

BOLETÍN **VIGILANCIA DE** **CALIDAD DEL AIRE**

Área metropolitana de Lima y Callao

Enero 2025



VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LIMA Y CALLAO (AMLC) – ENERO 2025

PRESENTACIÓN

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) presenta el boletín mensual sobre la vigilancia de la calidad del aire en el Área Metropolitana de Lima y Callao (AMLC), donde los tomadores de decisión y público en general podrán encontrar información sobre los principales contaminantes atmosféricos a los que se encuentran expuestos.

Para un mejor entendimiento de las variaciones espaciales y temporales de los contaminantes atmosféricos, se ha utilizado información meteorológica de superficie (datos de las estaciones meteorológicas automáticas del SENAMHI). Asimismo, se realizó un análisis sinóptico y oceánico a partir de la documentación técnica del SENAMHI para el mes de enero^{1,2} y las salidas resultantes de la aplicación del modelo Weather Research and Forecasting (WRF)³ para el ámbito del AMLC, el cual tiene una resolución espacial de 1 km y temporal de 1 hora. Por otro lado, se realizó un análisis del comportamiento del tránsito vehicular en el AMLC a partir de la información extraída de Google Traffic⁴. Con respecto a la información de contaminantes atmosféricos, se usaron los datos de la Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire (REMCA) de SENAMHI e información del satélite Sentinel 5P⁵.

*Toda persona tiene derecho de gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de su vida.
Constitución Política del Perú. Artículo 2, inciso 22.*

¹ Informe de Vigilancia Sinóptica de Sudamérica – enero 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-119.pdf>

² Boletín climatológico de Lima – enero 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02232SENA-127.pdf>

³ Sistema de predicción meteorológica a mesoescala de última generación diseñado tanto para la investigación atmosférica como para aplicaciones de predicción operativa (Mesoscale & Microscale Meteorology Laboratory - NCAR, s.f.).

⁴ Visor web de la empresa Google que muestran en tiempo real y a nivel histórico el estado del tránsito vehicular en las calles del AMLC.

⁵ Satélite de la misión Copernicus de la Agencia Espacial Europea que realiza mediciones atmosféricas con alta resolución espacio-temporal (The European Space Agency, s.f.).

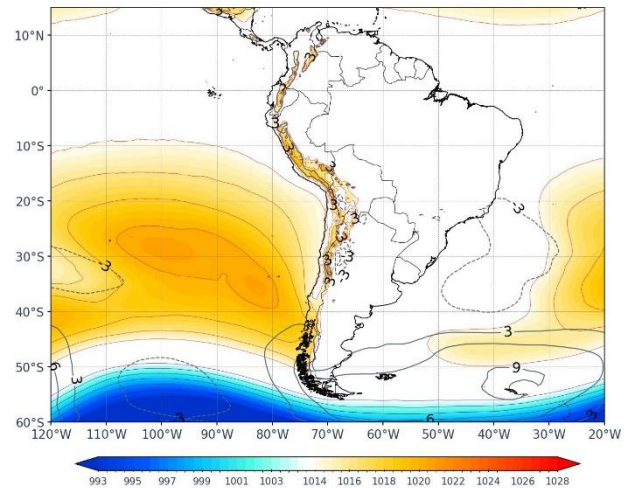
1. ANÁLISIS SINÓPTICO Y OCEÁNICO

Para un mejor entendimiento de las condiciones sinópticas a niveles bajos y oceánicas en el AMLC, se realizó un análisis por decadiarias (cada diez días), obteniéndose tres periodos de análisis. Es así como, para el mes de enero se conformó la decadiaria 1 (del 1 al 10), decadiaria 2 (del 11 al 20) y decadiaria 3 (del 21 al 31).

1.1. PRIMERA DECADIARIA (1 al 10 de enero)

En la primera decadiaria, el APS presentó una configuración zonal con dos núcleos, el más intenso en los 29°S y 99°W, con valores de presión alrededor de los 1020 hPa, similar respecto a lo climático y desplazado ligeramente hacia el noreste^{6,1} (Figura N°01a). Los vientos incidentes sobre la costa del AMLC a nivel de superficie presentaron una dirección predominante del sur con velocidades entre 2 y 4 m/s. Por otro lado, las Anomalías de Temperatura Superficial del Mar (ATSM) estuvieron cercanos a los -0.6°C frente a las costas del AMLC, lo cual repercutió en las anomalías de temperaturas máximas y mínimas del aire, encontrándose ligeramente la máxima por encima de lo normal, en 1.2°C y la mínima ligeramente por debajo en -0.7°C, respectivamente².

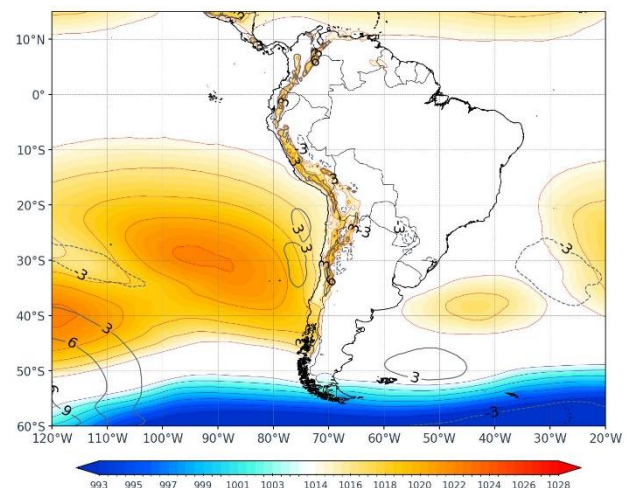
Figura N°01a. Variación del APS en la decadiaria 1.



1.2. SEGUNDA DECADIARIA (11 al 20 de enero)

En la segunda decadiaria, el APS presentó una configuración cuasi zonal con dos núcleos, el más cercano a continente en los 30° S y 93° W, con valores de presión alrededor de los 1022 hPa, ligeramente más intenso respecto a lo climático y desplazado hacia el noreste^{6,1} (Figura N° 01b). Los vientos incidentes sobre la costa del AMLC a nivel de superficie presentaron una dirección predominante del sur y velocidades entre 4 m/s y 6 m/s. Por otro lado, respecto a las ATSM⁷, estas se encontraron alrededor de los -1°C frente a las costas del AMLC, lo cual repercutió en las temperaturas máximas y mínimas del aire, ubicándolas por encima de su normal para la máxima en 1.8°C y la mínima por debajo en -1.2°C, respectivamente².

Figura N°01b. Variación del APS en la decadiaria 2.



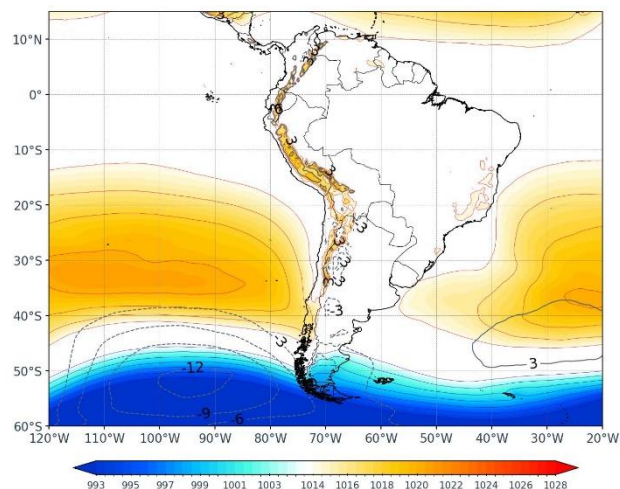
⁶ ¿Cómo responderán los anticiclones subtropicales del hemisferio sur al calentamiento global? Mecanismos y estacionalidad en las proyecciones de los modelos CMIP5 y CMIP6 (Pág. 704). Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-020-05290-7>

⁷ Temperatura superficial del mar y anomalías térmicas en el litoral peruano. Obtenido de: http://www.imarpe.gob.pe/imarpe/index2.php?id_seccion=1017803020000000000000

1.3. TERCERA DECADIARIA (21 al 31 de enero)

Finalmente, el APS presentó una configuración zonal y núcleo en los 34°S y 105°W con valores de presión alrededor de los 1020 hPa, similar respecto a lo climático y desplazado hacia el noreste^{6,1} (Figura N° 01c). Asimismo, se presentaron vientos con una dirección predominante del sur y velocidad entre 1 y 4 m/s. Por otro lado, la ATSM fue de -0.5°C frente a las costas de AMLC, lo cual repercutió en las temperaturas máximas y mínimas del aire, ubicando a la máxima por encima de su normal, en 0.9°C y a la mínima por debajo en -0.9°C, respectivamente².

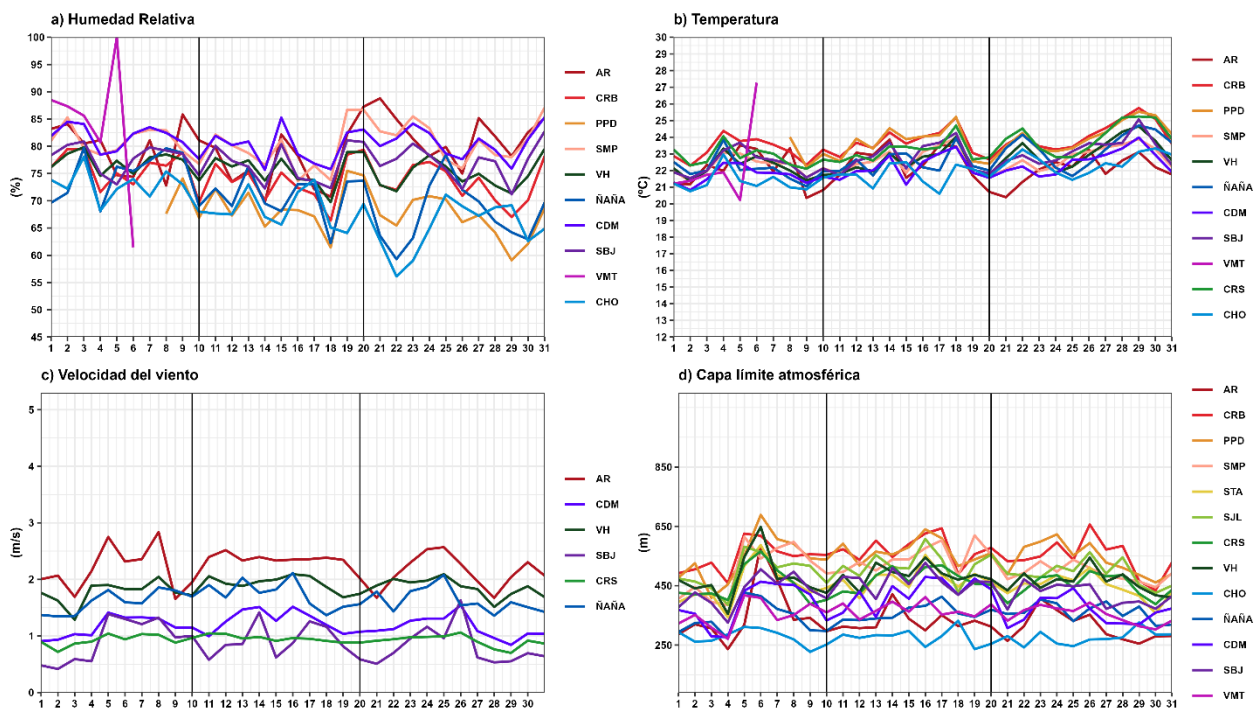
Figura N°01c. Variación del APS en la decadiaria 3.



2. CONDICIONES METEOROLÓGICAS LOCALES EN EL AMLC

Con los datos de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA) ubicadas en el AMLC, se realizó un análisis de la variabilidad diaria de la humedad relativa, la temperatura a 2 metros de la superficie y la velocidad del viento a 10 metros de la superficie. Los datos provinieron de las estaciones: Antonio Raimondi (AR), Carabayllo (CRB), Puente Piedra (PPD), San Martín de Porres (SMP), Santa Anita (STA), San Juan de Lurigancho (SJL), Ceres (CRS), Alexander Von Humboldt (VH), Ñaña (ÑAÑA), Chosica (CHO), Villa María del Triunfo (VMT) y Campo de Marte (CDM). Adicionalmente, se representó la variabilidad diaria de la Capa Límite Atmosférica (CLA)⁸ para lo cual se usó datos a 1 km del modelo operativo WRF.

Figura N°02. Variación diaria de las variables meteorológicas en el AMLC dividido en 3 decadiarias



Con respecto a la humedad relativa (Figura N° 02a), durante la primera decadiaria se presentaron valores entre 61.4% a 100%, para la segunda decadiaria entre 61.4% a 87.2% y para la tercera decadiaria entre

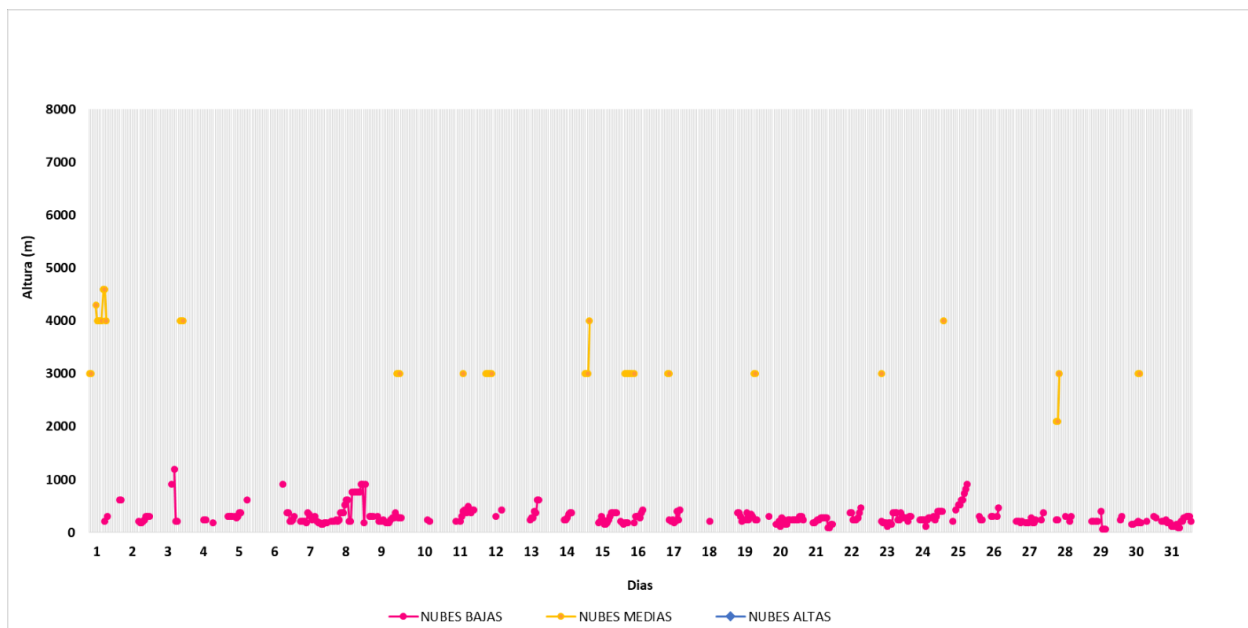
⁸ CLA: parte de la tropósfera influenciada directamente por la superficie terrestre, donde se concentra la mayor cantidad de sustancias contaminantes.

56.1% a 88.8%, siendo las estaciones SMP, CDM y VMT aquellas que mantuvieron los promedios de humedad más altos, de 80.5%, 80.7% y 83.9%, respectivamente. En relación con la temperatura (Figura N° 02b) durante la primera decadiaria se presentó valores entre 20.2 a 27.2°C, para la segunda decadiaria entre 20.6 a 25.1 °C, y en la tercera decadiaria entre 20.4 a 25.7 °C, siendo la estación de PPD la que alcanzó el valor promedio más alto de temperatura de 23.8 °C. En cuanto a la velocidad del viento (Figura N° 02c), fue muy variable, lo que se refleja en sus valores, los mismos que oscilaron entre 0.4 a 2.8 m/s durante todo el mes, siendo la estación AR la que alcanzó los valores promedio más altos, con un promedio mensual de 2.2 m/s. En el caso de la altura de la CLA (Figura N° 02d), las estaciones CRB, PPD y SMP alcanzaron los valores promedio más altos, con una altura promedio de 554.2, 547.3, 510.6 m, respectivamente, mientras que, en las estaciones ÑAÑA y CHO se presentaron los valores promedio más bajos, con 353 y 276.1 m, respectivamente.

2.1. ALTURA DE LA BASE DE LA NUBE

De acuerdo con el comportamiento horario de la Altura de la Base de la Nube (ABN) registrada por el ceilómetro⁹ de la EMA Aeropuerto Internacional Jorge Chávez ubicada en el Callao (Figura N° 03), se observó que, durante el mes de enero, las nubes bajas (ABN menor a 2000 m) se presentaron el 43.6% de las horas. Con respecto a la presencia de nubes medias (ABN mayor a 2000 m y menor a 6000 m), se encontró en un 4.8% de los casos. Respecto a las horas con condición de cielo despejado, estas se presentaron en el 51.4% de las mediciones realizadas. En enero predominaron las condiciones de cielo despejado, situación característica de inicio de verano.

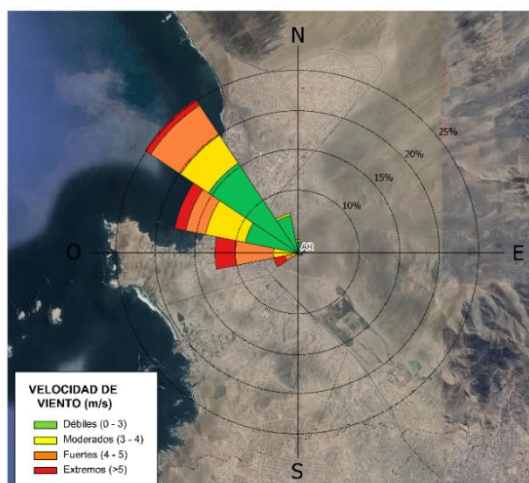
Figura N°03. Altura de base de la nube registrada en la estación Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (JCH).



⁹ Instrumento que mide la altura de la base de la nube más cercana a superficie tomando a ésta como referencia.

2.2. ANALISIS DEL VIENTO EN SUPERFICIE POR HORARIOS

Figura N°04. Rosa de vientos.



La rosa de vientos está definida como un gráfico circular que tiene marcado alrededor los rumbos de los vientos con las direcciones cardinales. Respecto a los vientos, generalmente se grafican las direcciones de donde provienen, así como también la frecuencia y magnitud de la velocidad¹⁰.

A manera de ejemplo se muestra en la Figura N° 04 una rosa de vientos para la estación Antonio Raimondi, la cual presenta una dirección predominante (con una frecuencia de vientos del 25%) del noroeste (NO) y una intensidad máxima de extrema (>5m/s).

En la Figura N° 05 se muestra el comportamiento de la dirección y velocidad del viento en cada una de las EMA para los horarios diurnos (07:00 - 12:59 horas), vespertinos (13:00 -18:59 horas) y nocturnos (19:00 - 06:59 horas) con sus respectivas categorías de la intensidad del viento; débiles (0 – 3 m/s), moderados (3 – 4 m/s), fuertes (4 – 5 m/s) y extremos (>5m/s).

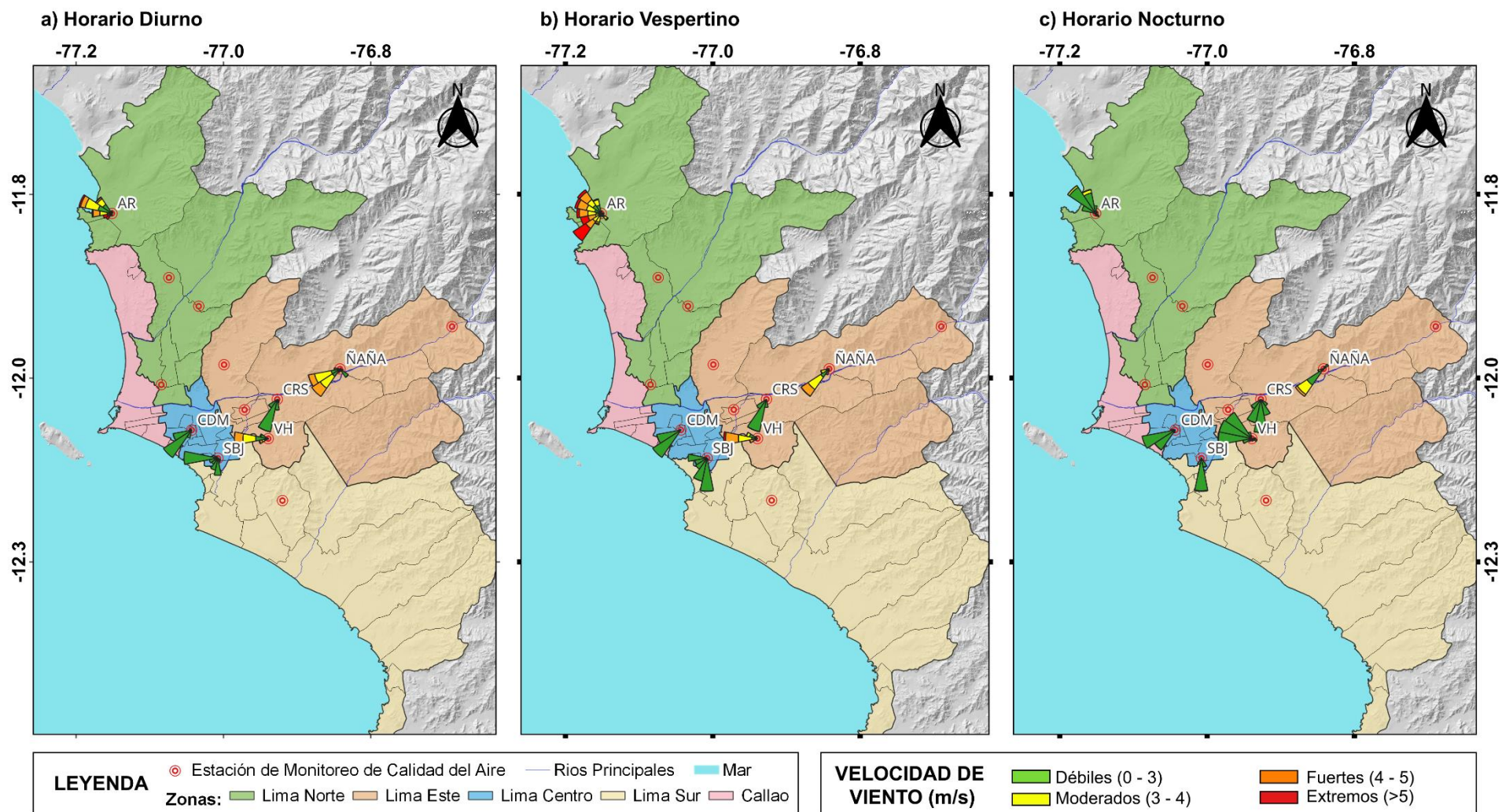
Es así como se observó, que en el horario diurno (Figura N° 05a), las estaciones VH y SBJ presentaron vientos con una dirección predominante del oeste con intensidades máximas de fuerte y débil, respectivamente. Las estaciones CRS y CDM presentaron vientos con direcciones predominantes del sur suroeste (SSO) y del suroeste (SO), con intensidad máxima de débil. Finalmente, las estaciones de AR y ÑAÑA han presentado vientos con direcciones predominantes del oeste noroeste (ONO) y del suroeste (SO), con una intensidad máxima de extrema y fuerte, respectivamente.

Para el horario vespertino (Figura N°05b), las estaciones AR, CDM y ÑAÑA presentaron vientos con una dirección predominante de suroeste (SO) con una intensidad máxima de extrema, débil y moderada, respectivamente. Para las estaciones de CRS y SBJ se presentaron vientos con direcciones predominantes del sur suroeste (SSO) y del sur (S), con una intensidad máxima de débil. En el caso de la estación VH presentó vientos con una dirección predominante del oeste (O) con intensidad máxima de extrema.

Para el horario nocturno (Figura N°05c), las estaciones CDM y ÑAÑA presentaron vientos con una dirección predominante de oeste suroeste (OSO) y suroeste (SO), con una intensidad máxima de débil para CDM y fuerte para ÑAÑA. Para las estaciones de CRS y SBJ se presentaron vientos con una dirección predominante del sur (S) y con una intensidad máxima de débil. Finalmente, las estaciones de VH y AR presentaron vientos con una dirección predominante del oeste (O) y nor noroeste (NNO) con una intensidad máxima de débil y moderada, respectivamente.

¹⁰ Como leer una rosa de vientos. Obtenido de: https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-01/documents/how_to_read_a_wind_rose.pdf

Figura N°05. Rosas de viento para diferentes horarios en el AMLC.



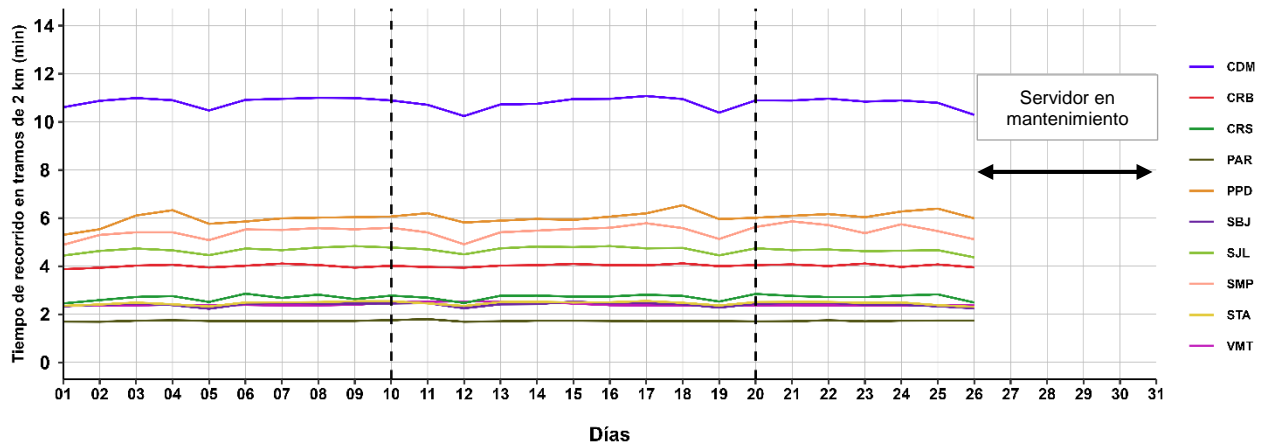
La Figura N° 05 muestra el comportamiento de la dirección y velocidad del viento en cada una de las EMA para los horarios diurnos (07:00 - 12:59 horas), vespertinos (13:00 - 18:59 horas) y nocturnos (19:00 - 06:59 horas).

3. ACTIVIDAD VEHICULAR EN EL AMLC

La actividad vehicular tiene una contribución de más del 50% sobre la contaminación del aire en el AMLC¹¹, asimismo, según el ranking del año 2023 de la compañía TOMTOM, en el AMLC el tiempo empleado para recorrer un tramo de 10 km es de 28 minutos¹². Se ha demostrado a través de investigaciones que, al aumentar el tiempo empleado para recorrer un tramo (mayor congestión vehicular), se espera un incremento en las concentraciones de los contaminantes atmosféricos^{13,14}. En relación con lo indicado, se ha desarrollado un algoritmo en Python que utiliza la técnica de web scraping¹⁵ para extraer datos sobre el tiempo de recorrido en tramos de 2 km de las principales avenidas¹⁶, específicamente en el área de influencia de las estaciones de monitoreo de calidad del aire de la REMCA del SENAMHI.

En la Figura N°06 se aprecia que los mayores tiempos de recorrido en tramos de 2 km se presentaron en los alrededores de la estación CDM (zona centro), con un valor promedio diario máximo de 11.1 minutos durante la segunda decadiaria (viernes 17 de enero, presentándose los valores más altos entre las 19:00 y 21:00 horas). En la zona norte, el tiempo de recorrido más alto fue de 6.5 minutos, también durante la segunda decadiaria (sábado 18 de enero, presentándose los valores más altos entre las 10:00 y 12:00 horas) en los alrededores de la estación PPD. En la zona este, el mayor tiempo promedio diario fue de 4.8 minutos, registrado durante la primera y segunda decadiaria (jueves 9 y 16, presentándose los valores más altos entre las 18:00 y 19:00 horas, y 12:00 y 13:00 horas, respectivamente) en los alrededores de la estación SJJ. Finalmente, en la zona sur, estación VMT, el valor más alto fue de 2.5 minutos, alcanzado en la segunda decadiaria (domingo 12 de enero, presentándose los valores más altos alrededor de las 9:00 horas). De acuerdo con la Figura N° 07, se observa que, en general, los valores se mantuvieron sin variaciones notables a lo largo del mes, destacándose una reducción los domingos, lo que refleja una menor carga vehicular los días de descanso; asimismo, se aprecia que en su mayoría se presentaron dos picos en los tiempos de demora entre las 7:00 a 9:00 horas y entre las 18:00 a 20:00 horas. Cabe mencionar que, durante el 1 de enero se observó menores tiempos de recorrido alrededor de todas las estaciones, sin embargo, estas variaciones no fueron significativas, con reducciones máximas de 12.4% en PPD y 11.2% en SMP. Asimismo, hay que mencionar que a fines de la tercera decadiaria se estuvieron realizando trabajos de mantenimiento en el servidor.

Figura N°06. Variación diaria del tiempo de recorrido en tramos de 2 km en el ámbito de la REMCA



¹¹ Estudio: Diagnóstico de la Gestión de la Calidad Ambiental del Aire de Lima y Callao (Pág. 56). Obtenido de:

<https://sinia.minam.gob.pe/documentos/diagnostico-gestion-calidad-ambiental-aire-lima-callao>

¹² Ranking 2023 "TOMTOM TRAFFIC INDEX". Obtenido de: <https://www.tomtom.com/traffic-index/ranking/>

¹³ La congestión aumenta significativamente las emisiones en muchas áreas localizadas dentro del dominio de estudio, lo que revela un claro potencial para reducciones significativas de emisiones al dirigir los esfuerzos de mitigación en puntos críticos clave. Obtenido de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749117304001?via%3Dihub>

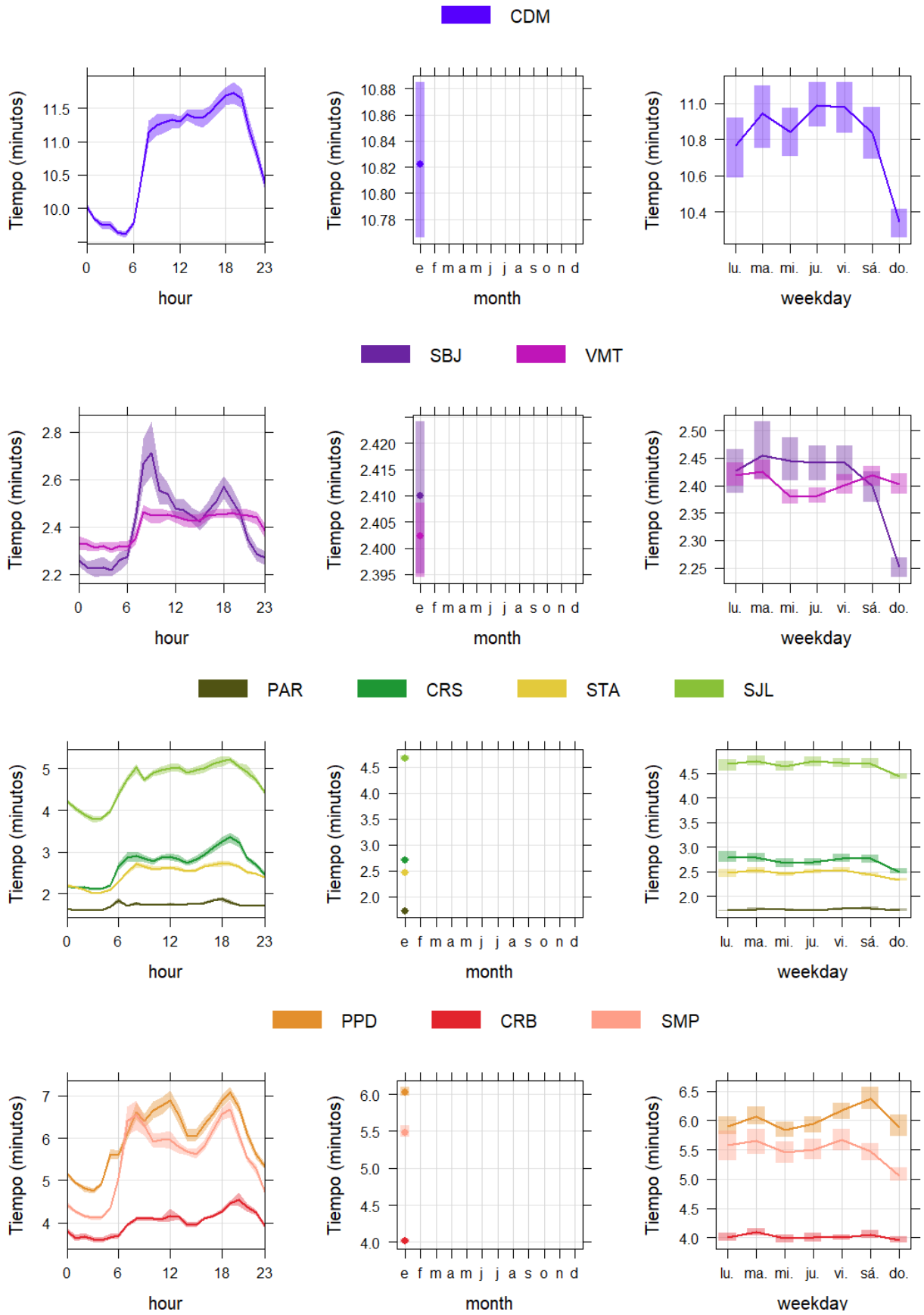
¹⁴ Sjodin et al. (1998) mostraron aumentos de hasta 4, 3 y 2 veces en las emisiones de CO, HC y NOx, respectivamente, en condiciones de congestión (velocidad promedio de 13 millas por hora, mph; 1 mph = 1,61 km por hora) en comparación con condiciones no congestionadas. Obtenido de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4243514/>

¹⁵ El web scraping es la práctica de recopilar datos de Internet de forma automatizada, mediante la escritura de programas que consultan servidores web y extraen información. Mitchell (2015). *Web Scraping with Python: Collecting More Data from the Modern Web*. O'Reilly.

¹⁶ Estudio: Extracción y Minería de Datos de Tráfico en Google Maps. Obtenido de:

https://www.irimets.com/uploadedfiles/paper/volume3/issue_4_april_2021/8350/1628083343.pdf

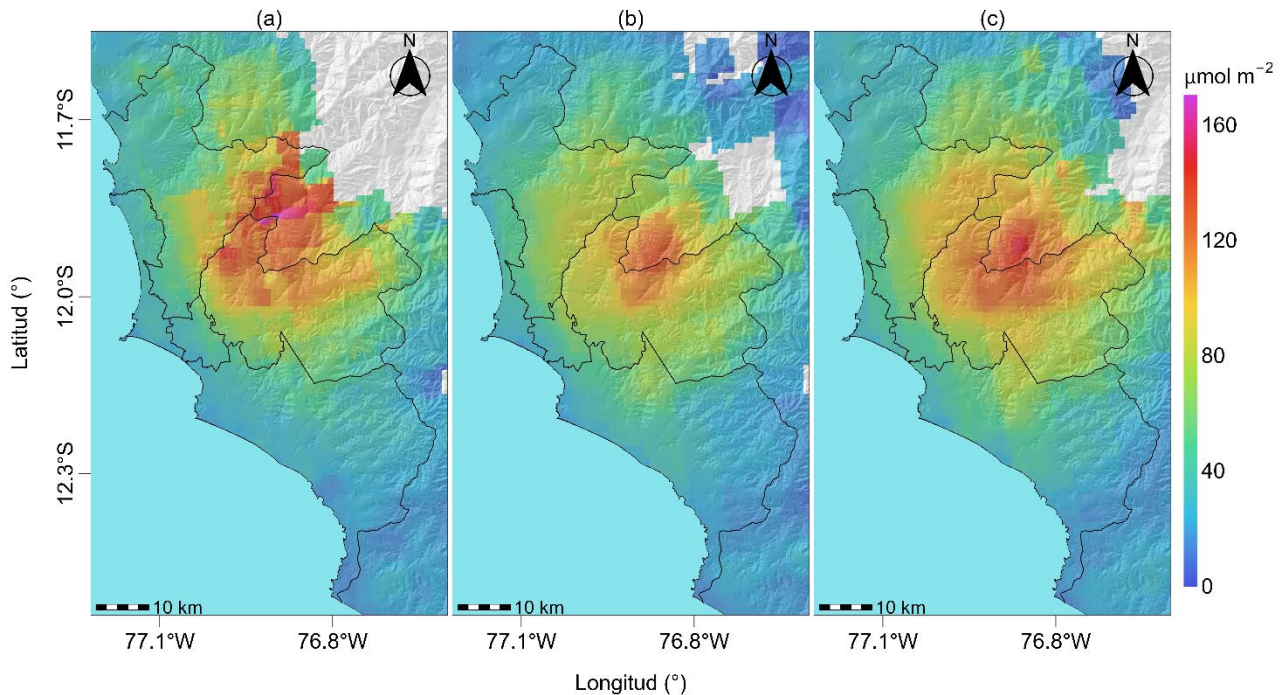
Figura N°07. Variación del tiempo de recorrido en tramos de 2 km en el ámbito de la REMCA según horario y día de semana



4. VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE A TRAVÉS DE IMÁGENES SATELITALES

La Figura N° 08, muestra la distribución espacial de la densidad de la columna vertical troposférica del NO₂ (μmol/m²), obtenidas del satélite Sentinel 5P (instrumento Tropomi) a una resolución aproximada de 5 km x 3.5 km durante el mes de enero. Es así como, la Figura N° 08a, muestra la distribución espacial promedio de NO₂ en la primera decadiaria (1 a 10 de enero), la Figura N° 08b, en la segunda decadiaria (11 al 20 de enero) y la Figura N° 08c en la tercera decadiaria (21 al 31 de enero).

Figura N° 08. Distribución espacial de la columna del NO₂ (μmol/m²) en la tropósfera del AMLC.



De manera general, la mayor densidad del NO₂ en la columna vertical troposférica se observó en la zona este, mientras que la menor se observó en la zona oeste. Durante la primera decadiaria, los valores máximos fueron de 165.3 μmol/m² en la zona este y 152.2 μmol/m² en la zona norte. En la segunda decadiaria, se destaca un incremento de 20.1% de la densidad de NO₂ en la zona centro, mientras que para la zona norte se destaca una reducción de 13.1% respecto a lo presentado en la primera decadiaria; asimismo, el valor máximo de 132.5 μmol/m² se alcanzó en la zona este. En la tercera decadiaria, se produjo un incremento general de la densidad del NO₂ en todas las zonas del AMLC, destacando incrementos del 20.2% en la zona este y del 17.8% en la zona sur con relación a la segunda decadiaria, registrándose un valor máximo de 138.5 μmol/m² en la zona este.

Cabe precisar que el NO₂ se origina principalmente por la oxidación del nitrógeno atmosférico durante procesos de combustión, especialmente relacionados a la actividad vehicular.^{17,18} Debido a la dirección de viento, el NO₂ tiende a dispersarse hacia las zonas norte y este del AMLC. Esta situación, combinada con la mayor circulación de vehículos de carga pesada o transporte de mercancía en dichas áreas, contribuye a que se registren los mayores valores de densidad de NO₂ en estas zonas.

¹⁷ Monitoreando el Dióxido de Nitrógeno desde el Espacio. Obtenido de: https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/Inside_Look_AQ_Spanish.pdf

¹⁸ Óxidos de Nitrógeno. Obtenido de: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/oxidos-nitrogeno.html>

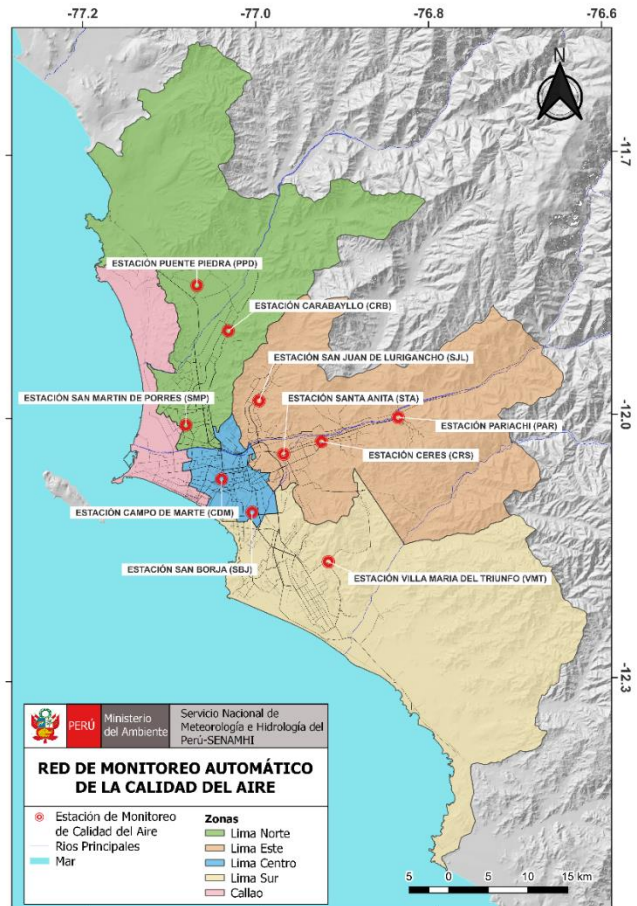
5. RED DE MONITOREO AUTOMÁTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL AMLC

El SENAMHI realiza la vigilancia de la calidad del aire a través de 10 estaciones de monitoreo automático, las cuales miden las concentraciones horarias de los contaminantes PM₁₀ (Material Particulado con diámetro menor a 10 micras), PM_{2,5} (Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras), NO₂ (Dióxido de Nitrógeno), O₃ (Ozono) y CO (Monóxido de Carbono). El conjunto de estas estaciones conforma la Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire (REMCA) y se encuentran en 9 distritos del AMLC tal como se indica en el Cuadro N° 01 y se observa en la Figura N° 09.

Cuadro N° 01. Zonas, nombres y ubicación de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire.

ZONA	NOMBRE/UBICACIÓN
Norte	Estación Puente Piedra (PPD) Complejo Municipal "El gallo de oro" del distrito de Puente Piedra
	Estación Carabayllo (CRB) Piscina Municipal del distrito de Carabayllo
	Estación San Martín de Porres (SMP) Parque Ecológico del distrito de San Martín de Porres
Este	Estación San Juan Lurigancho (SJL) Universidad César Vallejo en el distrito de San Juan de Lurigancho
	Estación Ceres (CRS) Plaza Cívica de Ceres distrito de Ate
	Estación Pariachi (PAR) Parque Barrantes Lingan - Pariachi 2a etapa distrito de Ate
	Estación Santa Anita (STA) Palacio Municipal del distrito de Santa Anita
Sur	Estación Villa María del Triunfo (VMT) Parque Virgen de Lourdes Zona Nueva Esperanza en el distrito de Villa María del Triunfo
Centro	Estación San Borja (SBJ) Polideportivo Limatambo del distrito de San Borja
	Estación Campo de Marte (CDM) Parque Campo de Marte en el distrito de Jesús María.

Figura N°09. Ubicación de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire en el AMLC.



Estándar de Calidad Ambiental (ECA)

La Ley N° 28611 - Ley General del Ambiente define al estándar de calidad ambiental (ECA) como **“la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el aire, agua y suelo en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente”**. Por lo tanto, para los contaminantes atmosféricos, las concentraciones de cada uno de estos no deben superar su respectivo Estándar de Calidad Ambiental para Aire (ECA-aire) a fin de evitar problemas en la salud de las personas y el ambiente. Asimismo, los valores de los ECA-aire son establecidos por el Ministerio del Ambiente (MINAM) y estipulados en el D.S. N° 003-2017-MINAM.

5.1. VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE A TRAVÉS DE ESTACIONES DE MONITOREO EN EL AMLC

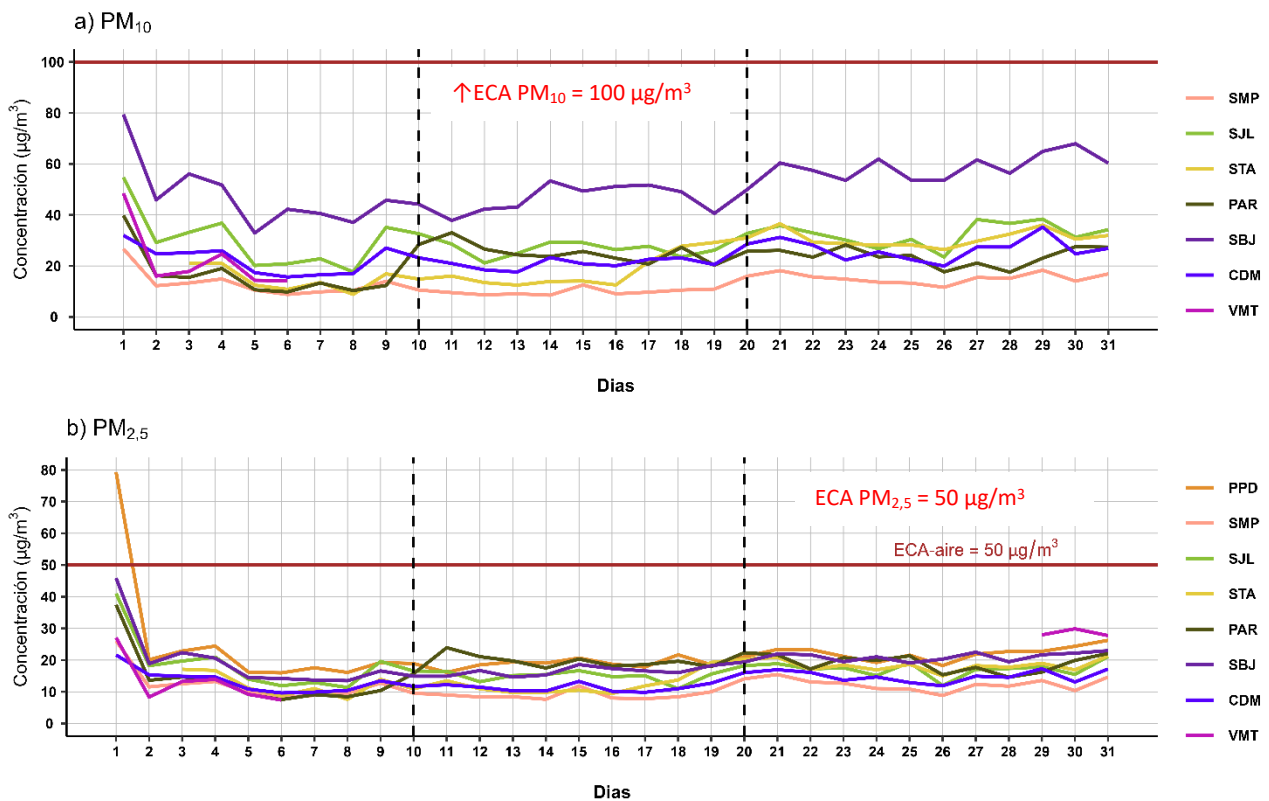
Con los datos de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire ubicadas en el AMLC, se analizó la variabilidad diaria de las concentraciones del material particulado y gases. Los datos provinieron de las estaciones: Puente Piedra (PPD), Carabaylo (CRB), San Martín de Porres (SMP), San Juan de Lurigancho (S JL), Ceres (CRS), Pariachi (PAR), Santa Anita (STA), San Borja (SBJ), Campo de Marte (CDM) y Villa María del Triunfo (VMT).

5.1.1. MATERIAL PARTICULADO (PM_{2,5} y PM₁₀)

El material particulado hace referencia a partículas sólidas o líquidas, cuyo tamaño es más grande que una molécula, pero suficientemente pequeño para mantenerse suspendido en el aire. Pueden contener en su estructura iones inorgánicos, compuestos metálicos, carbono elemental, compuestos orgánicos y compuestos provenientes de la corteza terrestre. Usualmente se evalúan dos tipos de material particulado, las denominadas partículas finas, que incluyen a las partículas con diámetro menor a 2,5 µm y las denominadas partículas gruesas que incluyen a las partículas con diámetro menor a 10 µm¹⁹.

En el AMLC, la principal fuente de material particulado está relacionada a las emisiones provenientes del parque automotor; sin embargo, existen otras fuentes, como las puntuales (industria del cemento, harina de pescado o la refinación de cobre y zinc) o las de área (entre las que se encuentran las pollerías)¹¹. Asimismo, las concentraciones de material particulado pueden variar en función de las condiciones meteorológicas, es así como, en estudios realizados en el AMLC, se ha visto que un incremento en la humedad relativa está relacionado con un incremento de las concentraciones de PM_{2,5}, mientras que un incremento en la temperatura está relacionado con un incremento en las concentraciones de PM₁₀²⁰.

Figura N°10. Variación diaria del PM₁₀ y PM_{2,5} (µg/m³) en el AMLC.



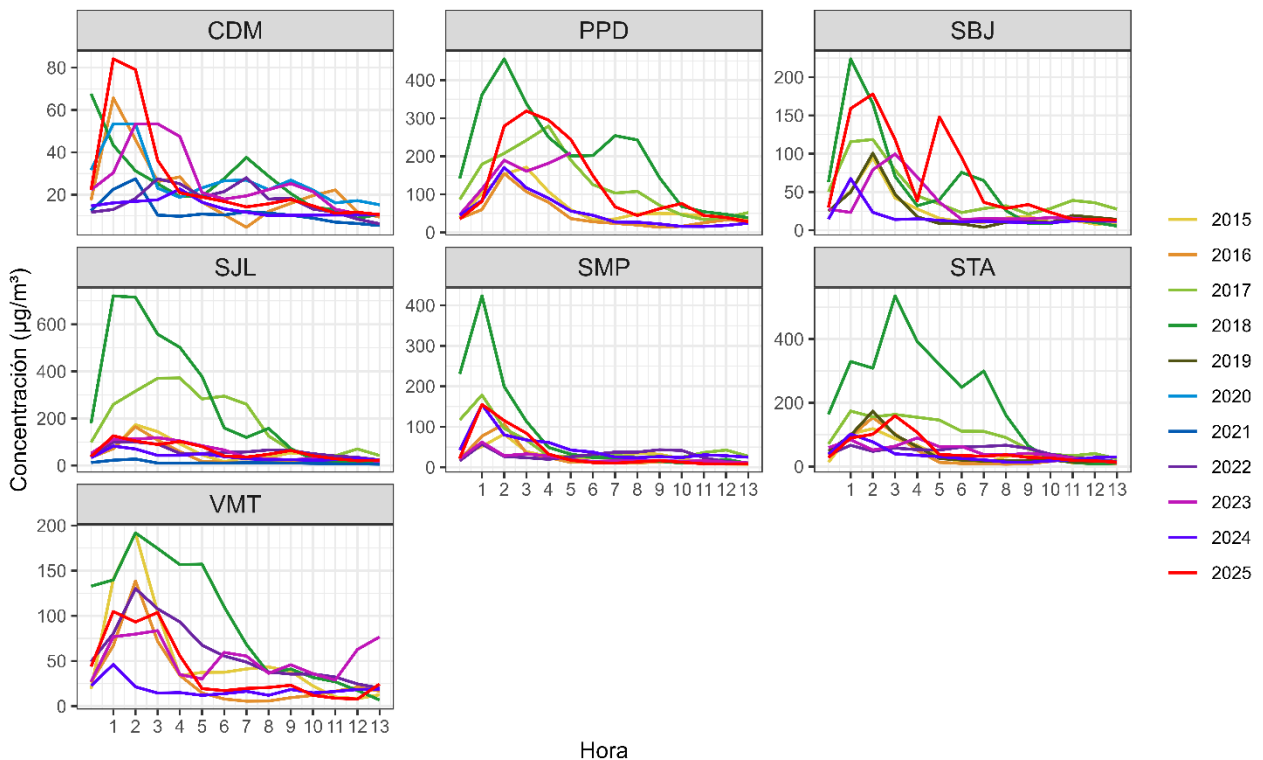
¹⁹ Determinación de componentes de aerosoles atmosféricos en una zona urbana para evaluar la calidad del aire e identificar las fuentes de contaminación. Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10967-023-08805-8>

²⁰ Niveles de material particulado en una megaciudad sudamericana: el área metropolitana de Lima-Callao, Perú. Obtenido de: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29134287/>

En la Figura N° 10a, se observa que, ninguna estación registró concentraciones diarias de PM₁₀ superiores al ECA-aire de 100 µg/m³ (como promedio diario). La concentración más alta fue de 79.4 µg/m³, alcanzada en la estación SBJ el miércoles 1 de enero. De manera similar, en las estaciones SMP, VMT, STA, SJL y PAR las concentraciones máximas también se registraron el 1 de enero, con los valores más altos entre las 01:00 y 03:00 horas, salvo en la estación VMT donde el pico ocurrió entre las 13:00 y 14:00 horas, lo cual estaría asociado a la quema de pirotécnicos. En el caso de la estación CDM, la concentración más alta se registró el miércoles 29, con picos entre las 8:00 y 10:00 horas, lo que estaría asociado a la resuspensión de polvo por actividad vehicular en la zona centro (durante días particulares), así como un incremento de la temperatura y la reducción de la altura de la CLA durante las horas de mayor concentración (ver Figura N° 02b y 02d). De manera general, se observa una tendencia al incremento en las concentraciones de PM₁₀, asociado a un aumento en la temperatura y una reducción de la altura de la CLA. (ver Figura N° 02b y 02d)^{20, 21, 22}

En la Figura N° 10b, se evidencia que respecto a PM_{2,5}, durante el periodo de monitoreo, únicamente en la estación PPD se registraron concentraciones diarias de PM_{2,5} superiores al ECA-aire de 50 µg/m³ (como promedio diario). El valor máximo de 79.3 µg/m³ se alcanzó el miércoles 1 de enero con los niveles más altos entre las 02:00 y 05:00 horas, lo cual estaría principalmente asociado a la quema de pirotécnicos por las celebraciones de año nuevo en la zona norte, así como a la dirección del viento que estaría trasladando los contaminantes hacia esta zona. De manera general, se observa una tendencia a la reducción de las concentraciones hacia la segunda decadiaria, lo que estaría asociado a una reducción en la humedad relativa y un incremento de la altura de la CLA, mientras hacia la tercera decadiaria se observa un incremento, que por su parte estaría mayormente asociado a la reducción en la altura de la CLA y la velocidad del viento para esas fechas, lo cual habría limitado la dispersión de los contaminantes. (ver Figura N° 02a, 02c y 02d)^{20,21,22}

Figura N°11. Variación diaria del PM_{2,5} (µg/m³) en el AMLC (00:00 horas a 13:00 horas del 1ero de enero 2015-2025).



²¹ Análisis de la relación entre el comportamiento estacional de los contaminantes sólidos sedimentables con las condiciones meteorológicas predominantes en la zona metropolitana de Lima-Callao durante el año 2004. Obtenido de: <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/995>
²² Factores meteorológicos que influyen en la dispersión de la contaminación del aire en la ciudad de Lima. Obtenido de: Boletín de la sociedad Geográfica de Lima, Vol. N° 113:2000

Asimismo, según la Figura N° 11, que muestra las concentraciones horarias de PM_{2.5} para el 1 de enero, se observa que en la estación CDM las concentraciones registradas el presente año 2025, superaron los valores de todos los años anteriores, alcanzando un pico entre las 02:00 y las 03:00 horas. Este incremento representó un aumento de 3 veces respecto a lo registrado en el 2024. En el caso de las demás estaciones se identifica que el año 2018 presentó las concentraciones más altas, salvo la estación VMT, donde también se registraron picos significativos en 2015. Durante el 1 de enero del 2025, las concentraciones más elevadas se observaron en la estación PPD, alcanzando su máximo entre las 02:00 y 05:00 horas, lo que representó un incremento del 86% respecto al año anterior.

5.1.2. GASES (CO, O₃ y NO₂)

El CO es un gas incoloro, insípido e inodoro, inflamable y peligroso para la salud humana. Las principales fuentes antropogénicas de CO son los procesos de combustión relacionados con la energía, la calefacción, el transporte de vehículos, la quema de biomasa, la oxidación del metano y los compuestos orgánicos volátiles (COV), mientras que las fuentes naturales son la actividad volcánica, las descargas eléctricas y las emisiones de gases naturales. Las condiciones de alta velocidad de viento favorecen la turbulencia e incrementan la dispersión y el transporte de CO, con lo cual se reducen las concentraciones de este contaminante; por otro lado, las bajas temperaturas no favorecen los movimientos verticales térmicamente inducidos, manteniendo los contaminantes atmosféricos en los niveles más bajos, sumado a ello, los motores funcionan con menor eficiencia cuando el aire está frío, lo cual da lugar a la formación de productos de combustión incompleta entre los que se encuentra el CO²³.

El O₃ desempeña un papel crucial en la química atmosférica y a nivel superficial, se considera uno de los principales contaminantes antropogénicos. Este gas secundario se forma a través de la oxidación fotoquímica de COV en presencia de óxidos de nitrógeno (NO + NO₂), conocidos como precursores. Por lo tanto, suele existir una relación inversa entre las concentraciones de NO₂ y O₃²⁴, siendo que, el pico del ciclo del O₃ aparece aproximadamente 6 horas después del pico del NO y 5 horas después del NO₂²⁵. Por otro lado, se observa una estrecha relación entre los niveles elevados de O₃ y la temperatura. Esto se debe a que uno de los factores más significativos que favorecen la formación de ozono fotoquímico es la intensidad de la luz solar, la cual está asociada con valores relativamente altos de temperatura²⁶.

El NO₂ está considerado dentro del grupo de gases altamente reactivos conocidos como óxidos de nitrógeno (NO_x), siendo usado como un indicador de la presencia de este grupo más amplio²⁷. El NO₂ se origina durante los procesos de combustión en los vehículos, por lo cual los valores máximos se pueden relacionar con las horas de máxima congestión vehicular. Asimismo, la temperatura y la radiación solar suelen mantener una relación inversa con las concentraciones de NO₂, debido a que fomentan las reacciones que dan origen al O₃, favoreciendo con ello el consumo de NO₂ como su precursor²⁶.

²³ Variaciones de las concentraciones de monóxido de carbono en la megaciudad de São Paulo de 2000 a 2015 en diferentes escalas de tiempo. Obtenido de: <https://www.mdpi.com/2073-4433/8/5/81>

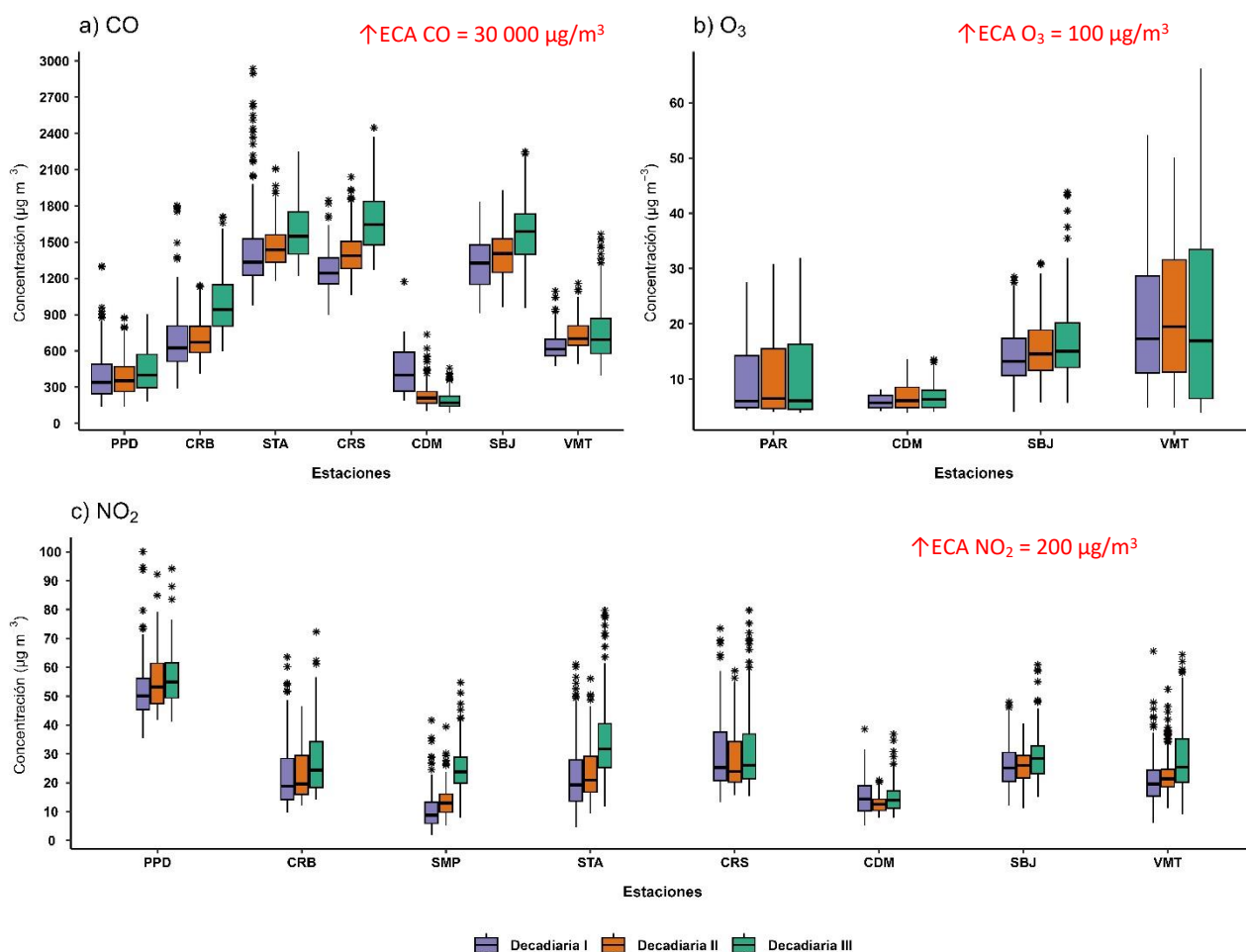
²⁴ Ozono y compuestos orgánicos volátiles en el área metropolitana de Lima-Callao, Perú. Obtenido de: <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/237>

²⁵ Análisis de la Relación entre O₃, NO y NO₂ en Tianjin, China. Obtenido de: <https://aaqr.org/articles/aaqr-10-07-0a-0055>

²⁶ Análisis temporal de los contaminantes atmosféricos (NO₂, O₃ troposférico y CO) y su relación con la temperatura del aire y la radiación solar en Lima Metropolitana. Obtenido de: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162023000100017

²⁷ United States Environmental Protection Agency. (25 de julio del 2023). *Basic Information about NO₂*. <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2#What%20is%20NO2>

Figura N°12. Variación de las concentraciones del CO, O₃ y NO₂ (µg/m³) por decadiaria en el AMLC.



En la Figura N° 12a, se observa que las concentraciones horarias de CO registradas en las estaciones se mantuvieron por debajo del ECA-aire de 30 000 µg/m³ (como promedio horario) durante todo el periodo de monitoreo. Asimismo, se puede apreciar que, el valor más alto se registró durante la primera decadiaria en la zona este, estación STA, con una máxima de 2935.9 µg/m³ (miércoles 1 de enero a las 03:00 horas), lo cual estaría relacionado con una reducción en la altura de la CLA para este día, que estaría favoreciendo la acumulación del contaminante (ver Figura N° 02d). Respecto al comportamiento decadiario, se observa en la mayoría de las estaciones una tendencia al incremento, la cual es mayor en la estación CRB entre la segunda y tercera decadiaria, situación que pudo haberse visto favorecida por una reducción en la altura de la CLA (ver Figura N° 02d), que favorecería la acumulación de los contaminantes.

En relación con el O₃, la Figura N° 12b muestra que las concentraciones promedio móvil de 8 horas no superaron el valor del ECA-aire de 100 µg/m³ (como máxima media de 8 horas) durante los días monitoreados. Asimismo, se puede apreciar que el valor más alto se registró en la estación VMT, con una máxima de 66.2 µg/m³ el martes 21 de enero. Las mayores concentraciones se registraron en horarios posteriores al periodo de máxima radiación solar²⁸ (comprendido entre las 15:00 horas y 19:00 horas). En cuanto al comportamiento decadiario, se destaca, sobre todo, el incremento en promedio que la estación CDM registró hacia la segunda decadiaria, el cual se habría visto favorecido por el incremento de temperatura que se ha observado en toda el AMLC, indicando una mayor disponibilidad de radiación en la superficie terrestre para la formación de O₃²⁹ (Ver Figura N° 02b).

En la Figura N° 12c, se observa que las concentraciones horarias de NO₂ registradas en las estaciones no superaron el valor de su ECA-aire de 200 µg/m³ (como promedio horario) durante todo el período de

²⁸ Ozono y compuestos orgánicos volátiles en el área metropolitana de Lima-Callao, Perú. Obtenido de: <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/237>

²⁹ Liu, T., Sun, J., Liu, B., Li, M., Deng, Y., Jing, W., & Yang, J. (2022). Factors influencing O₃ concentration in traffic and urban environments: A case study of Guangzhou city. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12961.

monitoreo. La mayor concentración se reportó en la zona norte, en la estación PPD (el sábado 4 de enero a las 12:00 horas), alcanzando 100.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual estaría asociado a la actividad vehicular en la zona norte (89% de las emisiones de NO_x provienen de vehículos a diésel)¹⁰, así como también a la disminución de la altura de la CLA para este día (Ver Figura N° 02d). En el análisis decadiario, se destaca sobre todo el incremento registrado de la segunda a la tercera decadiaria en la estación SMP (incremento de 83.3%), que estaría relacionado a un incremento en la humedad relativa, así como a una reducción en la altura de la CLA y la actividad vehicular presente en la zona, que habría favorecido la acumulación del contaminante (Ver Figura N° 02b y 02d).

6. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL AMLC

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^{30 31}.

6.1. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM_{10}

La Figura N° 13 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM_{10} asociados a su respectivo estado de la calidad del aire. Se observó que, en la zona norte, la estación SMP presentó 31 días con calidad del aire “Buena”. En la zona este, las estaciones PAR y SJL presentaron 31 días con calidad del aire “Buena”, mientras que, la estación SJL presentó 30 días con calidad del aire “Buena”. Por otro lado, en la zona centro, la estación CDM presentó 31 días con calidad del aire “Buena”, mientras que, la estación SBJ presentó 10 días con calidad del aire “Moderada” y 21 días con calidad del aire “Buena”. Finalmente, la estación VMT presentó 6 días con calidad del aire “Buena”.

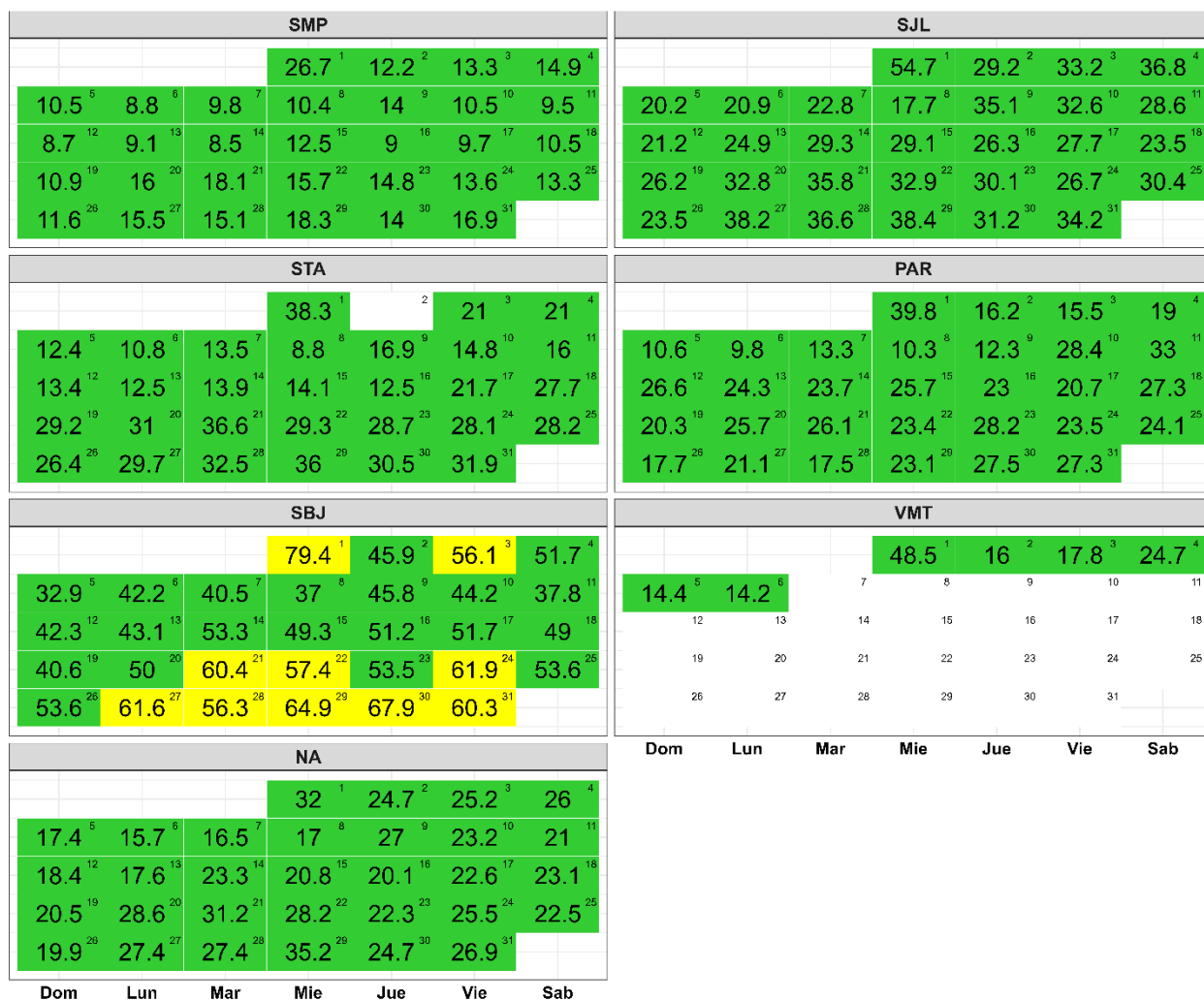
6.2. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL $\text{PM}_{2.5}$

La Figura N° 14 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el $\text{PM}_{2.5}$ asociados a su respectivo estado de la calidad del aire. Se observó que, en la zona norte, la estación SMP presentó 22 días con calidad del aire “Moderada” y 9 días con calidad del aire “Buena”; mientras que, la estación PPD presentó 1 día con calidad del aire “Insalubre” y 30 días con calidad del aire “Moderada”. En la zona este, las estaciones SJL, PAR y STA presentaron 1 día con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 30, 28 y 27 días con calidad del aire “Moderada”, respectivamente; adicionalmente, las estaciones PAR y STA presentaron 2 días con calidad del aire “Buena”. Por otro lado, en la zona centro, la estación SBJ presentó 1 día calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 30 días con calidad del aire “Moderada”, asimismo, la estación CDM presentó 31 días con calidad del aire “Moderada”. Finalmente, en la zona sur, la estación VMT presentó 7 días con calidad del aire “Moderada” y 2 días con calidad del aire “Buena”.

³⁰ 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

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-airquality-index-fact-sheet.pdf>

Figura N° 13. Índice de la 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

7. CONCLUSIONES

- Las condiciones meteorológicas influyeron en el comportamiento diario de los contaminantes atmosféricos en el AMLC durante el mes de enero. Se ha presentado una ligera tendencia al incremento de las temperaturas comparado con lo presentado en el mes anterior lo cual favoreció a la dispersión de $PM_{2,5}$.
- Durante el mes de enero, los mayores tiempos de recorrido, indicativos de una mayor congestión vehicular, se registraron principalmente en la zona centro, específicamente en los alrededores de la estación CDM. Por otro lado, se observó una reducción de la congestión los días domingo, así como la presencia de dos picos en los tiempos de demora entre las 7:00 y 9:00 horas y entre las 18:00 y 20:00 horas en los alrededores de la mayoría de las estaciones.
- Entre la primera y la segunda decadiaria, se presentó un incremento en la densidad del NO_2 en la columna vertical troposférica en la zona centro, mientras que en la zona norte se presentó una reducción. Sin embargo, hacia la tercera decadiaria se observó un incremento generalizado en toda el AMLC. En todas las decadiarias los mayores valores se presentaron en la zona este.
- No se superó el ECA – aire para PM_{10} en ninguno de los días del periodo de monitoreo, alcanzando un valor máximo de $79.4 \mu g/m^3$ en la estación SBJ. En el caso del $PM_{2,5}$, fue superado el ECA – aire el 1 de enero en la estación PPD, alcanzando un valor máximo de $79.3 \mu g/m^3$. Estas concentraciones estarían asociadas a las condiciones de actividad vehicular y meteorológicas presentes, así como también a la quema de pirotécnicos en las festividades de año nuevo.
- Durante el período de análisis, las concentraciones diarias de CO , NO_2 y O_3 se mantuvieron dentro de los límites establecidos por sus respectivos ECA – aire en todos los casos. Los incrementos en las concentraciones se asociaron a días con condiciones meteorológicas favorables para la acumulación o formación de contaminantes atmosféricos.
- Con respecto al Índice de Calidad del Aire (ICA) para el contaminante PM_{10} , se observó que, en general, la mayor parte del mes presentó días con una calidad del aire clasificada como “Buena”. Por otro lado, para el contaminante $PM_{2,5}$, predominó una calidad del aire “Moderada” durante la mayor parte del mes, en todas las estaciones, sin embargo, destaca que PPD presentó 1 día con calidad del aire de “Insalubre”, mientras que SJL, PAR, STA y SBJ presentaron 1 día con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles”; en todos los casos durante el 1ero de enero, asociándose con la quema de pirotécnicos por las festividades de año nuevo.

8. PERSPECTIVAS DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL MES DE FEBRERO 2025

De acuerdo con el pronóstico climático³² para el mes de febrero del 2025, se espera que en el AMLC las temperaturas máximas y mínimas se encuentren dentro de sus rangos normales. Considerando el comportamiento estacional de estas variables meteorológicas, se esperaría que las concentraciones de $PM_{2,5}$, se mantengan en un rango de similar a lo registrado en el mes de enero.

³² Documento: Boletín climático nacional – enero 2024 SENAMHI. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02215SENA-139.pdf>

Para más información sobre el presente informe, contactar con:

Ing. Elvis Anthony Medina Dionicio
eamedina@senamhi.gob.pe
Subdirector de Evaluación del Ambiente Atmosférico

Elaboración

Ing. Lourdes María Isabel Urteaga Tirado (lurteaga@senamhi.gob.pe)
Ing. Dayana Lucero Acuña Valverde
Ing. José Hitoshi Inoue Velarde
Bach. Hanns Kevin Gómez Muñoz

Apoyo

Tec. Rosalinda Aguirre Almeyda

Para estar informado permanentemente sobre la **EVOLUCIÓN HORARIA DE LOS CONTAMINANTES PRIORITARIOS DEL AIRE** en Lima Metropolitana visita este enlace:
<http://www.senamhi.gob.pe/?p=calidad-de-aire>

Encuentra los últimos **6 BOLETINES MENSUALES DE LA VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE** de Lima Metropolitana en el siguiente enlace:
<http://www.senamhi.gob.pe/?p=boletines>

Suscríbete al **BOLETÍN MENSUAL DE LA VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE** de Lima Metropolitana en el siguiente enlace:
<https://forms.gle/a4hpxqSc8KLj47sQ6>

Próxima actualización: 15 de marzo del 2025

