

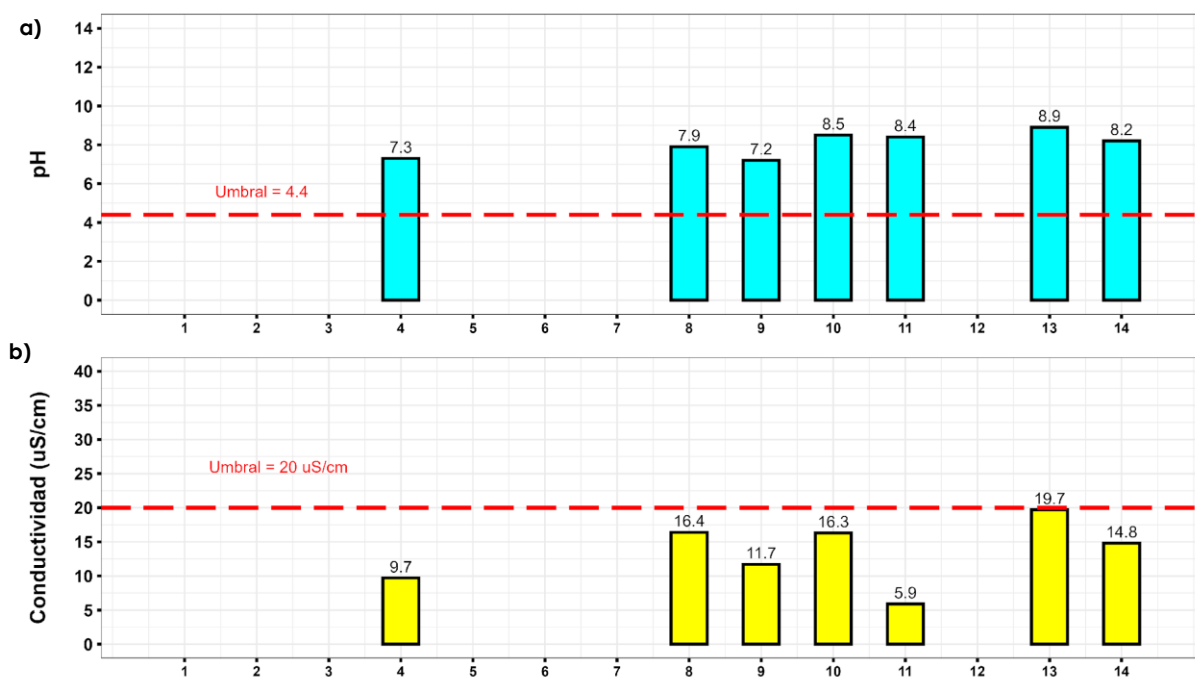
Número de muestra	Periodo de muestreo		Variables	
	Inicio	Fin	Potencial de Hidrógeno (pH)	Conductividad eléctrica (µS/cm)
1	24/06/2024	01/07/2025	*	*
2	01/07/2025	08/07/2025	*	*
3	08/07/2025	15/07/2025	*	*
4	15/07/2025	22/07/2025	7.3	9.7
5	22/07/2025	29/07/2025	*	*
6	29/07/2025	05/08/2025	*	*
7	05/08/2025	12/08/2025	*	*
8	12/08/2025	19/08/2025	7.9	16.4
9	19/08/2025	26/08/2025	7.2	11.7
10	26/08/2025	02/09/2025	8.5	16.3
11	02/09/2025	09/09/2025	8.4	5.9
12	09/09/2025	16/09/2025	*	*
13	16/09/2025	23/09/2025	8.9	19.7
14	23/09/2025	30/09/2025	8.2	14.8
Valor mínimo			7.2	5.9
Valor máximo			8.9	19.7
Valor promedio			8.1	13.5

(*) Cantidad de muestra insuficiente para análisis de laboratorio

²¹ Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (<https://www.epa.gov/acidrain/what-acid-rain>)

²² Antolínez, A. y Díaz, C. (2003) Lluvia Ácida en la zona norte de Bogotá.

Figura N° 25 Registros de pH y conductividad eléctrica de la deposición atmosférica húmeda



V.5 ÁREA FOCAL DE AEROSOLES

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

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



a. Monitor de partícula: Beta

b. Perfilador METONE Modelo 412

c. Perfilador METONE Modelo 212

d. Sensor de bajo costo PurpleAir

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).

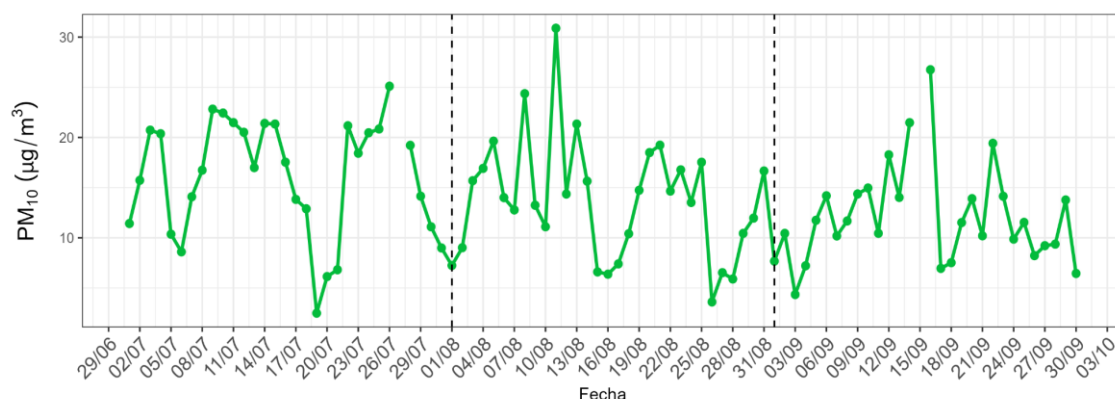
A. CONCENTRACIONES EN MASA

Con los datos de monitor de partículas Beta, el equipo METONE - 412 y el monitor Purple Air 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 PARA EL PM₁₀

La Figura N° 27 muestra la evolución temporal de las concentraciones promedio diarias de PM₁₀ registradas en el OVA Marcapomacocha durante el tercer trimestre, a partir de mediciones provenientes del perfilador de partículas METONE – 412. En particular, se destaca el incremento registrado entre los días 22 y 26, donde se alcanzó un valor promedio diario de 25.1 µg/m³ (el 26 de julio). El incremento de las concentraciones observado durante estos meses estaría asociado a la reducción en la ocurrencia de precipitaciones lo cual favorecería la resuspensión de polvo por acción del viento. Asimismo, durante todo el período de análisis no se registraron concentraciones diarias superiores al ECA - Aire²³ de 100 µg/m³. En general, el mes de julio presentó el valor promedio más alto, con 16.1 µg/m³.

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



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

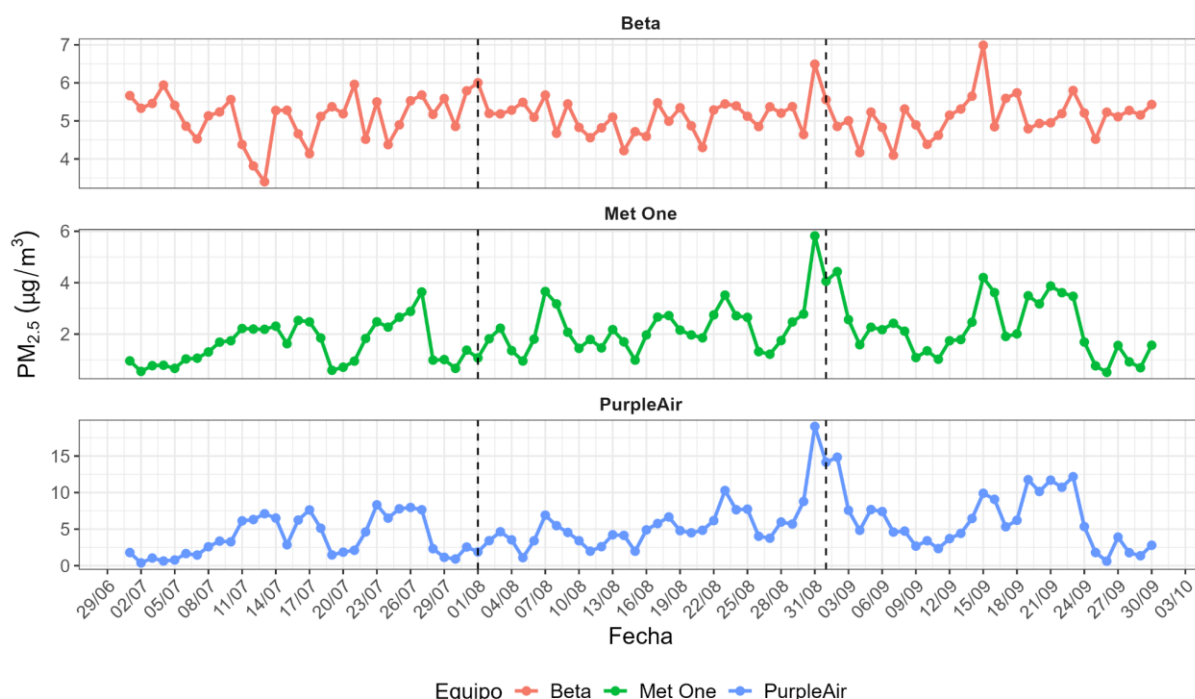
La Figura N° 28 presenta la evolución temporal de las concentraciones promedio diarias de PM_{2.5} registradas en el OVA Marcapomacocha durante el tercer trimestre del año, a partir de los datos obtenidos por el monitor de partículas Beta, el perfilador de partículas METONE – 412 y un sensor PurpleAir. En general, se observan concentraciones bajas, con episodios puntuales de incremento entre los que se destacan aquellos registrados entre el 30 de agosto y el 2 de septiembre, alcanzándose el 31 de agosto el valor promedio diario de 6.5 µg/m³ de acuerdo a las mediciones del monitor Beta, 5.8 µg/m³ de acuerdo

²³ 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.

al equipo MetOne 412 y $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de acuerdo al sensor PurpleAir. Así como, los incrementos registrados entre el 15 y 23 de septiembre, alcanzando el 15 de septiembre el valor de $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Beta), $4.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (MetOne) y $9.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PurpleAir). El incremento en las concentraciones hacia el final del periodo podría estar relacionado a la mayor presencia de focos de calor, potencialmente vinculados a incendios forestales (ver Figura N° 8).

Por otro lado, se resalta que durante todo el periodo de análisis no se registraron concentraciones diarias de $\text{PM}_{2.5}$ superiores al ECA – aire de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (como promedio diario).

Figura N° 28 Variación de la concentración promedio diaria de $\text{PM}_{2.5}$



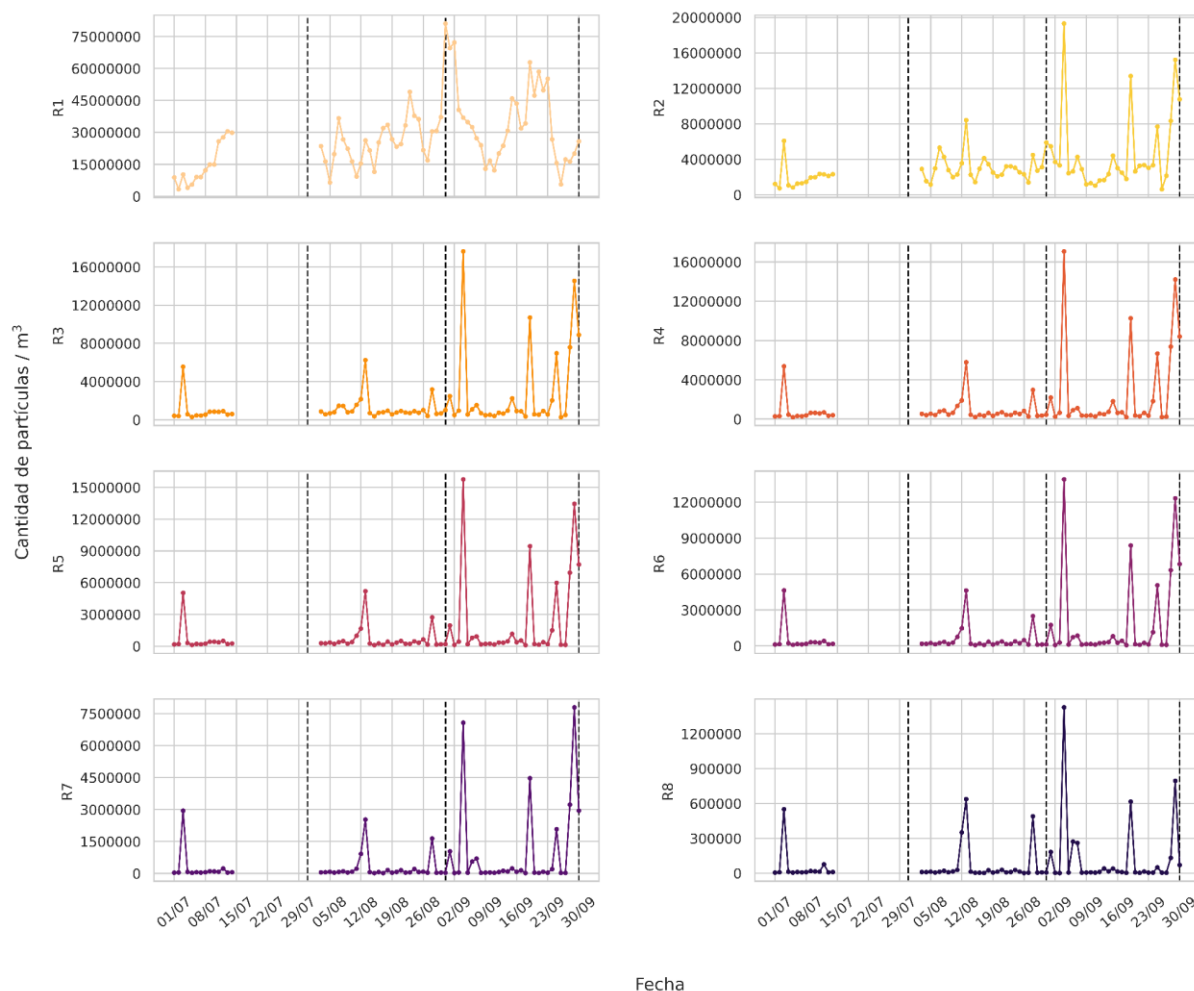
Generalmente, las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} en esta zona son bajas, atribuible a la limitada actividad antropogénica cercana. Las concentraciones más elevadas de PM_{10} están asociadas a la resuspensión de polvo generada por la acción del viento, el paso de animales o vehículos en las proximidades del observatorio. Por otro lado, las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ se vinculan principalmente con la ocurrencia de quemaduras reducidas o de incendios forestales.

B. CONCENTRACIÓN EN NÚMERO DE AEROSOLES

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^{24 25}. 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)²⁶: 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 ($10,0 \mu\text{m} \leq d < 20,0 \mu\text{m}$)²⁷. 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 tercer trimestre (ver Figura N° 29), las mayores concentraciones promedio diarias en número de partículas se observaron en el rango R1, alcanzando un máximo de 81 100 861 partículas/m³ el 31 de agosto. Por otro lado, los rangos R2, R3, R4, R5, R6 y R8 alcanzaron máximos de 19 311 964, 17 627 428, 17 067 571, 15 750 782, 13 900 011 y 1 427 434 partículas/m³ el 4 de septiembre. En el caso del rango R7, se alcanzó un máximo de 13 900 011 el día 29 de septiembre.

²⁴ "[...] 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>

²⁵ UK AIR Air Information Resource (2022). Particle Numbers and Concentrations Network. Revisado el 1 de octubre del 2022 desde: <https://bit.ly/3D80Ap4>

²⁶ El diámetro aerodinámico es un indicador del tamaño de la partícula (World Health Organization Europe, 2005).

²⁷ Cangiamila, S. (2019). Utilizzo e prestazioni di sensori low-cost per il monitoraggio di varie frazioni dimensionali di particolato atmosferico. Universidad de Bologna.

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

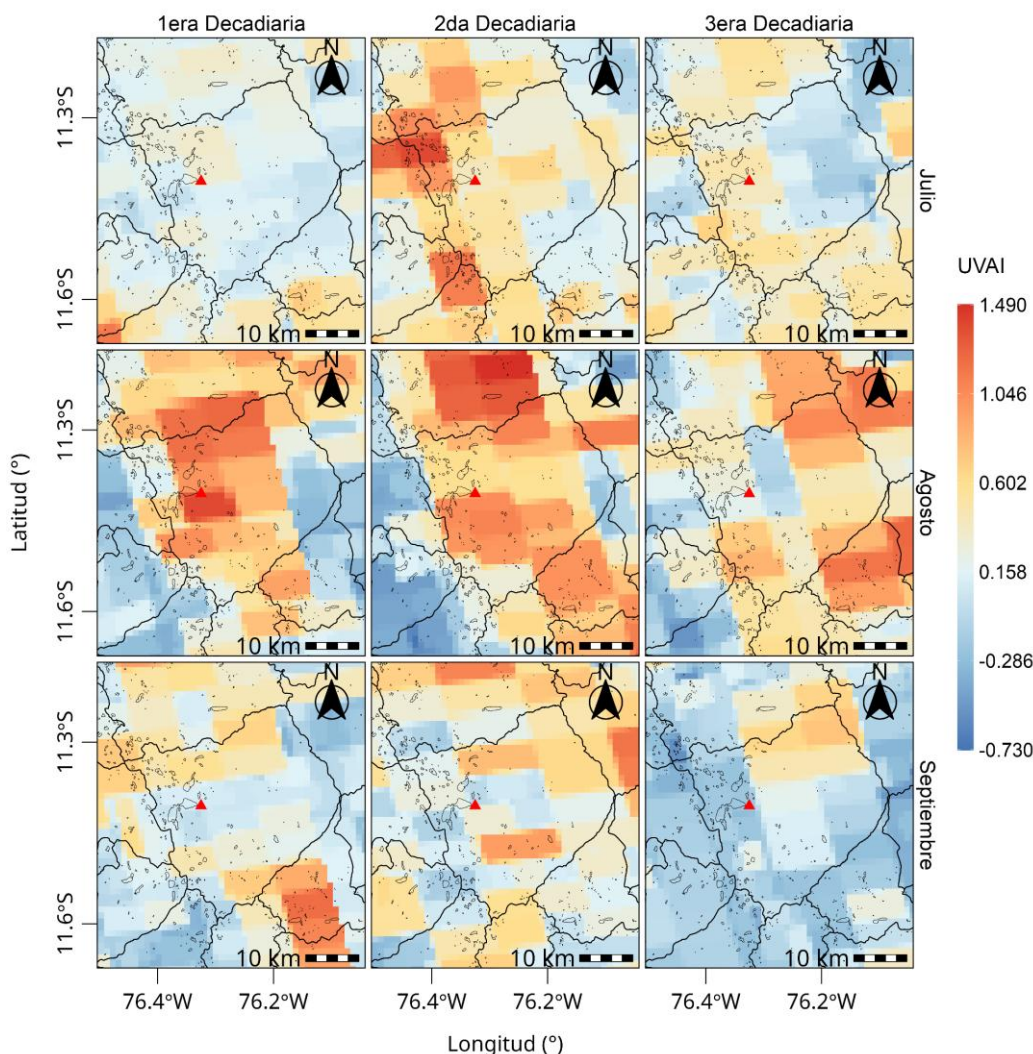
El índice UV Aerosol (UVAI), es una medida de la prevalencia de los aerosoles en la atmósfera, el cual se basa en la diferencia entre la reflectancia observada y la modelada para un par de longitudes de onda (354 y 388 nm) en el rango espectral ultravioleta (UV) que genera un valor residual. Cuando este 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).²⁸ 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.²⁹

En relación a la variación espacial de los valores máximos del UVAI por cada decadiaria del tercer trimestre para el distrito de Marcapomacocha (ver Figura N° 30), se observó que se alcanzaron valores máximos de hasta 1.39 en la segunda decadiaria de julio y 1.38 en la primera decadiaria de agosto. Asimismo, el promedio areal, indica que el mayor valor corresponde a la segunda decadiaria de agosto (0.71) seguido de la primera decadiaria del mismo mes (0.66). En general, para la ubicación del OVA Marcapomacocha, a mediados del trimestre predominaron los valores positivos más altos con una tendencia a la disminución, cuyo valor máximo se alcanzó en la segunda decadiaria del mes de agosto (0.89). Dichos valores estarían asociados a la menor ocurrencia de precipitaciones y mayor frecuencia de incendios forestales en la amazonia del Perú y países cercanos como Brasil y Bolivia.

²⁸ 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>

²⁹ 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

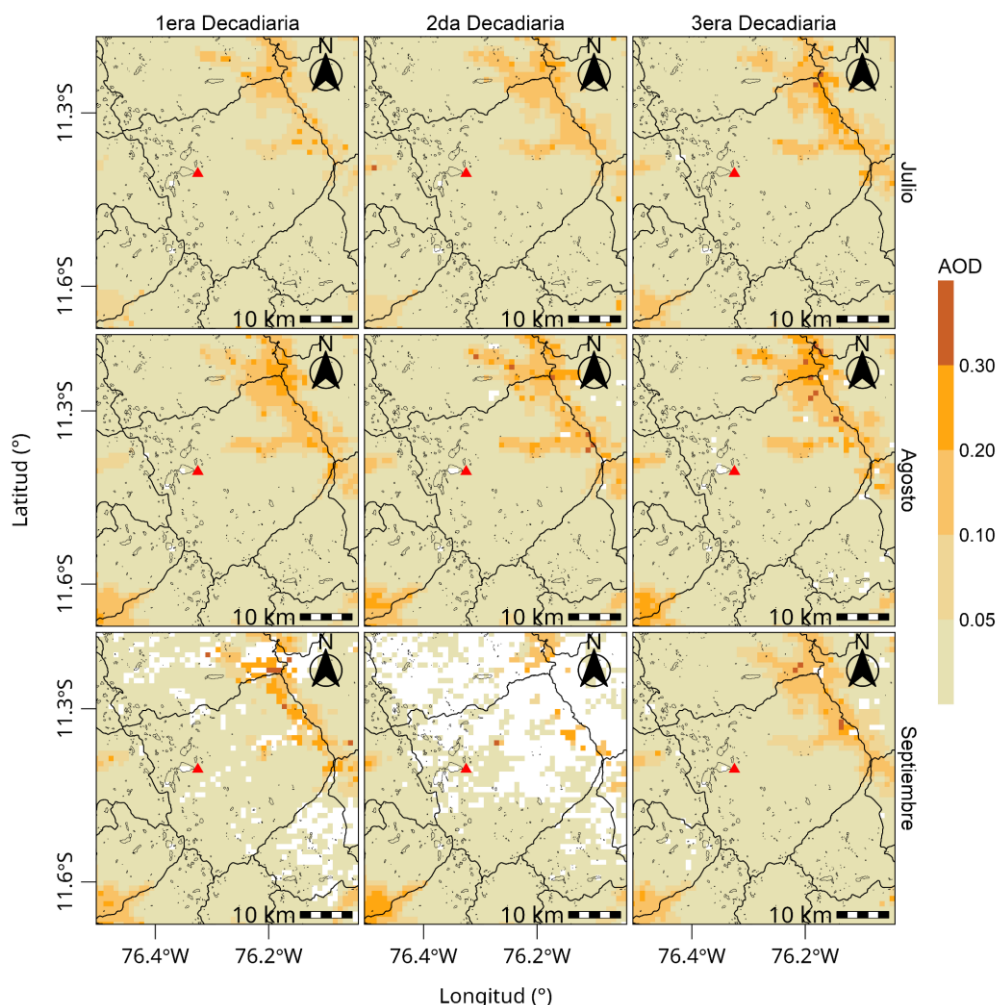
La profundidad óptica de aerosoles (AOD por sus siglas en inglés), es una medida de cuánto reducen las partículas en el aire el paso de la luz a través de la atmósfera. Los aerosoles absorben y dispersan la luz solar entrante, reduciendo así la visibilidad y aumentando la carga óptica. En términos generales, 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.³⁰

En relación a la variación espacial de los valores máximos del AOD por cada decadiaria del tercer trimestre para el distrito de Marcapomacocha (ver Figura N° 31), se observó que se alcanzaron valores máximos de hasta 0.332 en la segunda decadiaria de agosto. Asimismo, el promedio areal, indica que la decadiaria con el mayor valor corresponde a la tercera decadiaria de agosto (0.035). En general, se presentan mayores valores a mediados del trimestre, lo cual estaría asociado a

30 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

la menor frecuencia de precipitaciones y al incremento de incendios forestales en la amazonía del Perú y países cercanos como Brasil y Bolivia.

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



E. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE

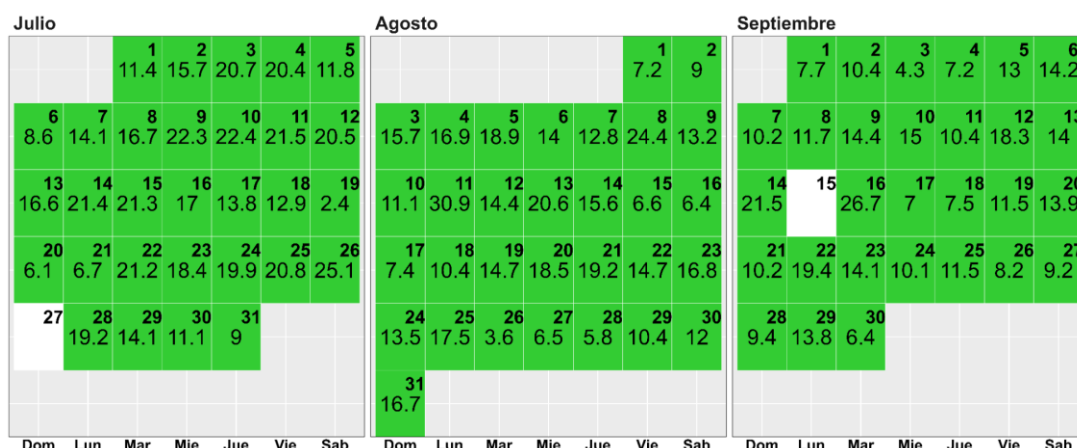
La estimación del índice de calidad del aire (ICA) por material particulado³¹ consideró los promedios diarios de los valores de concentración en masa registrados por el perfilador METONE – 412 para el caso de PM₁₀ y el monitor de partículas Beta para el caso del PM_{2.5}.

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 julio, agosto y septiembre presentaron una calidad del aire “Buena”.

³¹ 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>

Figura N° 32 Estados de calidad del aire para PM₁₀

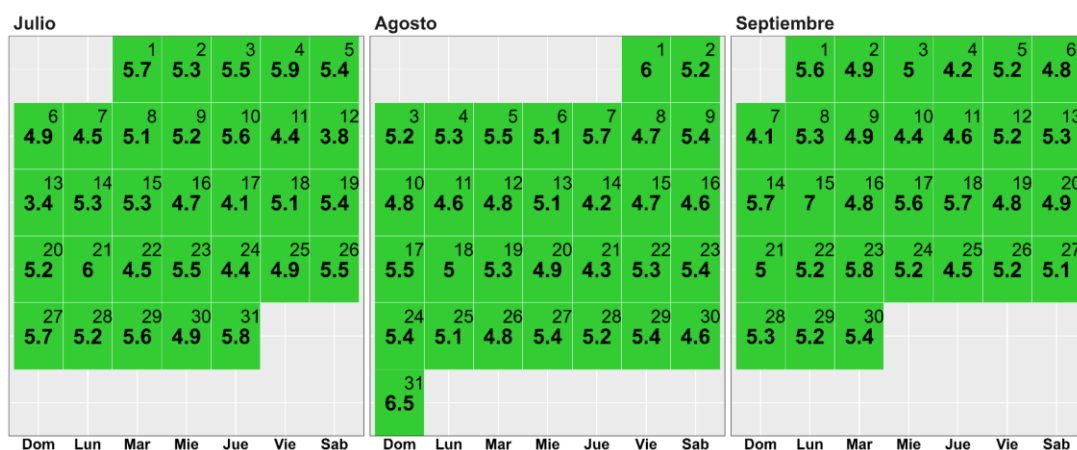


Concentración PM ₁₀ (µg/m ³)		Estado	Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	54	Buena	0	50
55	154	Moderada	51	100
155	254	Insalubre para grupos sensibles	101	150
255	354	Insalubre	151	200

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 durante los meses de julio, agosto y septiembre se presentaron días con una calidad del aire "Buena".

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



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 tercer 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), 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)

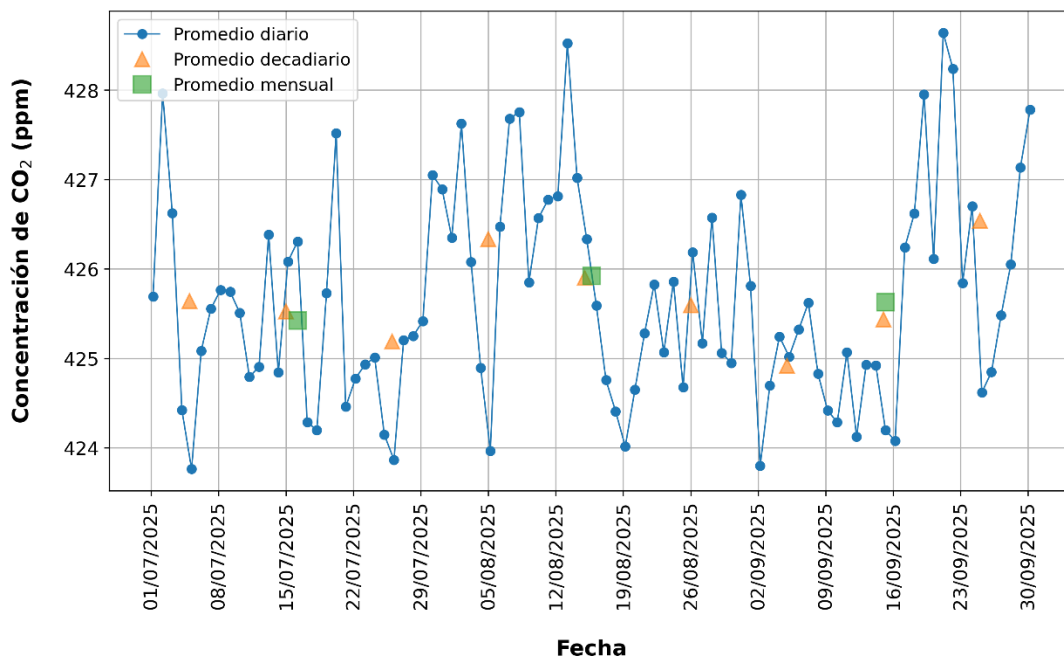
El CO₂ es el gas de efecto invernadero o gas que atrapa el calor, más abundante en la atmósfera, contribuye en aproximadamente el 66 % al forzamiento radiativo producido por estos gases de larga vida. Asimismo, es responsable de alrededor del 79% del aumento del forzamiento radiativo durante la última década y alrededor del 77% del aumento en los últimos cinco años.³²

³² WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 20. Obtenido de: <https://library.wmo.int/records/item/69057-no-20-28-october-2024>

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.³³ 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.³⁴

La Figura N° 36 muestra la evolución del promedio diario de CO₂ durante el tercer trimestre, donde se destaca que los valores más altos se encontraron en la tercera decadiaria de septiembre (día 21 - 428.6 ppm) y segunda decadiaria de agosto (día 13 - 428.5 ppm). Por otro lado, los valores más bajos se encontraron en la primera decadiaria de julio (día 5 - 423.8 ppm) y primera decadiaria de septiembre (día 2 - 423.8 ppm). Asimismo, el promedio decadiario más alto corresponde a la tercera decadiaria de septiembre con 426.5 ppm; mientras que, el valor más bajo corresponde a la primera decadiaria de septiembre con 424.9 ppm. En general, agosto presentó el promedio más alto (425.9 ppm) en comparación a los meses de julio y septiembre.

Figura N° 36 Evolución del promedio diario, decadiario y mensual de CO₂ durante el tercer 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 durante el horario nocturno, alcanzando los mayores valores entre las 00:00 horas a 07:00 horas;

³³ Dióxido de carbono. Obtenido de: <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/dioxido-de-carbono/>

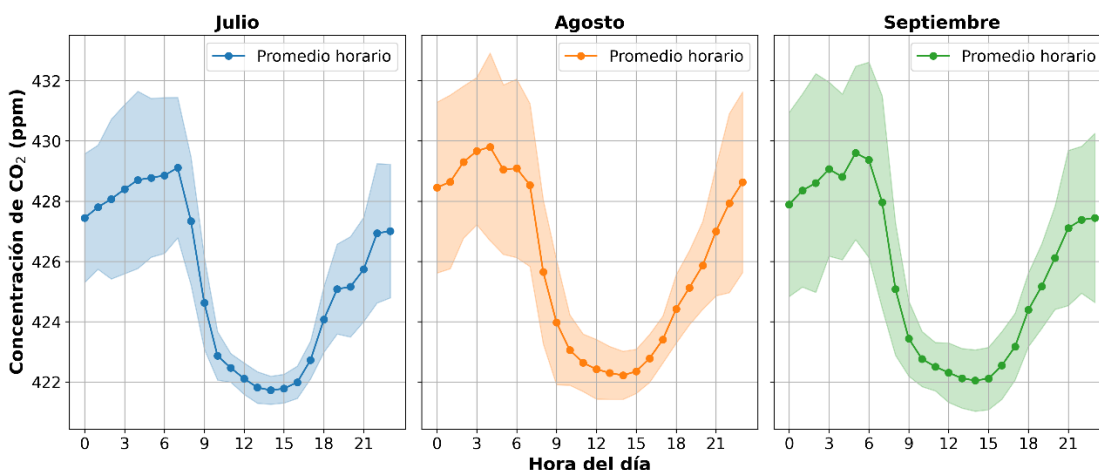
³⁴ Emisiones de dióxido de carbono. Obtenido de: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>

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 julio, el promedio horario de CO₂ osciló entre 421.1 ppm (12:00 horas) y 429.1 ppm (07:00 horas), con desviaciones estándar de 0.47 ppm a 2.94 ppm. En agosto, el rango de los promedios horarios estuvo entre 422.2 ppm (14:00 horas) y 429.8 ppm (04:00 horas), con desviaciones estándar entre 0.73 ppm y 3.11 ppm. En septiembre, los promedios horarios se presentaron de 422 ppm (14:00 horas) a 429.6 ppm (05:00 horas), con desviaciones estándar de 0.8 ppm a 3.63 ppm.

En general, se puede apreciar que, para el trimestre, tanto los promedios horarios más altos se encontraron tanto en el mes de agosto como de septiembre; mientras que, los promedios más bajos se presentaron en el mes de julio.

Figura N° 37 Ciclo horario promedio del CO₂ por cada 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).³⁵

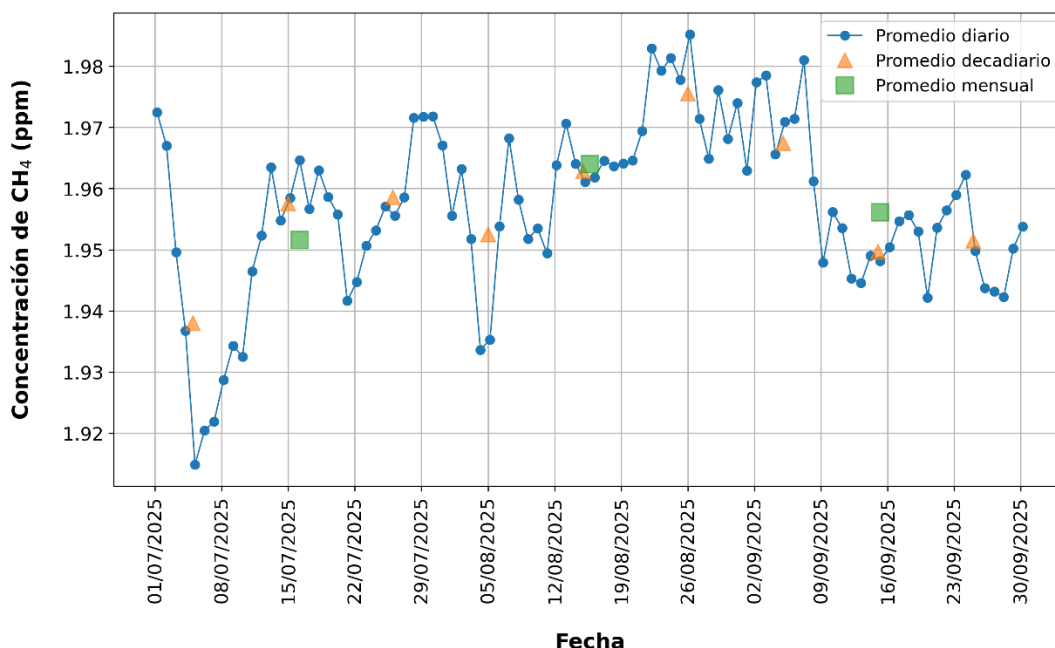
Este potente gas de efecto invernadero es el segundo contribuyente más grande al calentamiento climático después del dióxido de carbono (CO₂). Una molécula de metano atrapa más calor que una molécula de CO₂; no obstante, el metano tiene una vida relativamente corta de 7 a 12 años en la atmósfera, mientras que el CO₂ puede persistir durante cientos de años o más.³⁶

³⁵ WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 20. Obtenido de: <https://library.wmo.int/records/item/69057-no-20-28-october-2024>

³⁶ Metano. Obtenido de: <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/metano/>

La Figura N° 38 muestra la evolución del promedio diario de CH₄ durante el tercer trimestre, donde se destaca que los valores más altos se encontraron en la tercer decadiaria de agosto (día 26 – 1.985 ppm, día 22 – 1.983 ppm y día 24 – 1.981 ppm). Por otro lado, los valores más bajos se encontraron en la primera decadiaria de junio (día 5 – 1.915 ppm, día 6 – 1.921 y día 7 – 1.922 ppm). Asimismo, el promedio decadiario más alto corresponde a la tercera decadiaria de agosto con 1.976 ppm; mientras que, el valor más bajo corresponde a la primera decadiaria de julio con 1.938 ppm. En general, agosto presentó el promedio más alto (1.964 ppm) y en contraparte, julio presentó el promedio más bajo (1.952 ppm).

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

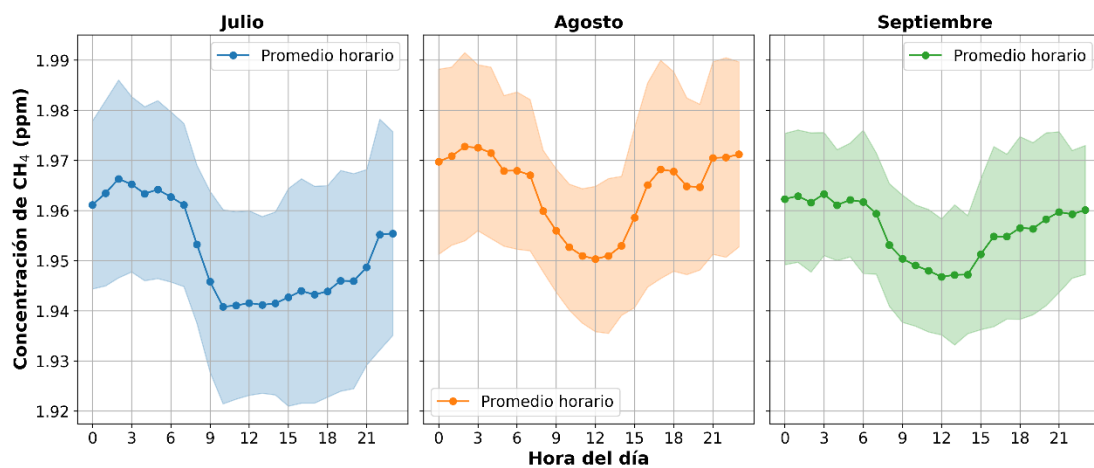


Respecto al ciclo horario de las concentraciones de CH₄ (ver Figura N° 39), se observa para cada mes del trimestre que, en promedio los mayores valores se dan entre las 22:00 horas a 07:00 horas; mientras que entre las 10:00 a 16:00 horas se alcanzan los menores valores. Esto, puede deberse a la estabilidad 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 julio, el promedio horario de CH₄ osciló entre 1.941 ppm (10:00 horas) y 1.966 ppm (02:00 horas), con desviaciones estándar de 0.016 ppm a 0.023 ppm. En agosto, el rango de los promedios horarios estuvo entre 1.95 ppm (12:00 horas) y 1.972 ppm (02:00 horas), con desviaciones estándar entre 0.012 ppm y 0.022 ppm. En septiembre, los promedios horarios se presentaron de 1.947 ppm (12:00 horas) a 1.963 ppm (03:00 horas), con desviaciones estándar de 0.011 ppm a 0.018 ppm.

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

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



VI. CONCLUSIONES

- Durante el tercer 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 Oeste (O) y Sur sureste (SSE).
- En cuanto a las condiciones meteorológicas locales, los vientos mostraron intensidades extremas y fuertes en el horario vespertino para todo el trimestre y en el horario matutino para el mes de septiembre. Por su parte, la precipitación presentó una tendencia al incremento hacia septiembre con un máximo acumulado diario de 10.6 mm, al igual que la humedad relativa que aumentó a un promedio diario de 90%. Respecto a la temperatura, también se presentaron máximos diarios más altos hacia el mes de agosto con un promedio de 11.9 °C. En cuanto al comportamiento de la radiación solar se presentó la misma tendencia con un pico máximo de acumulado diario de 8563 W/m² en agosto.
- Durante el trimestre se evidenció una tendencia al incremento de focos de calor hacia el mes de septiembre donde se presentó la mayor potencia, lo cual estaría asociado a la ocurrencia de incendios forestales en la amazonia del Perú.
- Respecto a la Columna Total de Ozono, el mayor valor del trimestre (252 UD) se encontró en la tercera decadiaria de septiembre (día 22), el cual estuvo por encima de su normal climática; mientras que, el valor más bajo (240 UD) se encontró en la primera decadiaria de septiembre (día 2), el cual 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 primera decadiaria de septiembre (día 9); mientras que, los menores valores también se presentaron en la misma decadiaria (día 6). Asimismo, en promedio durante el trimestre, la radiación UVE representó el 0.4% de la radiación UVT.
- Durante la primera y segunda decadiaria del mes de agosto, predominó el IUV máximo diario de categoría Extremadamente Alta; mientras que los menores valores del IUV máximo diario se encontraron en la primera y segunda decadiaria de julio y septiembre (categoría Alta).
- En relación al O₃ troposférico, los promedios móviles de 8 horas registraron el mayor valor del trimestre en la segunda decadiaria de septiembre (68.3 µg/m³) y un mínimo en la segunda decadiaria de julio (21.6 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. Por otro lado, tanto julio y agosto presentaron días con estado de calidad del aire "Buena", y para septiembre, se alcanzaron 28 días con estado de calidad del aire "Buena" y 1 día con estado de calidad del aire "Moderada".
- En cuanto a la vigilancia satelital de gases reactivos para el distrito de Marcapomacocha, las densidades de CO en la columna troposférica presentaron

valores promedios decadiarios con una tendencia general al incremento conforme avanzó el trimestre. Por su parte, el HCHO mostró ligero incremento hacia agosto y septiembre. Respecto al NO₂, se registraron valores más altos hacia agosto y finales del trimestre. Finalmente, el SO₂ presentó una disminución hacia la tercera decadiaria de julio, seguida de un incremento hacia las decadiarias de agosto y septiembre.

- Sobre la vigilancia de la deposición húmeda, los valores de pH y Conductividad Eléctrica no evidenciaron presencia de lluvia ácida; no obstante, se presentó un valor máximo de Conductividad Eléctrica de 19.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$, el cual estuvo cercano al umbral de 20 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual podría estar relacionado a la ocurrencia de los incendios forestales en la amazonia.
- En relación a la vigilancia de aerosoles, las concentraciones más altas de PM₁₀ y PM_{2.5} se registraron en los meses de agosto y septiembre, y estarían vinculadas al incremento 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. Respecto al estado de la calidad del aire, se presentaron días con calidad del aire "Buena" tanto para PM_{2.5} como para PM₁₀.
- Por su parte la vigilancia satelital de aerosoles mostró que el UVAI alcanzó su máximo promedio areal para el distrito de Marcapomacocha en la segunda decadiaria de agosto (0.71) y en cuanto a la ubicación del OVA se alcanzó un valor de 0.89 en el mismo periodo. Respecto al AOD, se obtuvieron máximos valores en la segunda decadiaria de agosto (0.332). En general, se observaron mayores valores a mediados del trimestre, lo cual estaría asociado a la ocurrencia de incendios forestales en la amazonia del Perú y países cercanos como Brasil y Bolivia
- Por otro lado, en cuanto a los gases de efecto invernadero, se evidencia un incremento de las concentraciones de CO₂ y de CH₄ para el mes de agosto, lo cual estaría asociado principalmente a quemas agrícolas en la sierra e incendios en la amazonia del Perú y los países cercanos como Brasil y Bolivia. En general durante el trimestre no se observa alguna tendencia.

.....

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
Brian Daygolo Chávez Lino
Steven Gilber Arce Quispe
Hanns Kevin Gómez Muñoz
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: Enero del 2026

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

