



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

Octubre – Diciembre 2024



PRESENTACIÓN

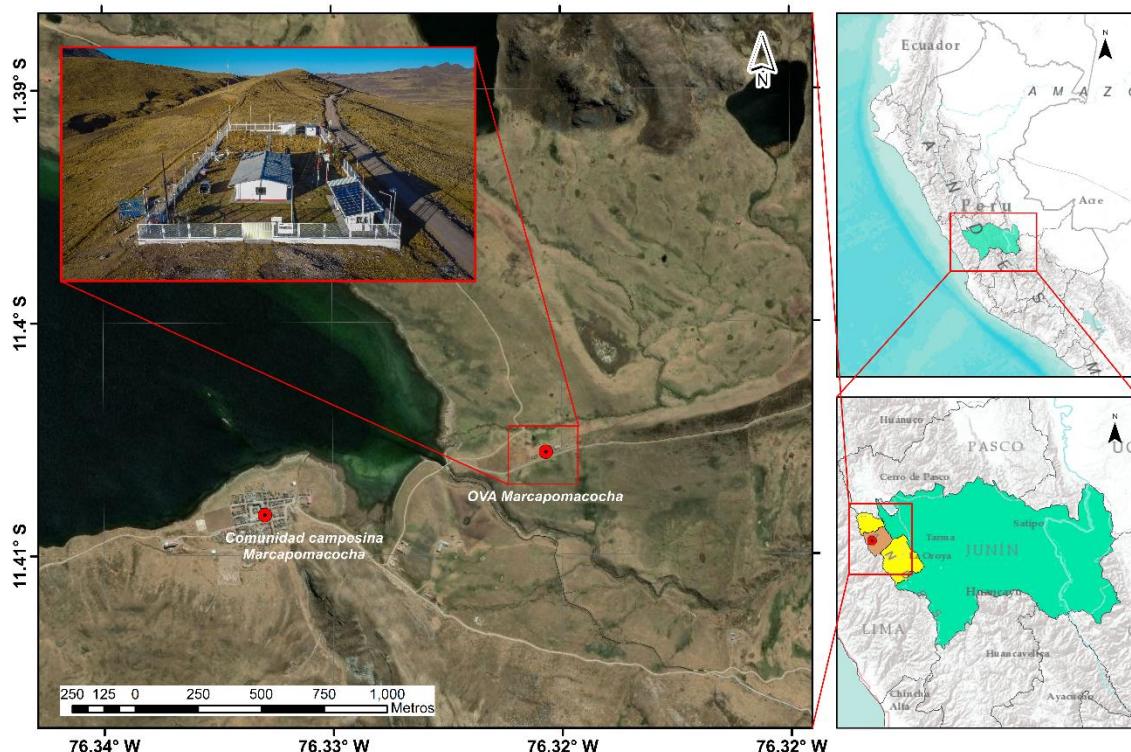
El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) a través de la Subdirección de Evaluación del Ambiente Atmosférico (SEA) de la Dirección de Meteorología y Evaluación Ambiental Atmosférica (DMA) publica el boletín trimestral de Monitoreo de la Atmósfera en el Observatorio de Vigilancia 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 cuarto trimestre del 2024.

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 Nº 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 Nº 1 Mapa de ubicación del OVA Marcapomacocha



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

I. ANÁLISIS SINÓPTICO

En octubre², en niveles altos, se presentó una configuración anticyclónica débil sobre el noroeste del continente Sudamericano, influyendo principalmente sobre Bolivia, Perú, Colombia y Brasil. Asimismo, a partir de los 10°S hacia latitudes mayores dominaron vientos del oeste asociados a una onda ligeramente pronunciada; estos sistemas atmosféricos asociados generaron condiciones de inestabilidad principalmente sobre el Perú, Colombia, Brasil, Chile y Argentina. En niveles medios, predominaron flujos del oeste con componente zonal dominante, desde los 20°S hacia latitudes mayores asociado a una onda débilmente configurada. También, dominaron flujos anticyclónicos débiles sobre Brasil (que se extendieron desde el Atlántico) y sobre el Pacífico alrededor de los 12°S. Estos sistemas favorecieron el ingreso de flujos del este con humedad (entre el 30-70%) hacia el Perú, Bolivia, Brasil y otros países del norte de Sudamérica (Ver Figura N°2a).

En noviembre³, Para el mes de noviembre, en niveles altos, predominó la presencia de la Alta de Bolivia (AB) con núcleo sobre Bolivia (en los 15°S y 65°W aproximadamente), asociada a la Vaguada al Noreste de Brasil (VNB), aportando inestabilidad sobre Brasil, Colombia, Ecuador y Perú, principalmente. Asimismo, a partir de los 10°S hacia latitudes mayores predominaron vientos del oeste con componente zonal dominante, asociados a una onda ubicada entre los 15°S y 45°S. En niveles medios, predominaron flujos del oeste con componente zonal dominante, asociados a una onda débilmente configurada, desde los 25°S hacia latitudes mayores. También dominaron dos flujos anticyclónicos, uno configurado sobre el océano Pacífico (con núcleo no definido) 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 mayor a 60% hacia el Perú, norte de Bolivia, Brasil y otros países del norte de Sudamérica (Ver Figura N°2b).

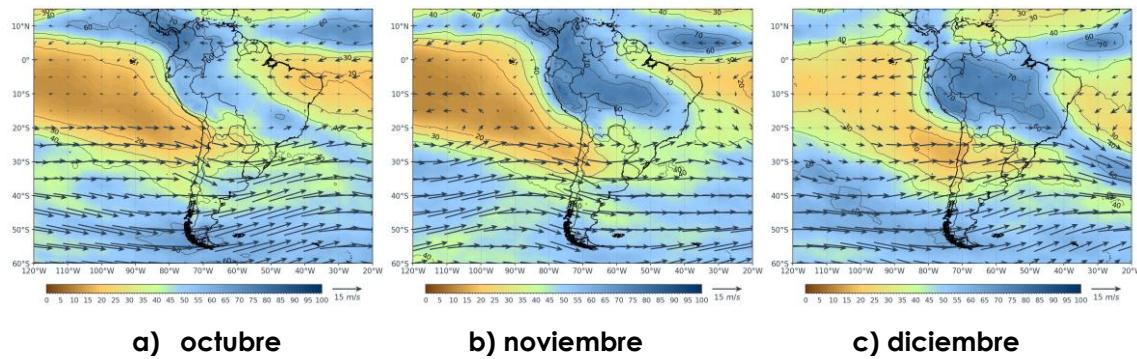
Durante diciembre⁴, en niveles altos, predominó la presencia de la Alta de Bolivia (AB) con núcleo sobre Bolivia (en los 15°S y 61°W aproximadamente), asociada a la Vaguada al Noreste de Brasil (VNB), aportando inestabilidad sobre Brasil, Venezuela, Colombia, Perú y Bolivia, principalmente. Asimismo, desde los 10°N hasta los 5°S y a partir de los 15°S hacia latitudes mayores predominaron vientos del oeste con componente zonal dominante (a partir de los 23°S), asociados a ondas ubicadas entre los 0° a 30°S y entre los 30°S a 55°S. En niveles medios, predominaron flujos del oeste con componente zonal dominante desde los 25°S hacia latitudes mayores, asociados a una onda poco configurada, que se reflejó desde niveles altos. También dominaron dos flujos anticyclónicos, uno configurado sobre el océano Pacífico (con núcleo entre los 18°S y 88°W, aproximadamente) y otro al 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 el Perú, norte de Bolivia, Brasil y Colombia (Ver Figura N°2c).

² VIGILANCIA SINÓPTICA DE SUDAMÉRICA, OCTUBRE: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-116.pdf>

³ VIGILANCIA SINÓPTICA DE SUDAMÉRICA, NOVIEMBRE: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-117.pdf>

⁴ VIGILANCIA SINÓPTICA DE SUDAMÉRICA, DICIEMBRE: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-118.pdf>

Figura N° 2 Mapas de campos de viento y humedad relativa en niveles medios de la atmósfera (500hPa)

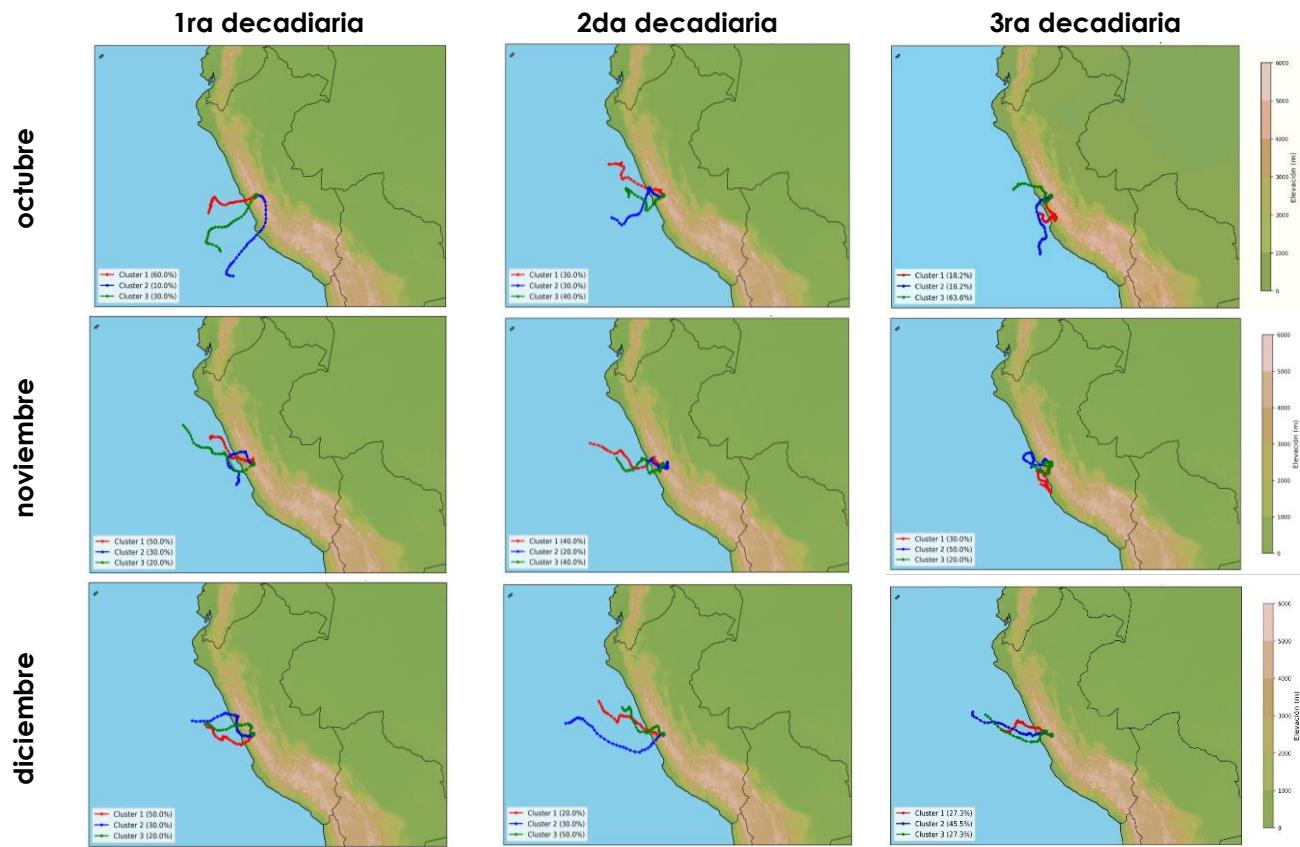


II. ANÁLISIS DE TRAYECTORIAS

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 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 octubre (ver Figura N° 3a), se observó que, en las tres decadiarias analizadas, predominaron 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 ligeramente más corto. En noviembre (ver Figura N° 3b), durante la primera y segunda decadiaria, se evidenció una predominancia de masas de aire de dirección noroeste (NO), de carácter mayormente marítimo. En la tercera decadiaria, el trayecto presentó un desplazamiento más corto, concentrándose sobre la costa de Lima e Ica, con una ligera inclinación hacia el suroeste (SO). Finalmente, en diciembre (ver Figura N° 3c), se apreció una configuración homogénea del patrón de vientos, con predominancia de masas de aire del oeste (O) en las tres decadiarias evaluadas.

Figura N° 3 Clúster de retrotrayectorias por cada decadiaria y mes del cuarto trimestre del 2024



III. MONITOREO METEOROLÓGICO LOCAL

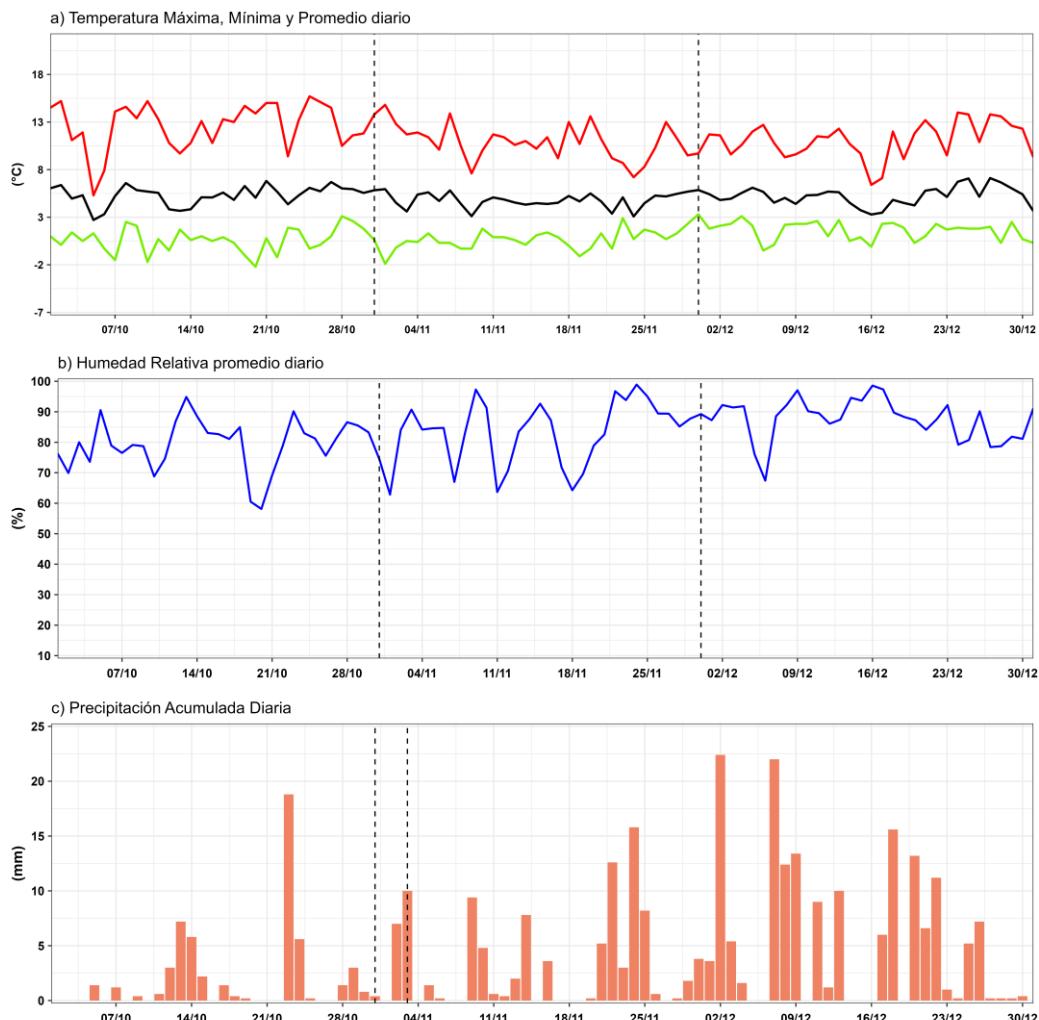
En el cuarto trimestre del año, a partir de los datos de la Estación Meteorológica Automática del OVA Marcapomacocha, se llevó a cabo un análisis de la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%), precipitación (mm), radiación solar (W/m^2), intensidad (m/s) y dirección ($^{\circ}$) de vientos.

En octubre, la temperatura máxima promedio del aire fue de 12.6°C , mientras que la mínima promedio fue de 0.6°C . En noviembre, se registró una temperatura máxima promedio de 10.8°C y una mínima promedio de 0.7°C . Para diciembre, la temperatura máxima promedio fue de 11.1°C , mientras que la mínima promedio subió a 1.5°C (Figura N°4a).

En cuanto a la humedad relativa promedio diario, en octubre se alcanzó una máxima de 79.2%, una mínima de 58.1% y un promedio de 94.8%. En noviembre, se registró una máxima de 84.9%, una mínima de 62.8% y un promedio de 98.9%. En diciembre, se registró una máxima de 88.5%, una mínima de 67.4% y un promedio de 98.5% (Figura N°4b).

En relación con la precipitación acumulada diaria, en octubre se alcanzó un acumulado de 54 mm y un promedio de 1.7 mm. En noviembre, se obtuvo un acumulado de 124.2 mm y un promedio de 4.4 mm. En diciembre, se obtuvo un acumulado de 183 mm y un promedio de 7.038 mm (Figura N°4c).

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

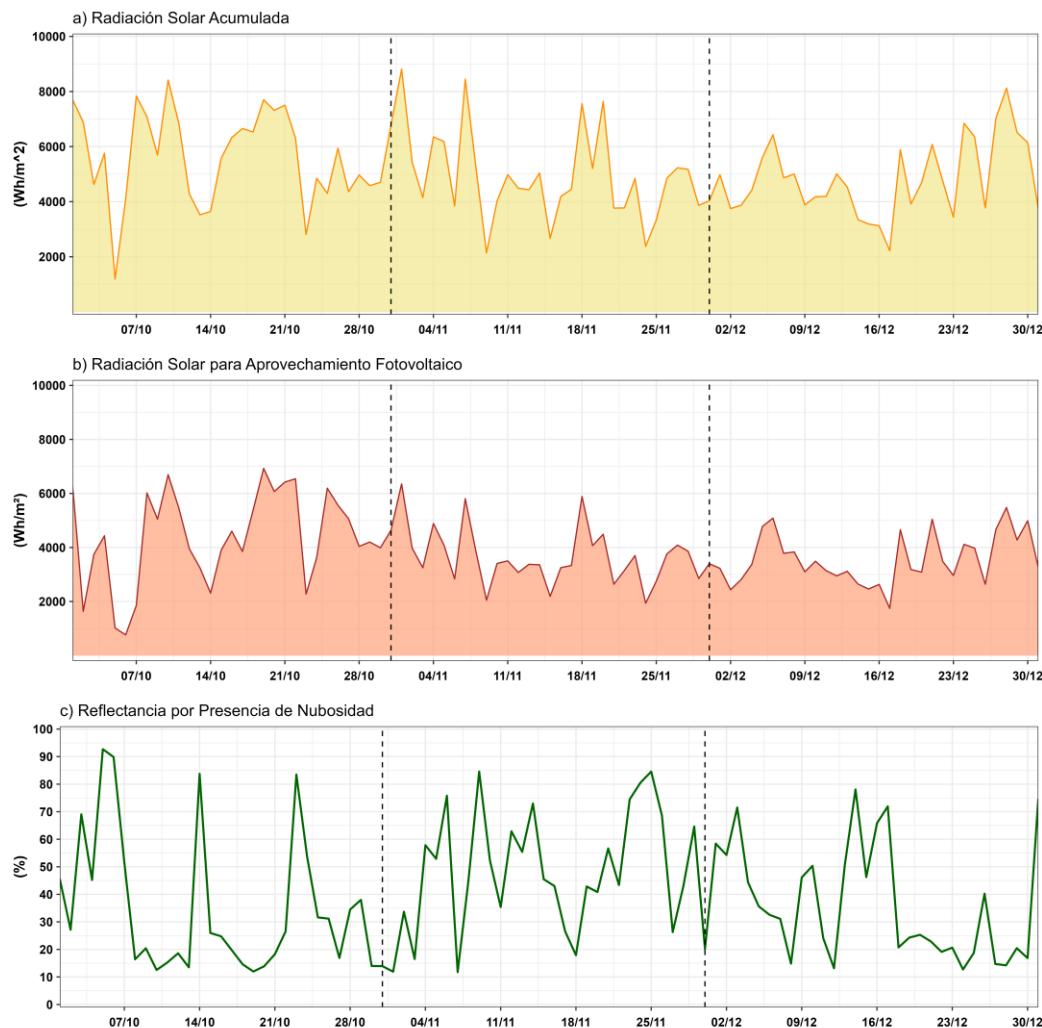


Respecto a la radiación solar global acumulada, en octubre se obtuvo una máxima de 8416 W/m² (día 10), mientras que el valor mínimo fue de 1191 W/m² (día 5). Durante noviembre, se alcanzó una máxima de 8816 W/m² (día 1), mientras que el valor mínimo fue de 2140 W/m² alcanzado el día 9. En diciembre, se alcanzó una máxima de 8563 W/m² (día 10), mientras que el valor mínimo fue de 2158 W/m² (día 28) (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 6929 W/m² para el 10 de octubre. Para noviembre, se registró un valor máximo de 6354 W/m² (día 1) y finalmente, en diciembre se encontró un valor máximo de 5482 W/m² (día 28) (ver Figura N°5b).

Con respecto a la reflectancia por nubosidad, se observó que durante octubre se alcanzó un valor máximo de 92%, registrado el día 5, durante el mes de noviembre se alcanzó el valor máximo de 84.5% el día 25, en diciembre se registró el valor más alto alcanzando un 78.1% el día 14 (ver Figura N°5c).

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

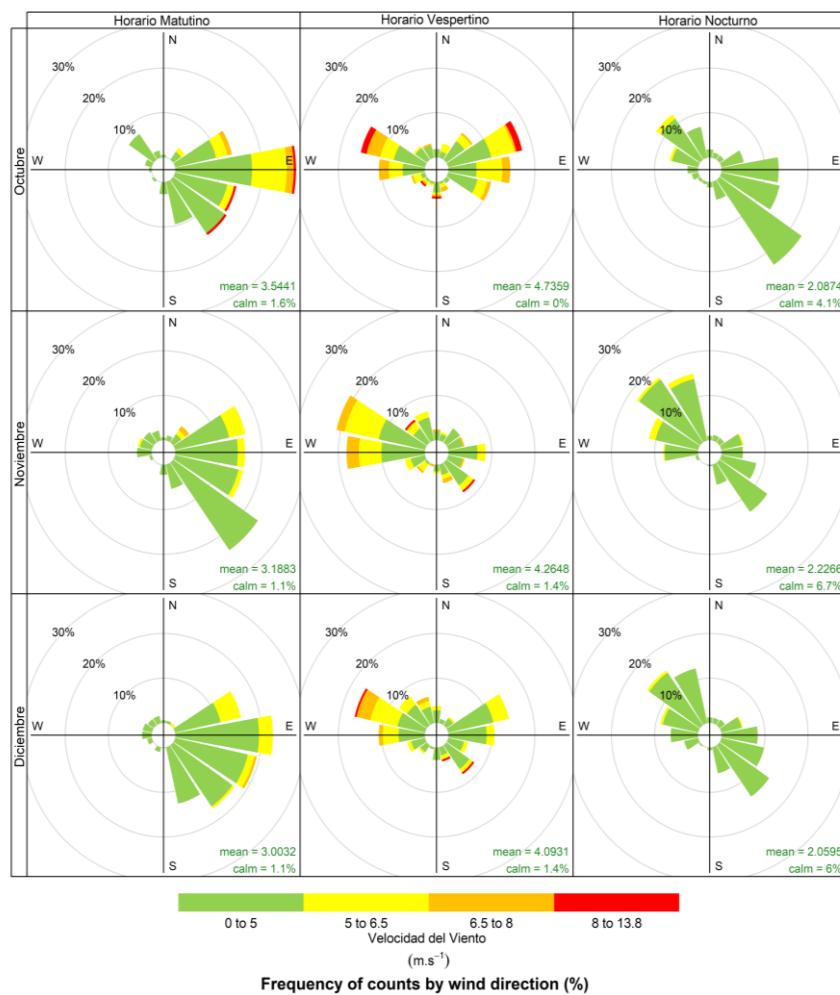


En la Figura N° 6, se observan las rosas de vientos para los horarios matutino (07:00 a 11:59 horas), vespertino (12:00 a 18:59 horas) y nocturno (19:00 a 06:59 horas) de los meses evaluados, en donde las categorías de la intensidad del viento corresponden a: débiles (0 – 5 m/s), moderados (5 – 6.5 m/s),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

Durante el horario matutino, la dirección del viento predominante fue del sureste (E) en octubre y diciembre, con intensidad extrema y moderada; mientras que en noviembre se tuvo una dirección predominante del sureste (SE) con intensidad débil. Por otra parte, en el horario vespertino, la dirección predominante fue del este noreste (ENE) en el mes de octubre y con una intensidad extrema; mientras que en noviembre y diciembre se tuvieron vientos con dirección predominante del oeste noroeste (ONO), con una intensidad fuerte y extrema. Finalmente, para el horario nocturno, en el mes de octubre, los vientos tuvieron una dirección predominante del suroeste (SO), con una intensidad débil; mientras que, para noviembre y diciembre se observó una dirección predominante del noroeste (NO), con una intensidad moderada.

Cabe resaltar que, el horario vespertino presentó durante los tres meses de estudio vientos con intensidades máximas dentro de la categoría de extremo.

Figura N° 6 Rosa de vientos por horario y mes del cuarto trimestre 2024



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 (CO_2 , CH_4 y N_2O), gases reactivos (CO , NO_2 , 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 ABI Full Disk (ABI-L2-FDCF) del Geostationary Operational Environmental Satellite-16 (GOES-16)⁶ y el producto VIIRS-AF-Iband-EDR del Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) del Satelite NOAA-20⁷, se realizó el seguimiento de los focos de calor durante el cuarto trimestre del 2024.

⁵ La quema de biomasa en Sudamérica vista desde el espacio. Obtenido de:

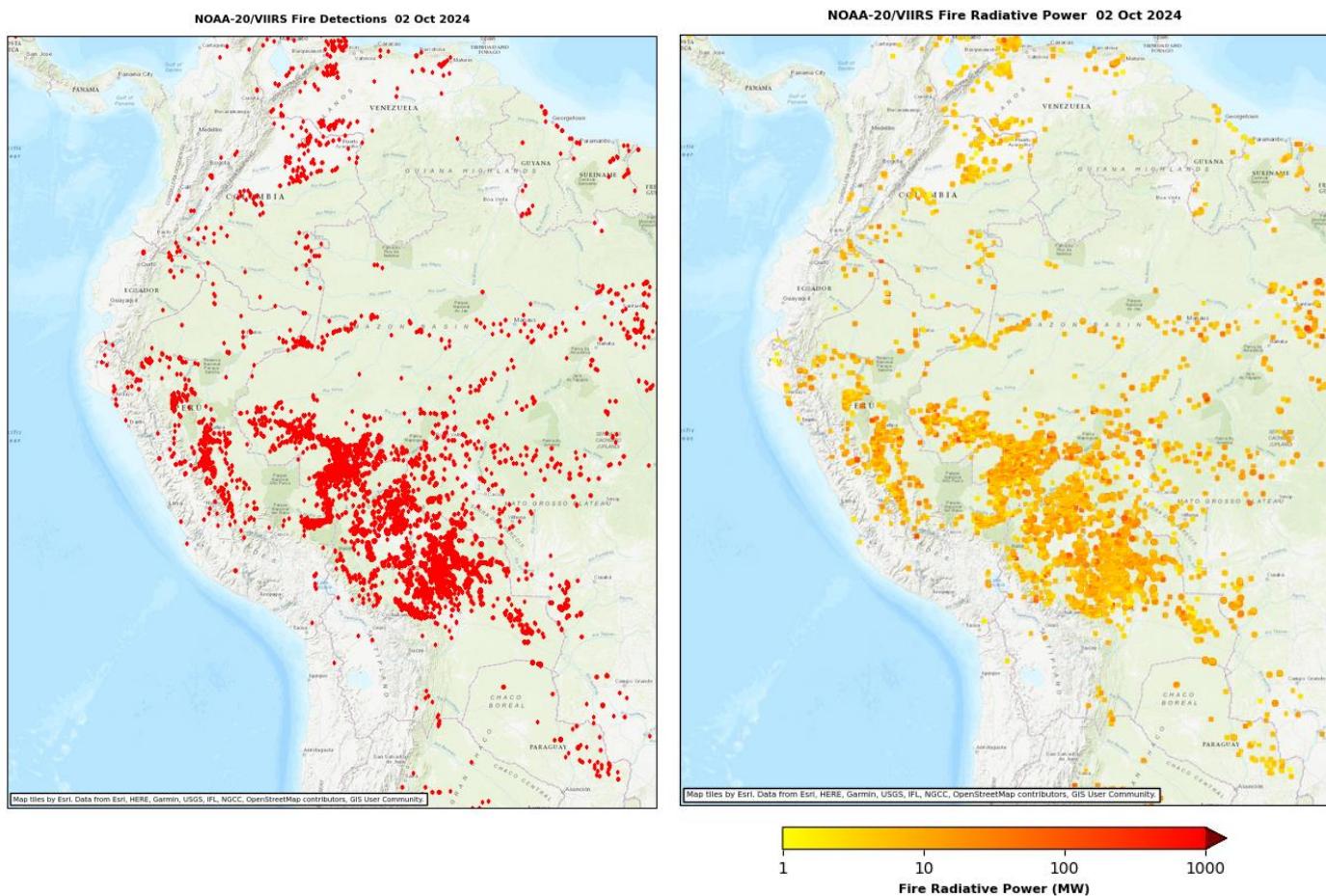
https://www.researchgate.net/profile/Pablo-Canziani/publication/242093033_LA_QUEMA_DE_BIOMASA_EN_SUDAMERICA_VISTA_DESDE_EL_ESPACIO/links/00463528378a684dfd000000/LA-QUEMA-DE-BIOMASA-EN-SUDAMERICA-VISTA-DESDE-EL-ESPACIO.pdf

⁶ Documentación del GOES-16: https://www.star.nesdis.noaa.gov/atmospheric-composition-training/satellite_data.php#abi_documentation

⁷ Datos VIIRS : <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#d:24hrs:@0,0,0,0,3.0z>

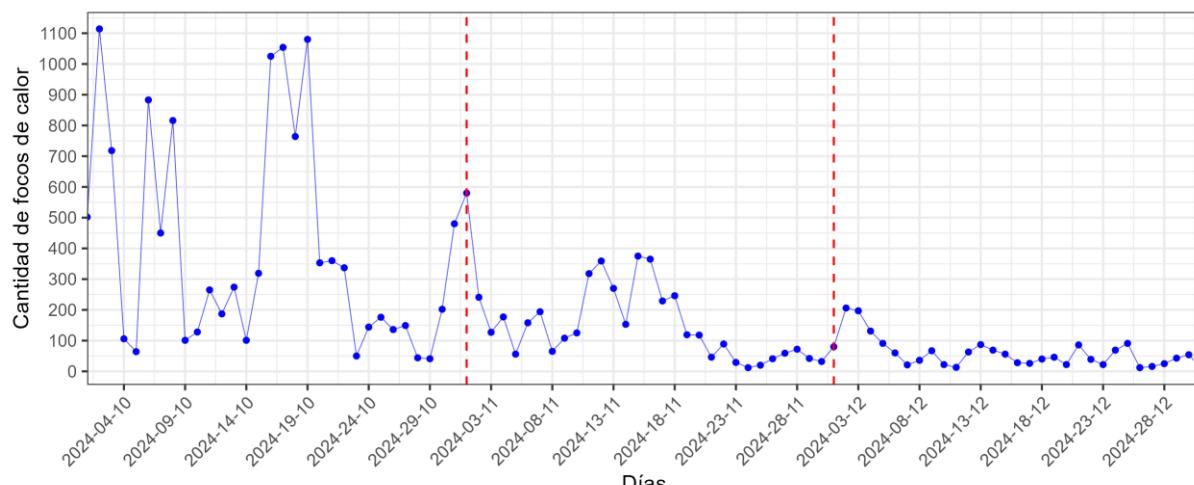
En la Figura N°7 se presentan los focos de calor y su potencial radiativo de fuego en Sudamérica durante el 2 de octubre del 2024, donde se destaca una importante presencia y energía térmica en la sierra central y norte del Perú y en países vecinos como Brasil y Bolivia.

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 en Perú durante el tercer trimestre del año, con los mayores valores en la primera decadiaria de octubre, alcanzo los 1100 focos de calor (día 2) y con una clara tendencia a la disminución hacia el mes de diciembre.

Figura N° 8. Cantidad de focos de calor en el Perú durante el cuarto trimestre de 2024



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

5.1 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



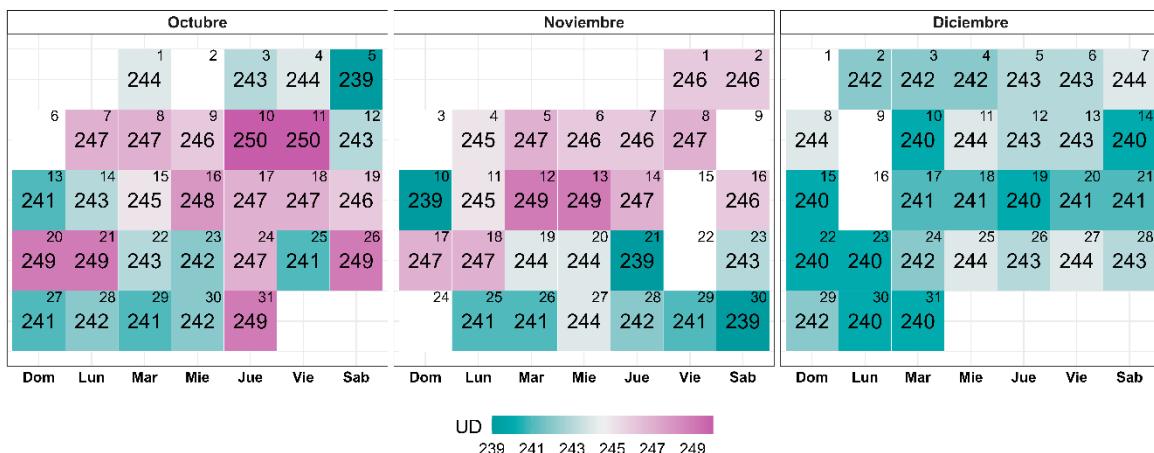
En la Figura N° 10 se presentan los promedios diarios de la CTO en Unidades Dobson (UD) detallados en un calendario correspondiente al cuarto trimestre del 2024. De esta manera, en octubre se observa que los valores mínimos y máximos de la CTO varían entre 239 UD (día 5) y 250 UD (día 10 y 11). Para noviembre, los valores oscilaron entre 239 UD (día 10, 21 y 30) y 249 UD (día 12 y 13) y para diciembre, entre 240 UD (día 10, 14, 15, 19, 22, 23, 30 y 31) y 244 UD (día 7, 8, 11, 25 y 27). 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^{8, 9, 10}.

⁸ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DEL OZONO ATMOSFÉRICO EN EL OBSERVATORIO DE VIGILANCIA ATMOSFÉRICA MARCAPOMACOCHA, OCTUBRE, 2024 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03203SENA-138.pdf>)

⁹ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DEL OZONO ATMOSFÉRICO EN EL OBSERVATORIO DE VIGILANCIA ATMOSFÉRICA MARCAPOMACOCHA, NOVIEMBRE, 2024 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03203SENA-139.pdf>)

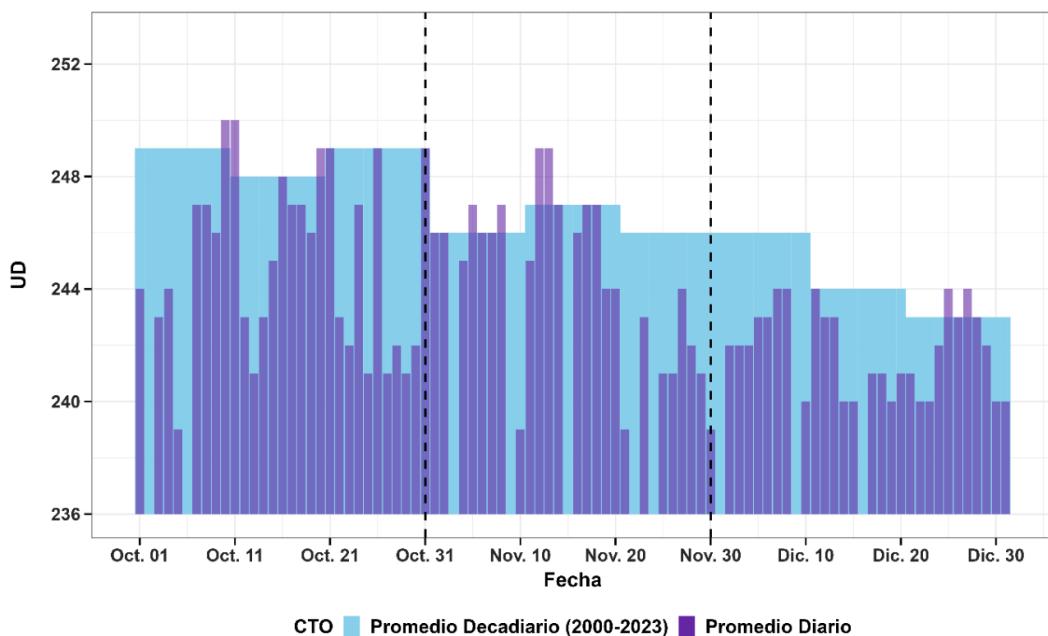
¹⁰ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DEL OZONO ATMOSFÉRICO EN EL OBSERVATORIO DE VIGILANCIA ATMOSFÉRICA MARCAPOMACOCHA, DICIEMBRE, 2024 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03203SENA-140.pdf>)

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- 2023 (Ver Figura N°11). En ese sentido, se evidencia que la mayoría de los valores diarios estuvieron por debajo de su promedio decadiario como puede observarse en la tercera decadiaria de noviembre, así como en la primera y segunda decadiaria de diciembre. Con respecto a las excedencias, se evidencia que los mayores incrementos con respecto a la normal decadiaria, se encuentran en la segunda decadiaria de octubre (día 11) y la segunda decadiaria de noviembre (día 12 y 13). En general, se observa una tendencia a la disminución hacia el mes de diciembre, ello acorde con el comportamiento estacional de esta variable, la cual alcanza su pico máximo en el mes de setiembre y comienza a descender los siguientes meses.

Figura N° 11 Variación de promedios diarios de la CTO



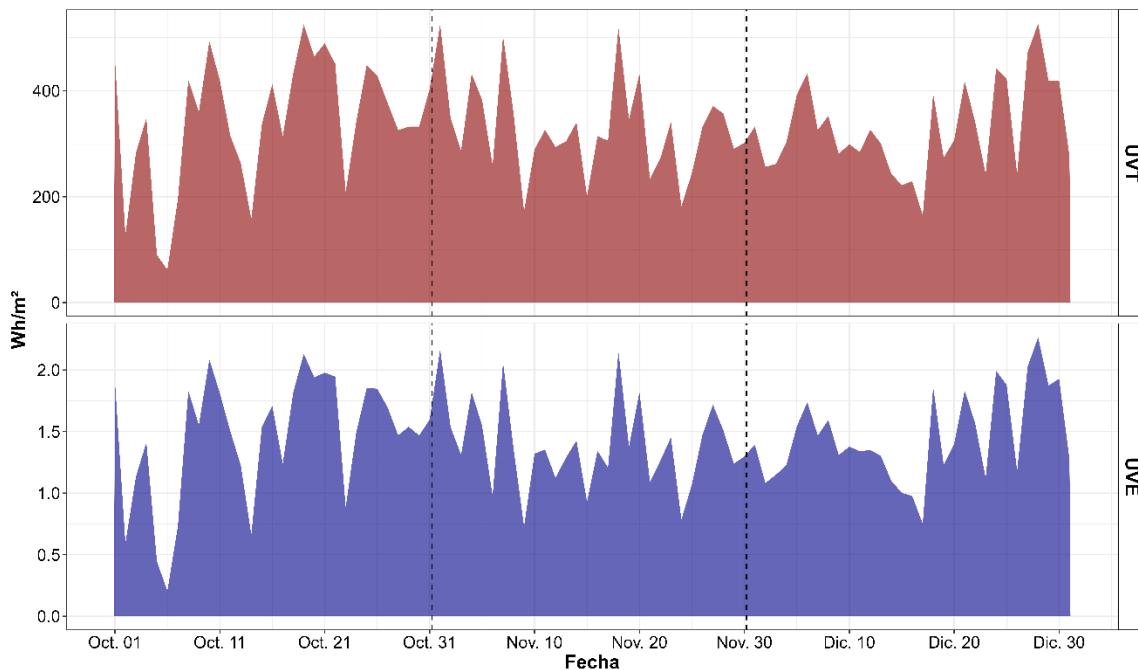
5.2 ÁREA FOCAL DE RADIACIÓN

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 llegar a la superficie terrestre.¹¹ 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.

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 cuarto trimestre de 2024. Durante el mes de octubre, se observaron valores acumulados entre 0.2 y 2.1 Wh/m² para el UVE y entre 62.3 y 525.2 Wh/m² para el UVE. Con respecto a noviembre, se encontraron entre 0.7 y 2.2 Wh/m² para el UVE y entre 172.9 y 525.8 Wh/m² para el UVE. Por su parte, diciembre presentó oscilaciones del UVE entre 0.8 y 2.3 Wh/m²; y del UVT entre 164.7 y 526.9 Wh/m². En general, el mayor valor de la UVE y la UVT se encontró en la tercera decadiaria de diciembre (día 28); mientras que, el menor valor en la primera decadiaria de octubre (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

¹¹ Organización Mundial de la Salud, 2003.

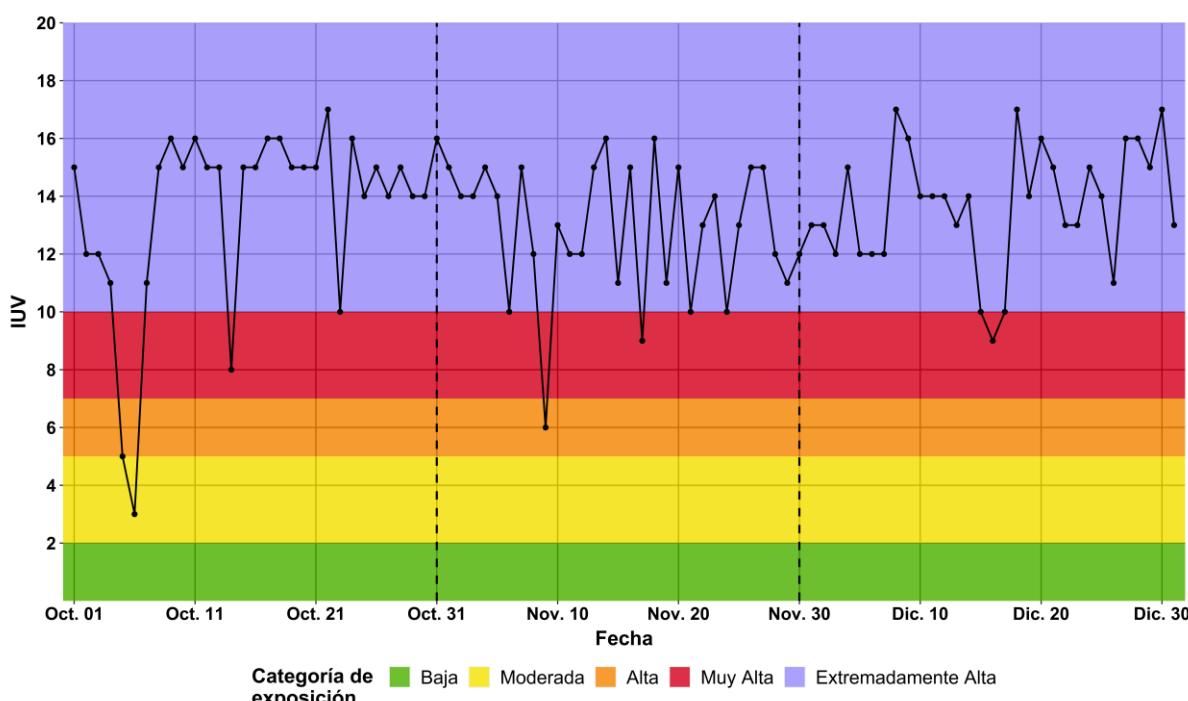
una comprensión integral de los efectos de la radiación UV y para la implementación de medidas adecuadas de protección y mitigación.

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. 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.

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 octubre, estos valores oscilaron entre 3 y 17; para noviembre, entre 6 y 16; y para diciembre, entre 9 y 17. Los valores altos del IUV presentados principalmente en diciembre tienen una tendencia al incremento, ello debido al inicio del verano en el hemisferio sur.

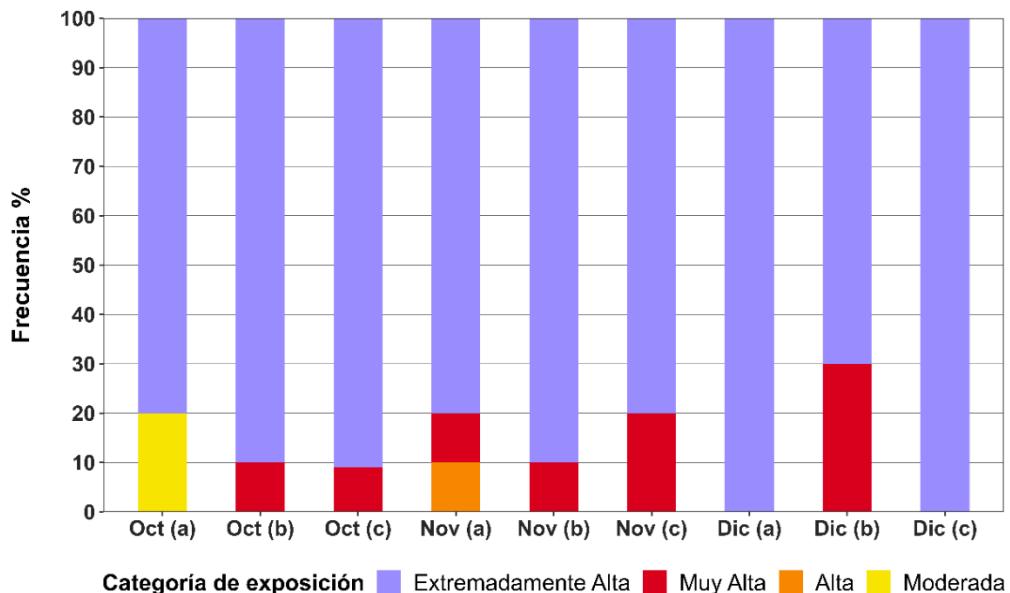
Figura N° 13 Variación de los valores máximos diarios del IUV



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 Marcapomacocha durante la decadiaria primera (a), segunda (b) y tercera (c) de los meses de octubre, noviembre y diciembre. Durante el cuarto trimestre se evidencia una predominancia en la ocurrencia de la categoría de exposición Extremadamente Alta (por lo menos un 80%). En ese sentido, para la primera y tercera decadiaria de diciembre 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^{12, 13, 14}.

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 segunda decadiaria de octubre (día 22) y la primera decadiaria de diciembre (día 5 y 6).

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 primera decadiaria de octubre (día 5 y 6) y la segunda decadiaria de diciembre (día 18).

5.3 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.

¹² BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DE LA VIGILANCIA DE RADIACIÓN UV-B EN CIUDADES DEL PAÍS, OCTUBRE, 2024 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03202SENA-107.pdf>)

¹³ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DE LA VIGILANCIA DE RADIACIÓN UV-B EN CIUDADES DEL PAÍS, NOVIEMBRE, 2024 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03202SENA-108.pdf>)

¹⁴ BOLETÍN MENSUAL VIGILANCIA DE LA VIGILANCIA DE RADIACIÓN UV-B EN CIUDADES DEL PAÍS, DICIEMBRE, 2024 (<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03202SENA-109.pdf>)

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:

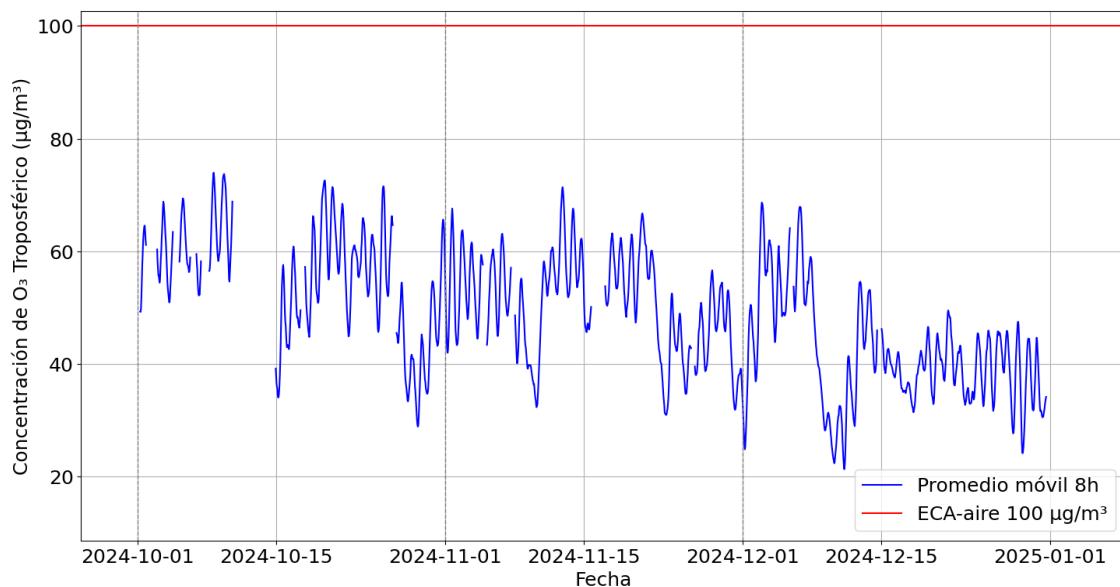
A. OZONO TROPOSFÉRICO (O₃)

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.¹⁵ 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.¹⁶

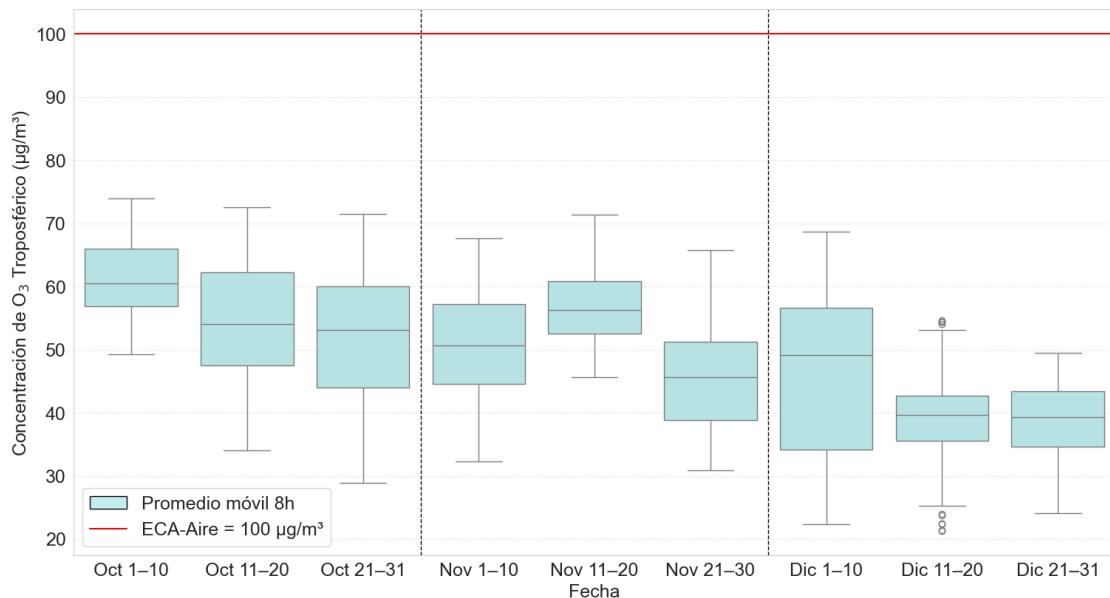
La Figura N° 16 presenta la evolución temporal de O₃ troposférico, expresada en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), durante el cuarto trimestre de 2024. Los valores corresponden a promedios móviles de 8 horas, empleado para su comparación con el Estándar de Calidad Ambiental para Aire (ECA-aire), establecido en 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En ese sentido, los valores máximos registrados para los meses de octubre, noviembre y diciembre fueron 74 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (día 8), 71.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (día 12) y 68.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (día 2), respectivamente. En consecuencia, los valores de O₃ troposférico del trimestre se encontraron por debajo de su ECA-aire.

¹⁵ Ground-level Ozone Basics. Obtenido de: <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics>

¹⁶ 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>

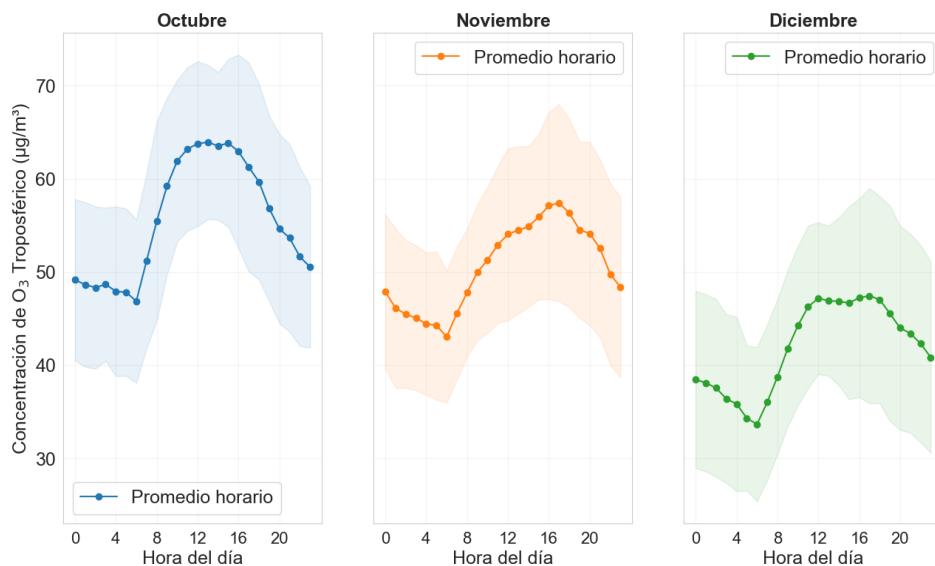
Figura N° 16 Comportamiento del O₃ troposférico durante el cuarto trimestre (promedio móvil de 8h)

En cuanto al análisis por decadiaria de los promedios móviles de 8 horas del O₃ troposférico (ver Figura N°17), se observa una mayor variabilidad de las concentraciones para la primera decadiaria del mes de diciembre. Asimismo, los valores más altos se encontraron en la primera y segunda decadiaria de octubre. En términos generales, se observa una tendencia a la disminución hacia finales del trimestre, lo cual es consistente con la variabilidad estacional del contaminante caracterizada por concentraciones que comienzan a disminuir conforme se acerca el verano debido a la formación de nubes y la ocurrencia más frecuente de precipitaciones.

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

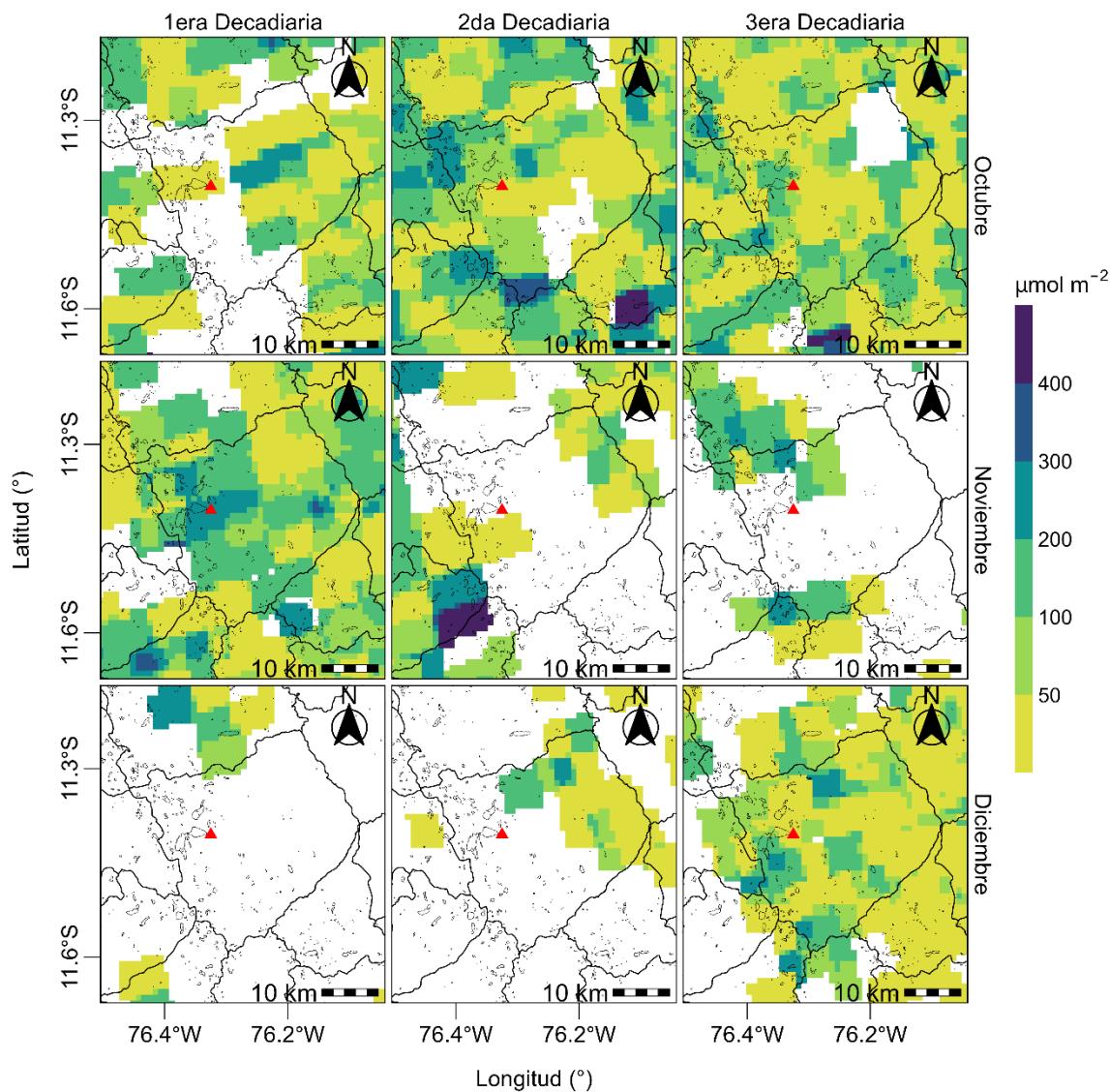
Respecto al ciclo horario de las concentraciones de O₃ troposférico (ver Figura N°18), se observa para cada mes del trimestre que, en promedio los menores valores se presentan durante las primeras horas de la mañana (alcanzando su valor más bajo a las 6:00 horas); mientras que los valores más altos se presentan entre las 12:00 a las 16:00 horas, lo que coincide una mayor incidencia de radiación solar. Asimismo, se destaca para octubre que, los promedios horarios se encontraron entre 46.9 y 63.9 µg/m³ y las desviaciones estándar entre 7.9 y 11.2 µg/m³. En cuanto al mes de noviembre, los promedios horarios oscilaron entre 43 y 57.4 µg/m³ y las desviaciones estándar entre 6.9 y 10.5 µg/m³. Por su parte, diciembre presentó un rango de promedios horarios entre 33.6 y 47.4 µg/m³ y las desviaciones estándar entre 7.7 y 11.5 µg/m³.

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



B. FORMALDEHIDO (HCHO)

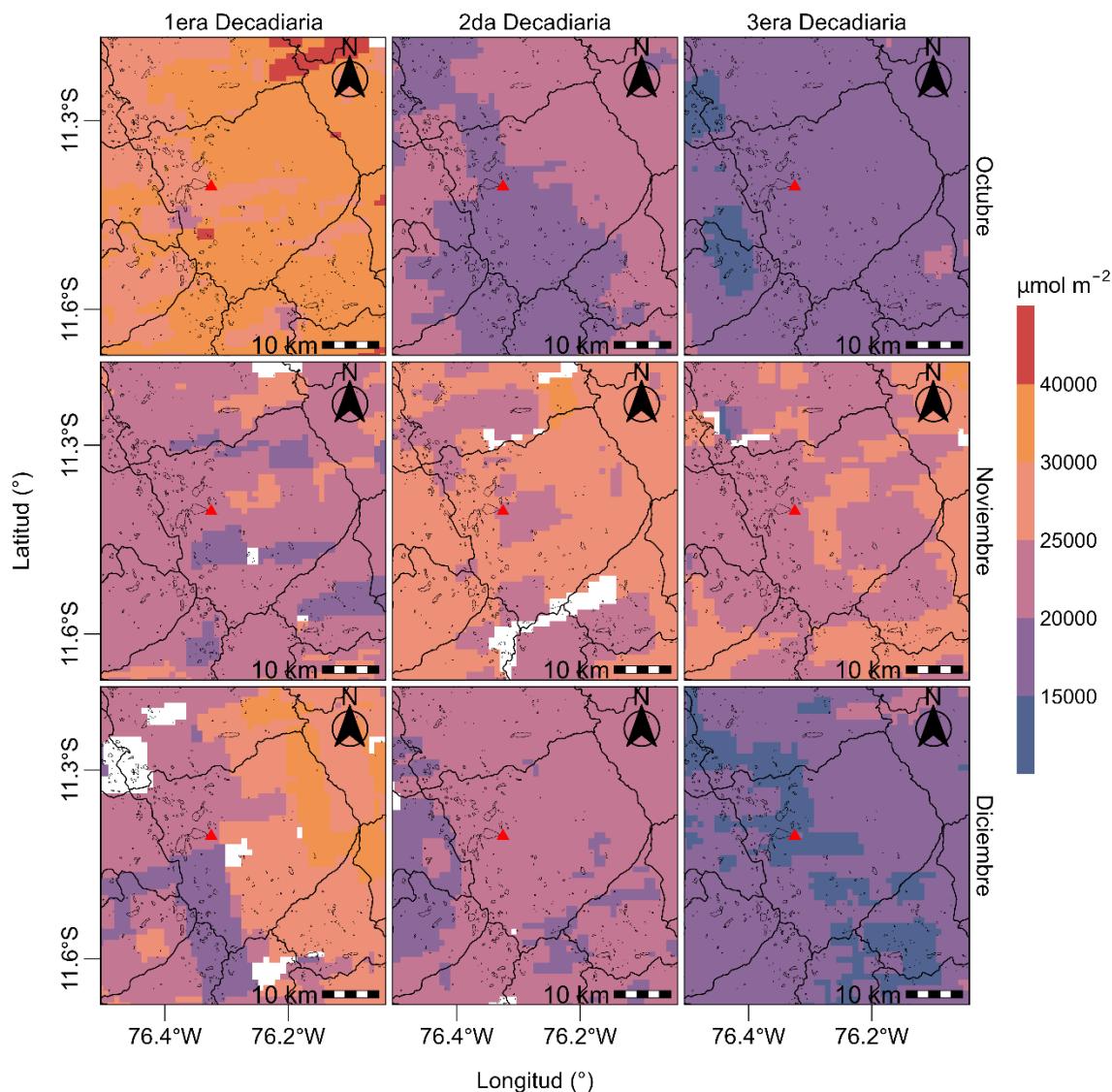
En relación a la variación espacial de la densidad de columna troposférica de HCHO para el distrito de Marcapomacocha, durante las decadiarias del cuarto trimestre (ver Figura N°19), se alcanzaron valores máximos de hasta 336.6 µmol/m² en la segunda decadiaria de octubre. En cuanto a los promedios areales, el mayor valor corresponde a la primera decadiaria de noviembre (106.3 µmol/m²) y, para la ubicación del OVA Marcapomacocha, se alcanzó el valor máximo de 254.2 µmol/m² en el mismo periodo. En general, se evidencia una tendencia a la disminución hacia finales del mes de diciembre, lo cual estaría asociado al cese de la ocurrencia de incendios forestales en la amazonía del Perú y países cercanos como Brasil y Bolivia.

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

C. MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

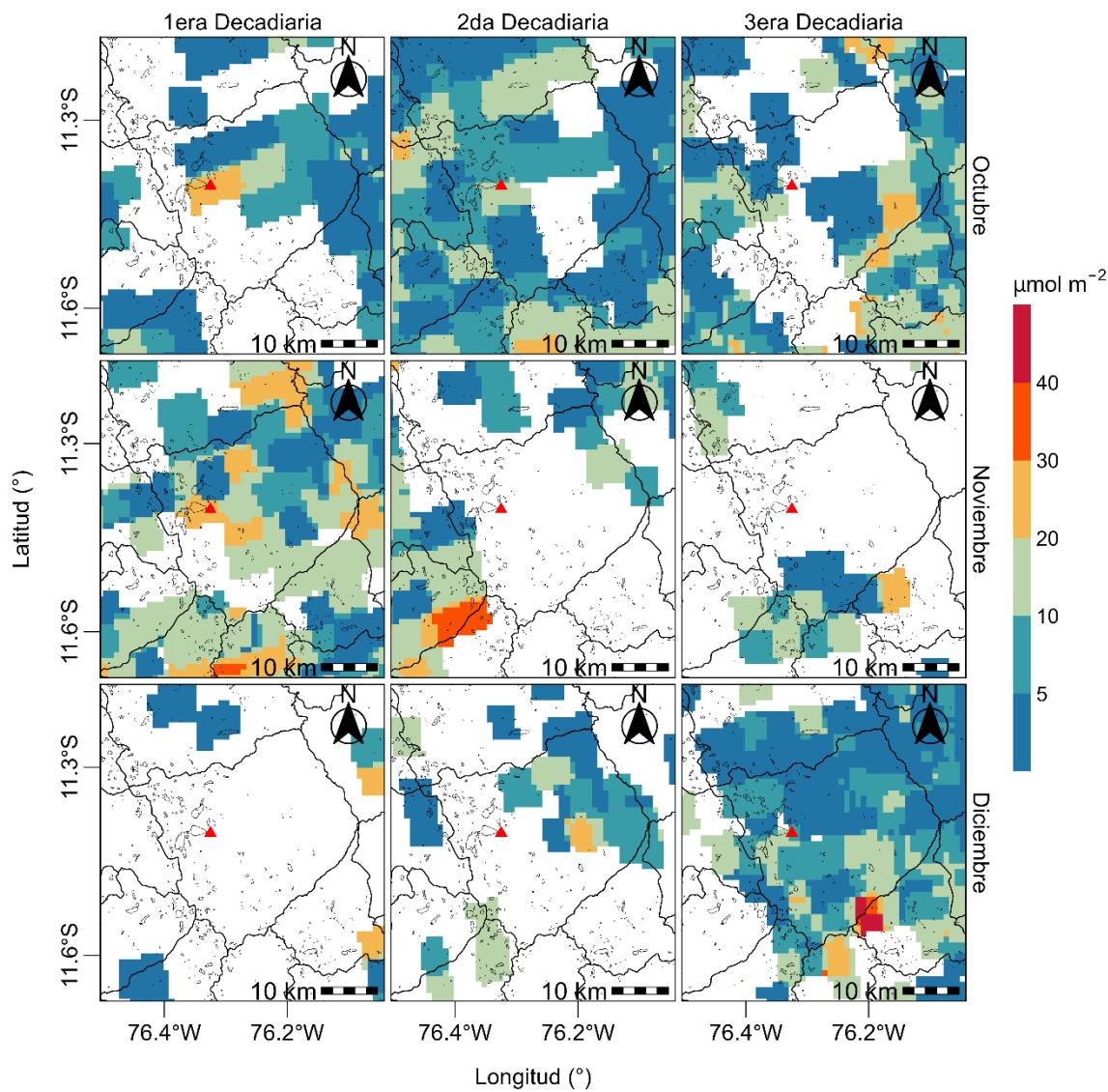
En relación a la variación espacial de la densidad de columna troposférica de CO para el distrito de Marcapomacocha, durante las decadiarias del cuarto trimestre (ver Figura N°20), se alcanzaron valores máximos de hasta $43458.5 \mu\text{mol/m}^2$ en la primera decadiaria de octubre. En cuanto a los promedios areales, el mayor valor corresponde a la primera decadiaria de octubre ($32642 \mu\text{mol/m}^2$) y, para la ubicación del OVA Marcapomacocha, se alcanzó el valor máximo de $30233.7 \mu\text{mol/m}^2$ en el mismo periodo. En general, se evidencia una tendencia a la disminución hacia finales del mes de diciembre, lo cual estaría asociado al cese de la ocurrencia de incendios forestales en la amazonía del Perú y países cercanos como Brasil y Bolivia.

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



D. DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO_2)

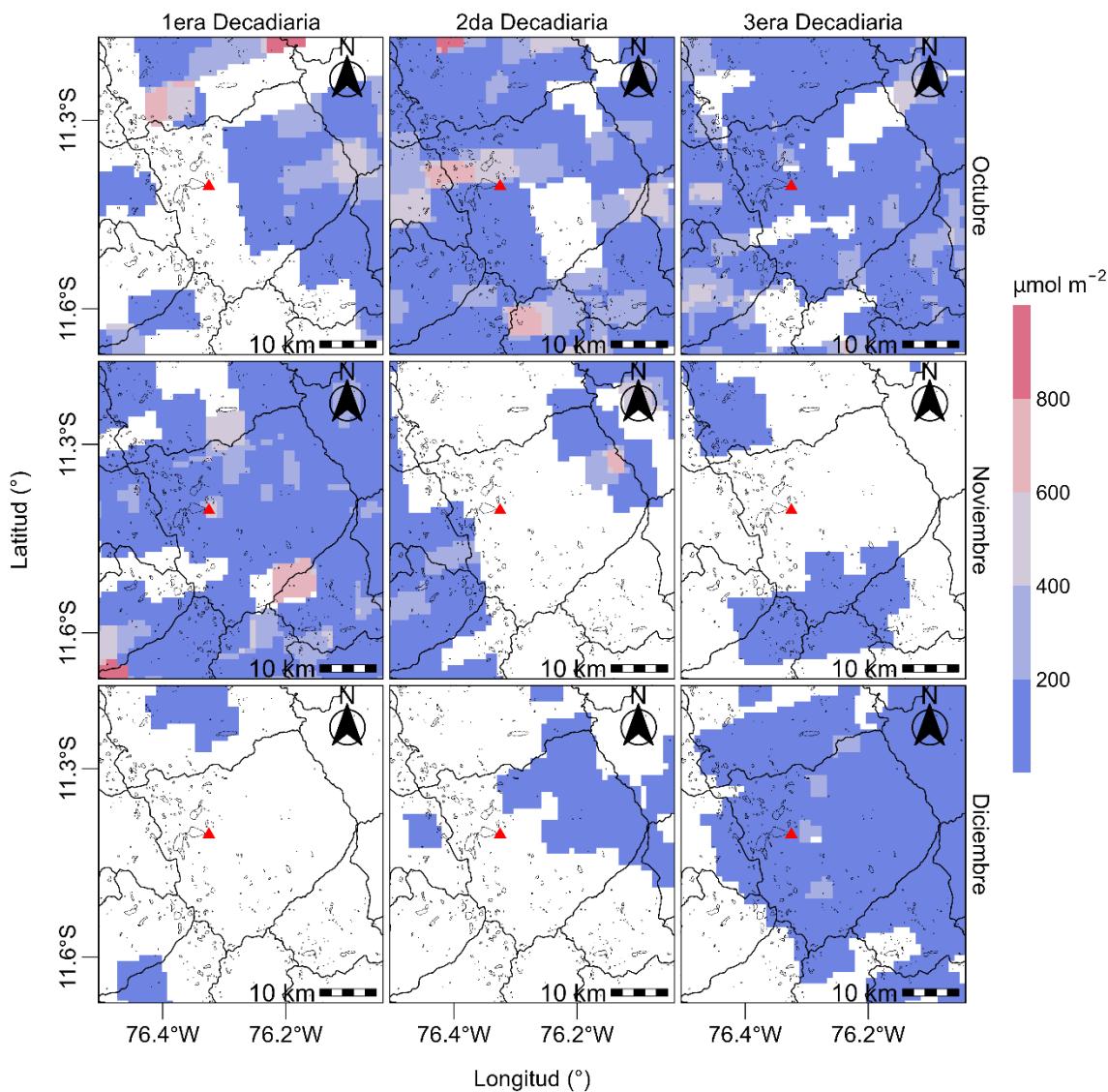
En relación a la variación espacial de la densidad de columna troposférica de NO_2 para el distrito de Marcapomacocha, durante las decadiarias del cuarto trimestre (ver Figura N°21), se alcanzaron valores máximos de hasta $29.9 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ en la tercera decadiaria de octubre. En cuanto a los promedios areales, el mayor valor corresponde a la primera decadiaria de noviembre ($11.1 \mu\text{mol}/\text{m}^2$) y, para la ubicación del OVA Marcapomacocha, se alcanzó el valor máximo de $24.5 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ en el mismo periodo. En general, se evidencia una tendencia a la disminución hacia finales del mes de diciembre, lo cual estaría asociado al cese de la ocurrencia de incendios forestales en la amazonía del Perú y países cercanos como Brasil y Bolivia.

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 para el distrito de Marcapomacocha, durante las decadiarias del cuarto trimestre (ver Figura N°21), se alcanzaron valores máximos de hasta 762.1 $\mu\text{mol/m}^2$ en la segunda decadiaria de octubre. En cuanto a los promedios areales, el mayor valor corresponde a la primera decadiaria de octubre (71.8 $\mu\text{mol/m}^2$) y, para la ubicación del OVA Marcapomacocha, se alcanzó el valor máximo de 409.6 $\mu\text{mol/m}^2$ en la primera decadiaria de noviembre. En general, se evidencia una tendencia a la disminución hacia finales del mes de diciembre, lo cual estaría asociado al cese de la ocurrencia de incendios forestales en la amazonía del Perú y países cercanos como Brasil y Bolivia.

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). Los ICAs son valores que permiten informar el estado de la calidad del aire, permitiendo a la población conocer que tan limpio o saludable está el aire y los efectos que podría causar en la salud.¹⁷

La Figura N° 30 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 octubre se presentó 19 días con una calidad del aire "Buena" y 9 días con una calidad del aire "Moderada". Para el mes de noviembre, se presentó 26 días una calidad del aire "Buena" y 3 días con una calidad del aire "Moderada". Finalmente, en el mes de diciembre se presentó 28 días una calidad del aire "Buena" y 3 días con una calidad del aire "Moderada".

¹⁷ Air Quality Index. A guide to Air Quality and Your Health. Obtenido de: https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/ajl_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		Buena		0	
0.055		Moderada		51	
0.071		Insalubre para grupos sensibles		101	
0.086		Insalubre		151	
0.105				200	

5.4 DEPOSICIÓN ATMOSFÉRICA TOTAL

Durante el cuarto trimestre del año 2024, 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-001¹⁸.

Figura N° 24 Muestreador de deposición atmosférica



¹⁸ 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 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 4.4¹⁹, mientras que, para la conductividad eléctrica, valores superiores a 20 µS/cm ²⁰ indican también la presencia de lluvia ácida.

Cuadro N°1 Resultados del muestreo de deposición atmosférica húmeda

Número de muestra	Periodo de muestreo		Variables	
	Inicio	Fin	Potencial de Hidrógeno (pH)	Conductividad (µS/cm)
1	24/09/2024	01/10/2024	7.9	18.3
2	01/10/2024	08/10/2024		
3	08/10/2024	15/10/2024	8.9	13.2
4	15/10/2024	22/10/2024		
5	22/10/2024	29/10/2024	7.3	13.8
6	29/10/2024	05/11/2024	8.3	15.7
7	05/11/2024	12/11/2024	7.4	15.5
8	12/11/2024	19/11/2024	7.3	13.2
9	19/11/2024	26/11/2024	8.6	6.8
10	26/11/2024	03/12/2024	8.5	7.9
11	03/12/2024	10/12/2024	7.5	13.1
12	10/12/2024	17/12/2024	6.4	12.5
13	17/12/2024	24/12/2024	8.5	12.7
14	24/12/2024	31/12/2024	8.1	7.6
Valor mínimo		6.4	6.8	
Valor máximo		8.9	18.3	
Valor promedio		7.9	12.5	

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 6.4 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).

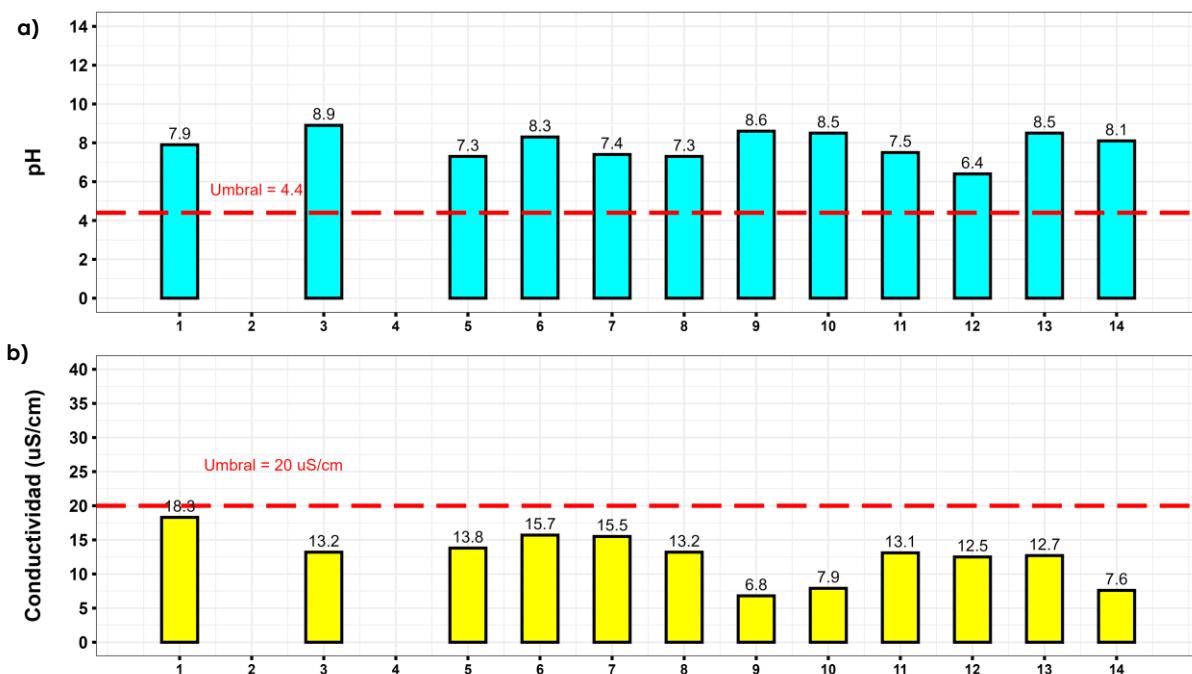
Respecto a la conductividad eléctrica de la deposición atmosférica húmeda, en el Cuadro N°1 y la Figura N°25b, se muestran los registros, donde los valores mínimo y máximo fueron 6.8 y 18.3, respectivamente. Asimismo, se observa que no se registraron valores por encima del umbral de lluvia ácida (20 µS/cm).

¹⁹ Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (<https://www.epa.gov/acidrain/what-acid-rain>)

²⁰ Antolínez, A. y Díaz, C. (2003) Lluvia Ácida en la zona norte de Bogotá.

Cabe precisar, que los períodos de muestreo que no presentan datos se deben a la ausencia de precipitación o que la cantidad de muestra fue insuficiente para el análisis.

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



5.5 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 aerosoles 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).

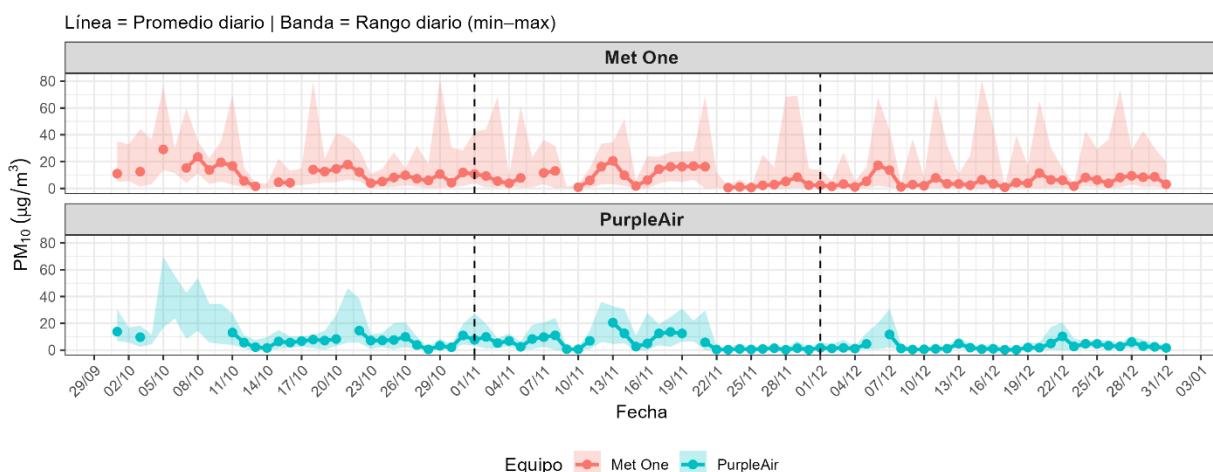
A. CONCENTRACIONES EN MASA

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 PARA EL PM₁₀

En la Figura N° 27 se observa el comportamiento diario de las concentraciones en masa de PM₁₀ durante los meses de octubre, noviembre y diciembre. Se pudo destacar que se alcanzaron promedios diarios de hasta 29.1 µg/m³ (sábado 5 de octubre, las concentraciones más altas se registraron entre las 10:00 y 12:00 horas) según el perfilador de partículas METONE – 412. En el caso del monitor PurpleAir, el día 5 de octubre no se contó con el número mínimo de registros horarios requerido para el cálculo del promedio diario, conforme a lo establecido en el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire (Decreto Supremo N° 010-2019-MINAM). No obstante, se observó que en dicha fecha se registró el valor horario más alto de todo el trimestre, alcanzándose una concentración máxima de 69,7 µg/m³ a las 09:00 horas. En general, se observa que, ambos equipos (METONE – 412 y PurpleAir) coinciden que hubo valores más elevados durante el mes de octubre.

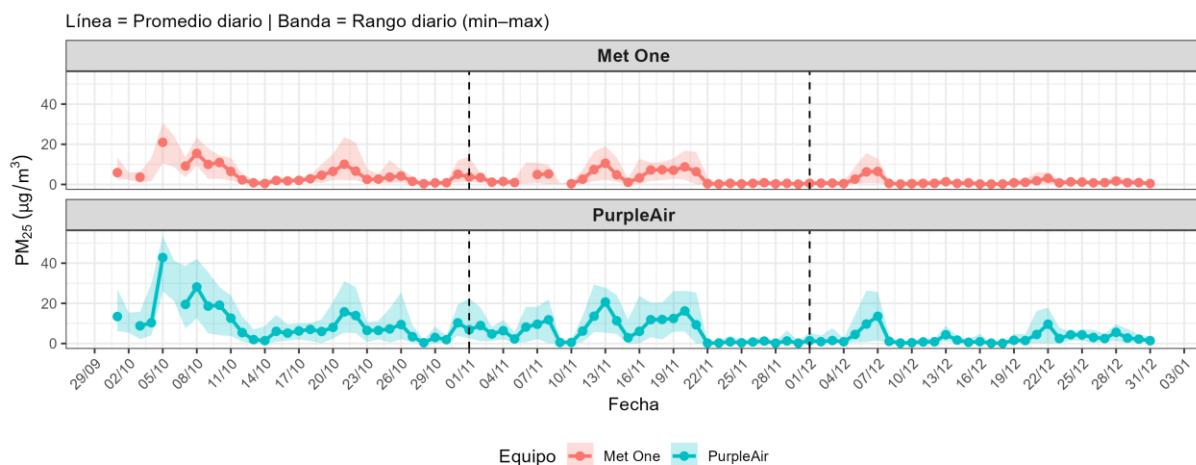
Figura N° 27 Variación diaria de PM₁₀



A.2. CONCENTRACIÓN EN MASA PARA EL PM_{2,5}

En la Figura N° 28, se observa el comportamiento diario de las concentraciones en masa del PM_{2,5} durante los meses de octubre, noviembre y diciembre. Se pudo destacar que se alcanzaron promedios diarios de hasta 21 µg/m³ (sábado 5 de octubre) según el perfilador de partículas METONE – 412. De igual manera, según los registros de los sensores PurpleAir se alcanzó el promedio diario más alto de 42.8 µg/m³ (sábado 5 de octubre). En ambos equipos, las mayores concentraciones se registraron entre las 09:00 y 12:00 horas, así como entre las 17:00 y 18:00 horas. En general, se observa que ambos equipos presentaron las mayores concentraciones durante el mes de octubre.

Figura N° 28 Variación 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 incendios forestales, los cuales tuvieron mayor intensidad durante el mes de septiembre, tanto en el territorio nacional como en otras regiones de Sudamérica (transporte transfronterizo).

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^{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 ($0,7 \mu\text{m} \leq d$

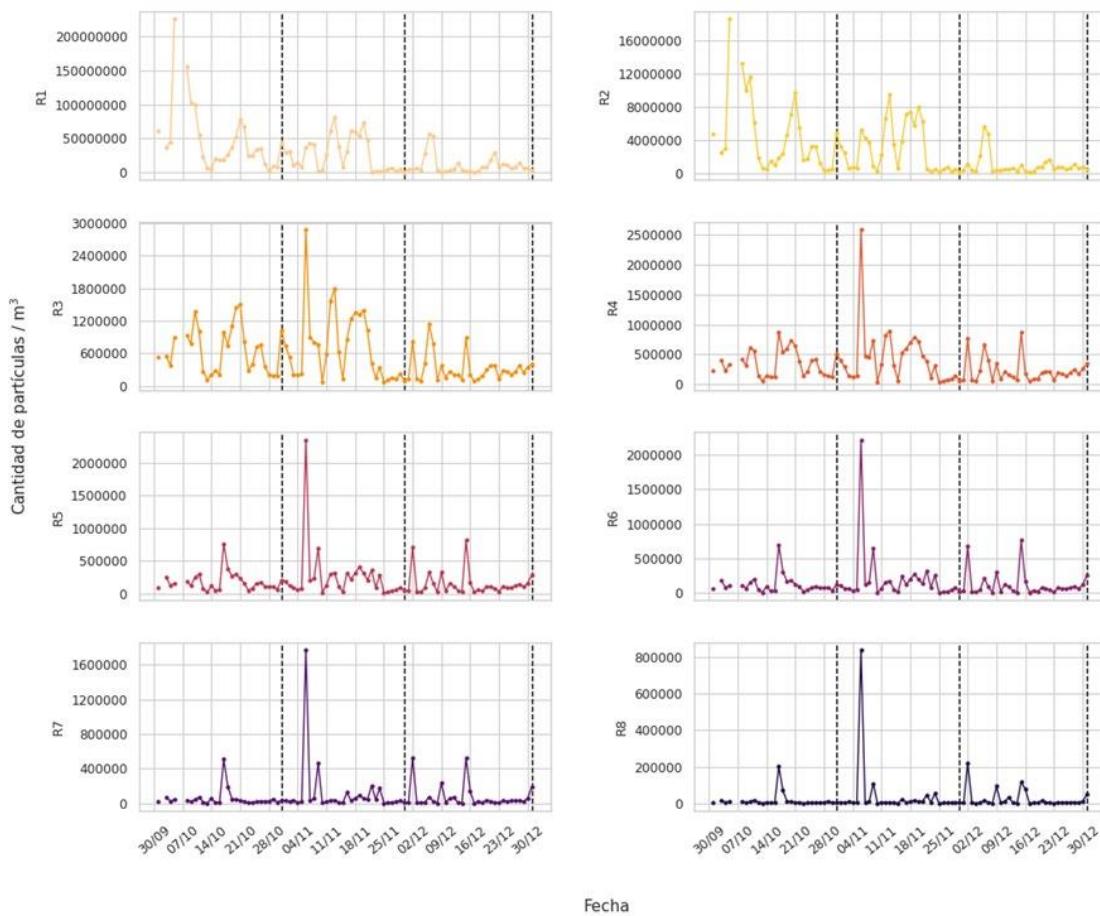
²¹ [...] Dado que la concentración de masa de las partículas ultrafinas es insignificante en comparación con la de las partículas de mayor tamaño, parece más adecuado correlacionar su concentración numérica con los efectos sobre la salud en lugar de su concentración de masa [...]. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231097002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

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).

$< 1,0 \mu\text{m}$), 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 Concentración en número de aerosol



Durante el cuarto trimestre (ver Figura N°29), las mayores concentraciones promedio diarias en número de partículas se observaron en el rango R1 y R2, alcanzando un máximo de 225431516 y 18567425 partículas/m³ el 5 de octubre. Por otro lado, los rangos R3, R4, R5, R6, R7 y R8 registraron valores máximos de 2881266, 2586903, 2350451, 2217073, 1770938 y 838554 partículas/m³ respectivamente para el 6 de noviembre.

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.

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

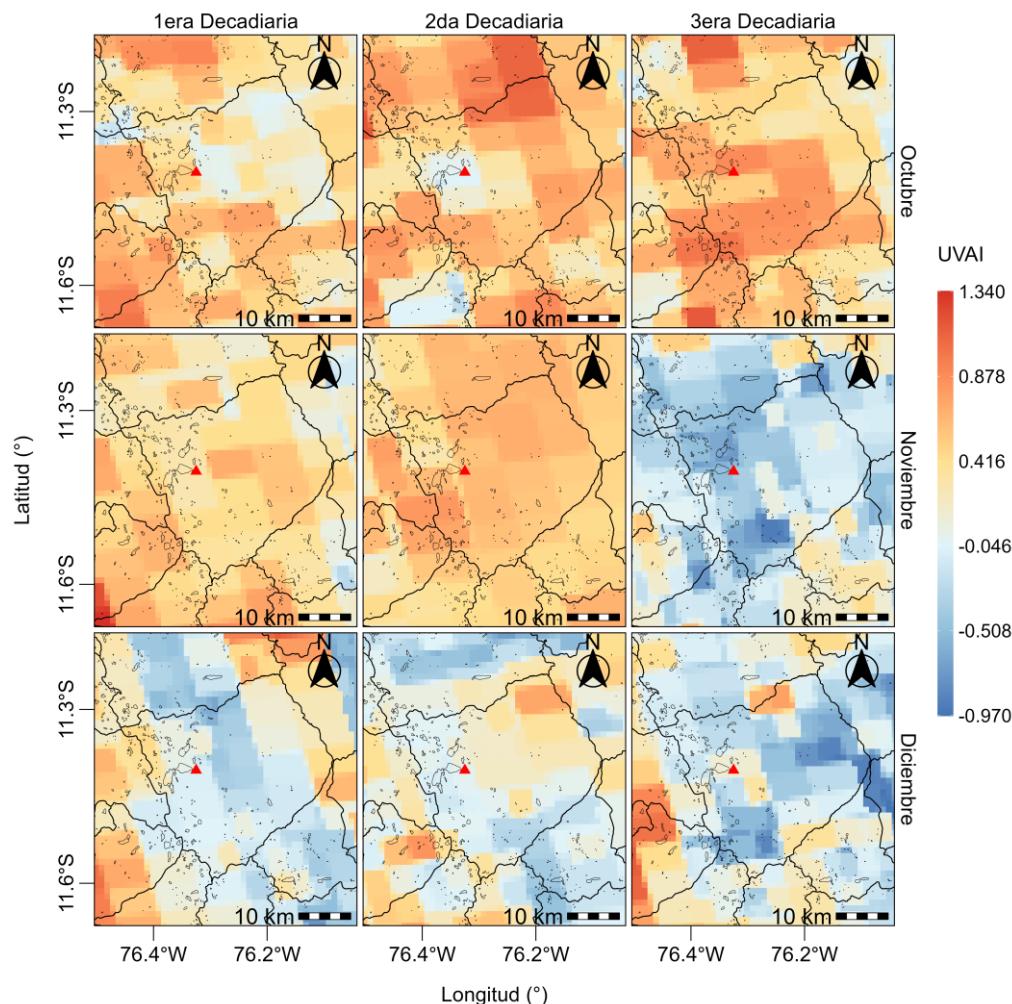
C. INDICE UV DE AEROSOLES

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 cuarto trimestre para el distrito de Marcapomacocha (ver Figura N° 30), se observó que se alcanzaron valores máximos de hasta 1.09 en la segunda decadiaria de octubre, 0.82 en la segunda decadiaria de noviembre y 0.77 en la tercera decadiaria de diciembre. Asimismo, el promedio areal, indica que el mayor valor corresponde a la tercera decadiaria de octubre (0.63) seguido de la segunda decadiaria de noviembre (0.60). En general, para la ubicación del OVA Marcapomacocha, durante inicios del trimestre predominaron valores positivos con una tendencia a la disminución, cuyo valor máximo se alcanzó en la tercera decadiaria del mes de octubre (0.88). Dichos valores estarían asociados a la disminución 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 AEROSOLES

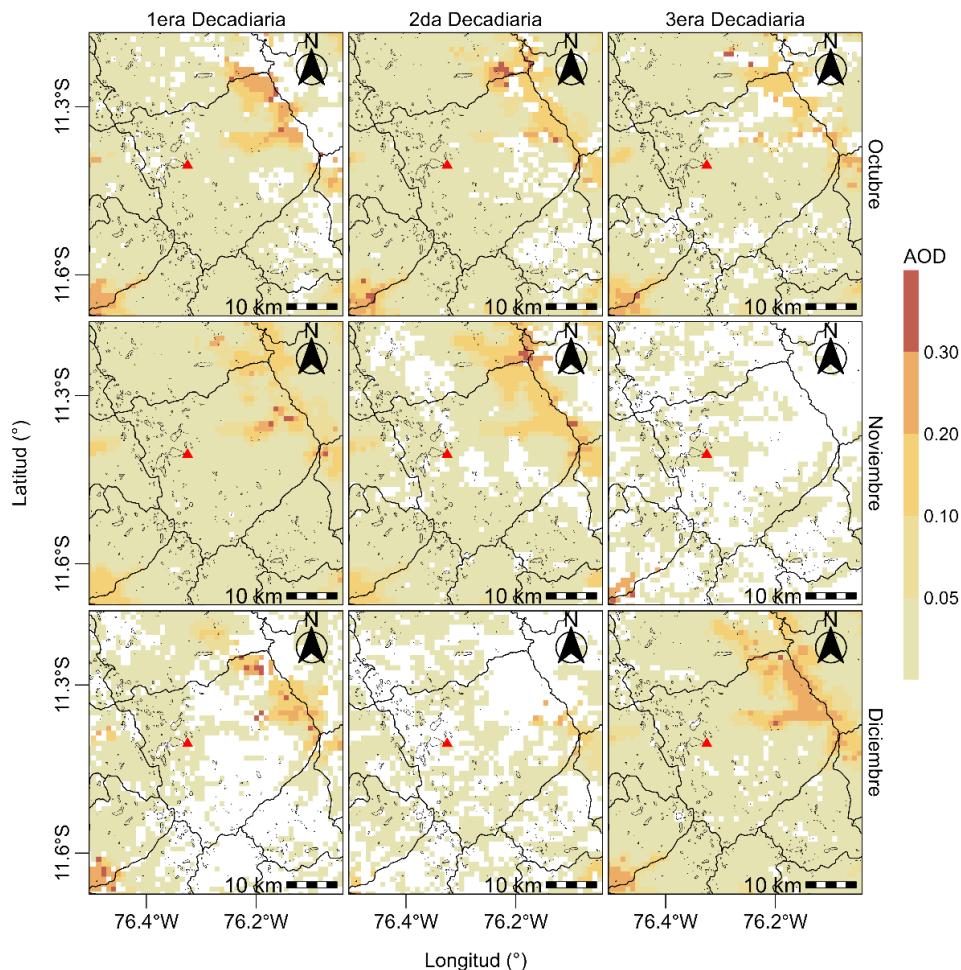
La profundidad óptica de aerosoles (AOD por sus siglas en inglés), es una medida de cuánto reducen las partículas en el aire el paso de la luz a través de la atmósfera. Los aerosoles absorben y dispersan la luz solar entrante, reduciendo así la visibilidad y aumentando la carga óptica. En términos generales, un AOD inferior a 0.1 indica un cielo cristalino con máxima visibilidad, mientras que valores cercanos a 1 indican 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 tercer trimestre para el distrito de Marcapomacocha (ver Figura N° 31), se observó que se alcanzaron valores máximos de hasta 0.434 en la segunda decadiaria de octubre. Asimismo, el promedio areal, indica que la decadiaria con el mayor valor corresponde a la primera decadiaria de octubre (0.04) y en la primera decadiaria de diciembre (0.05). En general, se presenta una tendencia a la disminución hacia fines de septiembre, lo cual estaría asociado a la disminución

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

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

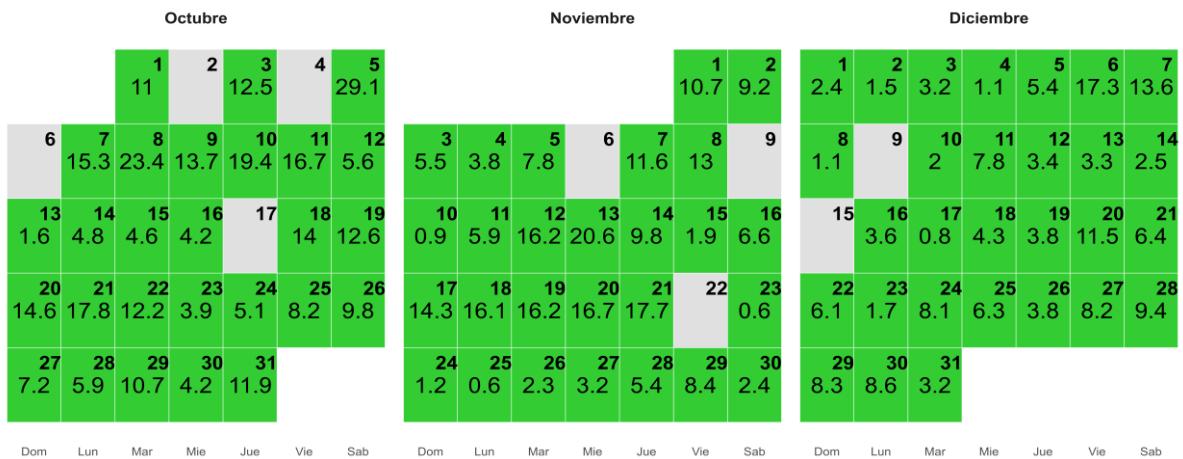
La estimación del índice de calidad del aire (ICA) por material particulado ²⁸ consideró los promedios diarios de los valores de concentración en masa registrados por el METONE – 412.

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 durante el mes de octubre se presentó 27 días una calidad del aire “Buena”, durante el mes de noviembre se presentó 28 días una calidad del aire “Buena” y finalmente en el mes de diciembre se presentó 29 días 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

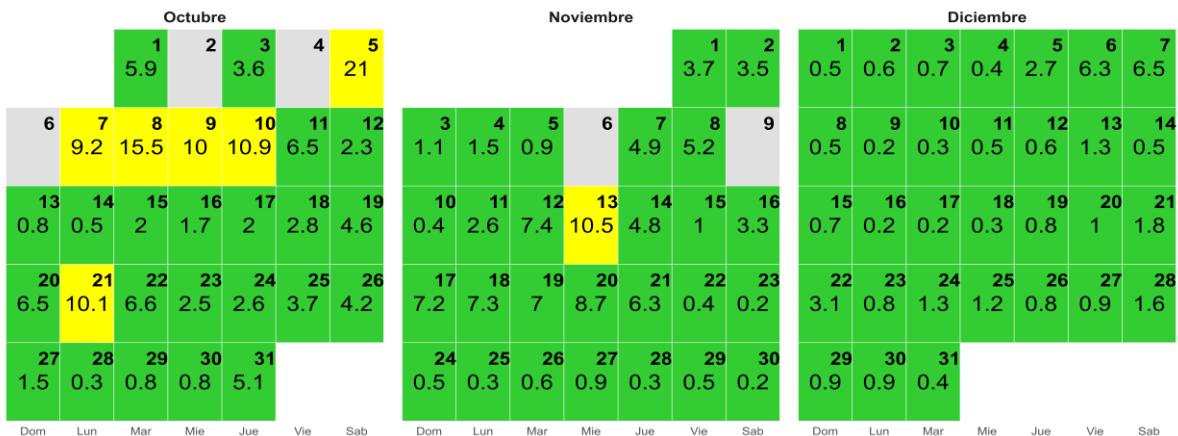


Concentración PM ₁₀ (µg/m ³)		Estado		Índice de Calidad del Aire - EPA	
0		54		Buena	
55		154		Moderada	
155		254		Insalubre para grupos sensibles	
255		354		Insalubre	

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 el mes de octubre se presentó 6 días una calidad del aire "Moderada" y 22 días con calidad del aire "Buena". Durante el mes de noviembre se presentó 1 día con una calidad del aire "Moderada" y 27 días una calidad del aire "Buena". Finalmente, en el mes de diciembre se presentó 31 días una calidad del aire "Buena".

Figura N° 33 Estados de calidad del aire para PM_{2,5}



Concentración PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		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

5.6 ÁREA FOCAL DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Durante el cuarto trimestre del 2024, se inició con la vigilancia de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el OVA Marcapomacocha mediante la instalación y uso de un 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 (ver Figura N° 35).

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



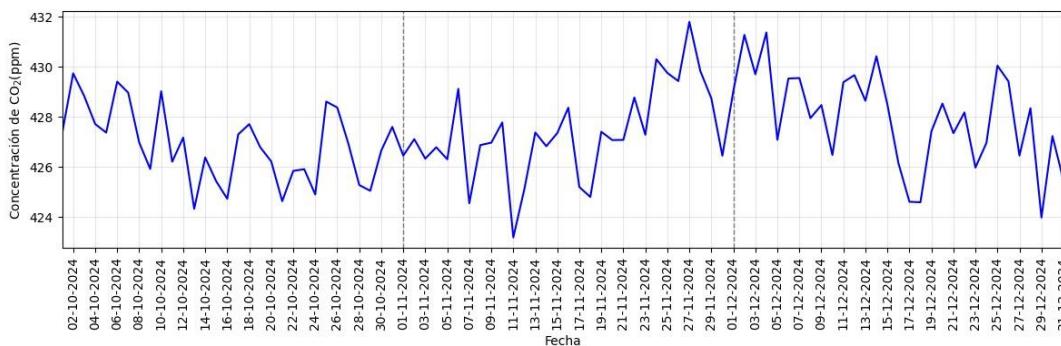
A. DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)

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.²⁹

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.³⁰ 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.³¹

La Figura N° 36 muestra la evolución del promedio diario de CO₂ durante el cuarto trimestre, donde se destaca que los valores más altos se encontraron en la tercera decadiaria de noviembre (día 27 - 431.8 ppm) y primera decadiaria de diciembre (día 4 – 431.5 ppm). Por otro lado, los valores más bajos se encontraron en la segunda decadiaria de noviembre (día 11 – 423.2 ppm) y tercera decadiaria de diciembre (día 29 – 423.9 ppm).

Figura N° 36 Evolución del promedio diario de CO₂ durante el cuarto 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 06:00 horas; mientras que entre las 09:00 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. Asimismo, se

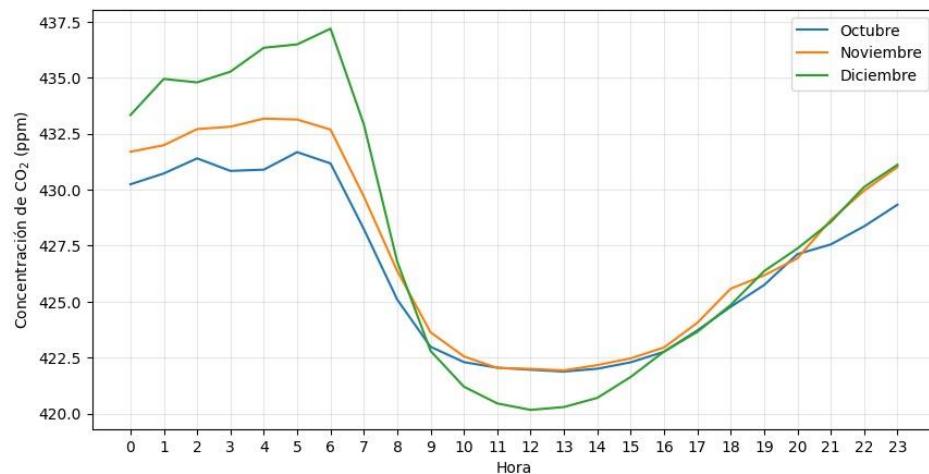
²⁹ WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 20. Obtenido de: <https://library.wmo.int/records/item/69057-no-20-28-october-2024>

³⁰ Dióxido de carbono. Obtenido de: <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/dioxido-de-carbono/>

³¹ Emisiones de dióxido de carbono. Obtenido de: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-dioxido-de-carbono>

puede apreciar que para el trimestre, tanto los valores más bajos y más altos, se alcanzaron en el mes de diciembre. El ciclo horario promedio del mes de octubre osciló aproximadamente entre 422.5 a 432.4 ppm, para noviembre entre 422.5 a 432.6 ppm y para diciembre entre 420 a 437.5 ppm.

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



B. METANO (CH₄)

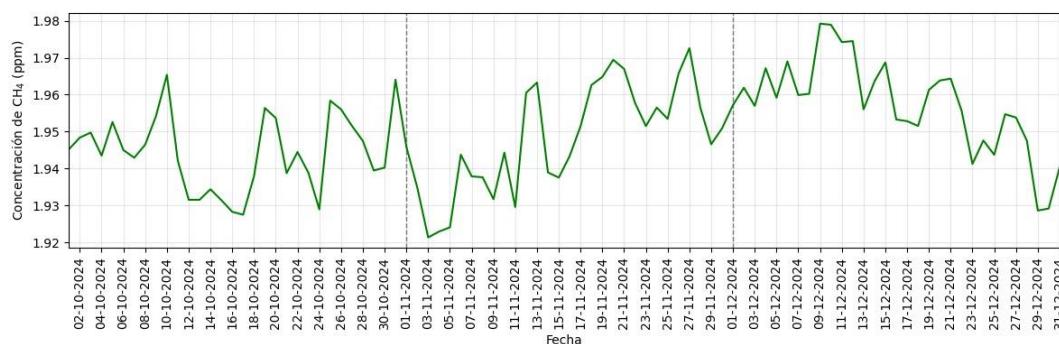
El CH₄ es un gas de efecto invernadero que contribuye con aproximadamente el 16% del forzamiento radiativo producido por estos gases de larga vida. Asimismo, alrededor del 40% del metano se emite a la atmósfera proviene de fuentes naturales (por ejemplo, humedales y descomposición por termitas), y alrededor del 60% proviene de fuentes antropogénicas (por ejemplo, rumiantes, agricultura del arroz, explotación de combustibles fósiles, vertederos, aguas residuales y quema de biomasa).³²

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.³³

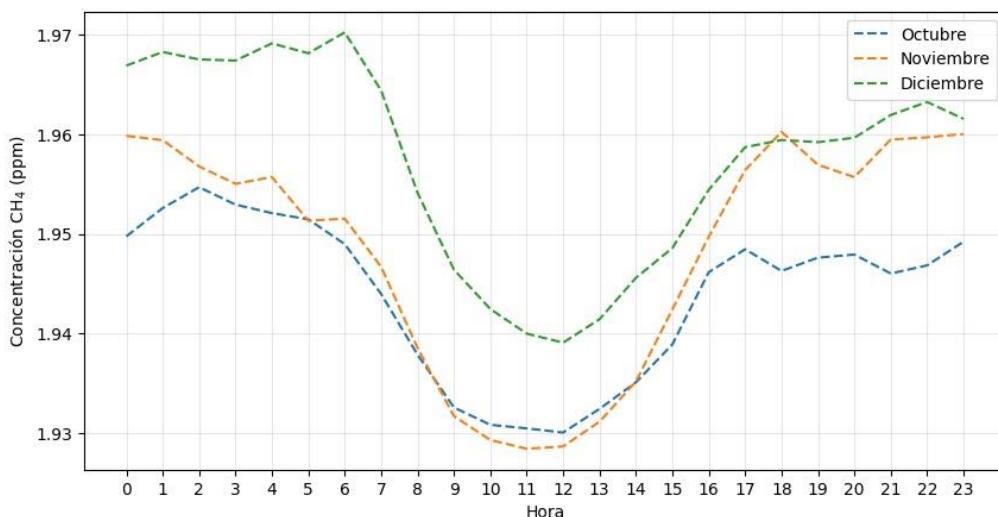
La Figura N° 38 muestra la evolución del promedio diario de CH₄ durante el cuarto trimestre, donde se destaca que los valores más altos se encontraron en la primera decadiaria de diciembre (día 9 – 1.979 ppm y día 10 – 1.978 ppm). Por otro lado, los valores más bajos se encontraron en la primera decadiaria de noviembre (día 3 – 1.921 ppm y día 4 – 1.922 ppm).

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

³³ Metano. Obtenido de: <https://ciencia.nasa.gov/cambio-climatico/metano/>

Figura N° 38 Evolución del promedio diario de CH₄ durante el cuarto 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 partir de las 17:00 horas y persisten durante el horario nocturno, alcanzando los mayores valores entre las 22:00 horas a 06:00 horas; mientras que entre las 09:00 a 12:00 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. Asimismo, se puede apreciar que para el trimestre los valores más bajos se alcanzaron en el mes de noviembre; mientras que los más altos en el mes de diciembre. El ciclo horario promedio del mes de octubre osciló aproximadamente entre 1.93 a 1.955 ppm, para noviembre entre 1.926 a 1.96 ppm y para diciembre entre 1.939 a 1.97 ppm.

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

VI. CONCLUSIONES

- Durante el cuarto 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 Noroeste (NO).
- En cuanto a las condiciones meteorológicas locales, los vientos mostraron intensidades extremas y fuertes en los horarios matutino y vespertino para casi todo el trimestre. Por su parte, la precipitación presentó una tendencia a incrementarse hacia septiembre, al igual que la humedad relativa y respecto a la temperatura se presentaron máximos diarios más bajos hacia finales de diciembre.
- Durante el mes de octubre se tuvo la mayor ocurrencia y potencia radiativa de focos de calor del cuarto trimestre de 2024 con una tendencia a la disminución hacia el mes de diciembre, lo cual estaría asociado al cese de la ocurrencia de incendios forestales en la amazonía del Perú y países cercanos como Brasil y Bolivia.
- Respecto a la Columna Total de Ozono, el mayor valor del trimestre se encontró en la primera (día 10) y segunda decadiaria de octubre (día 11), los cuales estuvieron por encima de su normal climática; mientras que, los valores más bajos se encontraron en la primera decadiaria de octubre (día 5), primera decadiaria de noviembre (día 10) y tercera decadiaria de diciembre (día 21 y 30), los cuales estuvieron 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 diciembre (día 28); mientras que, los menores valores en la primera decadiaria de octubre (día 6). Asimismo, en promedio durante el trimestre, la radiación UVE representó el 0.4% de la radiación UVT.
- Durante la primera y tercera decadiaria del mes de diciembre, predominó el IUV máximo diario de categoría Extremadamente Alta, mientras que los menores valores del IUV máximo diario se encontraron en la primera decadiaria de octubre (categoría Moderada) y noviembre (categoría Alta).
- En relación al O₃ troposférico, en promedios móviles de cada 8 horas, alcanzó el mayor valor del trimestre en la primera decadiaria de octubre (74 µg/m³) y el menor valor en la primera decadiaria de noviembre (32.6 µg/m³). En general, presentaron una tendencia a la disminución hacia el mes de diciembre. Además, se mantuvieron por debajo de su respectivo ECA-aire durante el trimestre. Por otro lado, tanto noviembre y diciembre presentaron 4 días con estado de calidad del aire "Moderado" y el resto de días monitoreados con estado de calidad del aire "Buena"; y para octubre, se alcanzaron 9 días con estado de calidad del aire "Moderado" y 19 días con estado de calidad del aire "Buena".
- En cuanto a la vigilancia satelital de gases reactivos, para el distrito de Marcapomacocha, la densidad de columna troposférica de CO presentó valores promedios decaduales con una tendencia a la disminución hacia el mes de

septiembre, lo cual estaría asociado al cese de los incendios forestales en la amazonia. En cuanto al HCHO, NO₂ y SO₂, el satélite Sentinel 5P presentó limitaciones en la captura de la información; sin embargo, se destaca un incremento hacia la primera decadiaria de noviembre, para su posterior descenso hacia fines del mes de diciembre, lo cual podría tener similar razón de la tendencia descrita para el CO.

- Sobre la vigilancia de la deposición húmeda, los valores de pH y Conductividad Eléctrica no evidenciaron presencia de lluvia ácida; lo cual podría haber sido a consecuencia del cese de la ocurrencia de los incendios forestales en la amazonía.
- En relación a la vigilancia de aerosoles, las mayores concentraciones de PM₁₀ y PM_{2,5} se registraron en la primera decadiaria del mes de octubre. Respecto al estado de la calidad del aire, en octubre se presentaron 6 días con calidad del aire “Moderada” para PM_{2,5}, en noviembre se presentó 1 día con calidad del aire “Moderada” y el resto de los días del trimestre se presentó una calidad del aire “Buena”. Los valores más elevados de concentración estarían vinculados a 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 UVAl alcanzó su máximo promedio areal para el distrito de Marcapomacocha en la tercera decadiaria de octubre (0.63) y en cuanto a la ubicación del OVA se alcanzó un valor de 0.88 en el mismo periodo. Respecto al AOD, se obtuvieron máximos valores en la segunda decadiaria de octubre (0.434). En general, se observó una tendencia a la disminución hacia finales del trimestre, lo cual estaría asociado al cese de 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 en la primera decadiaria de diciembre, lo cual estaría asociado al menor ingreso de radiación solar que disminuye la actividad fotosintética de las plantas y por ende, de la demanda de CO₂. De manera similar, para el CH₄, dado que suelos más húmedos a consecuencia de menor radiación solar, pueden favorecer 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

Sháneri Sheyla Sánchez Calderón

Hanns Kevin Gómez Muñoz

Dayana Lucero Acuña Valverde

Brian Daygolo Chávez Lino

Steven Gilber Arce Quispe

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_sIW7LxUbRJkjJs4LoyFaI85AbGaR7sjskA/viewform?chromeless=1&edit_requested=true

Próxima actualización: Abril del 2025

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

