

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

Área metropolitana de Lima y Callao

Marzo 2025



VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LIMA Y CALLAO (AMLC) – MARZO 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 marzo^{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 – marzo 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-121.pdf>

² Boletín climatológico de Lima – marzo 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02232SENA-129.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.).

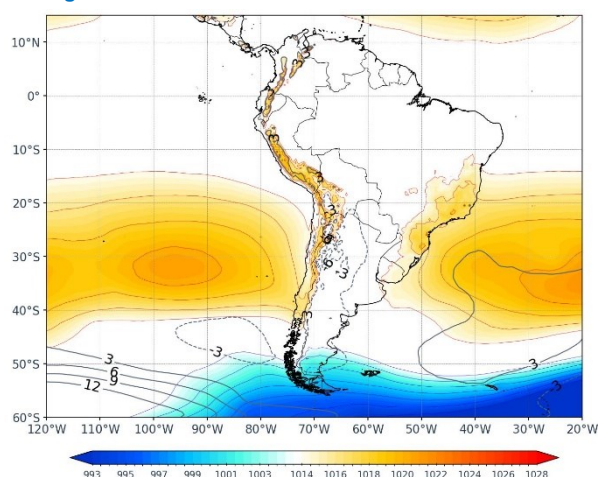
1. ANÁLISIS SINÓPTICO Y OCEÁNICO

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 marzo 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 marzo)

Durante la primera decadiaria, el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) presentó una configuración zonal, con su núcleo ubicado en los 32°S y 95°W, y valores de presión cercanos a 1020 hPa, similares a los valores climáticos pero desplazados hacia el oeste^{6,1} (Figura N°01a). A nivel de superficie, los vientos incidentes sobre la costa del AMLC presentaron una dirección predominante del sur con velocidades entre 0 y 2 m/s. Por otro lado, las Anomalías de Temperatura Superficial del Mar (ATSM) frente a las costas del AMLC estuvieron cercanas a los -0.8°C, lo cual repercutió en las anomalías de temperaturas máximas y mínimas del aire, encontrándose la máxima en 2.2°C por encima de lo normal, mientras que la mínima se mantuvo en su normal climática².

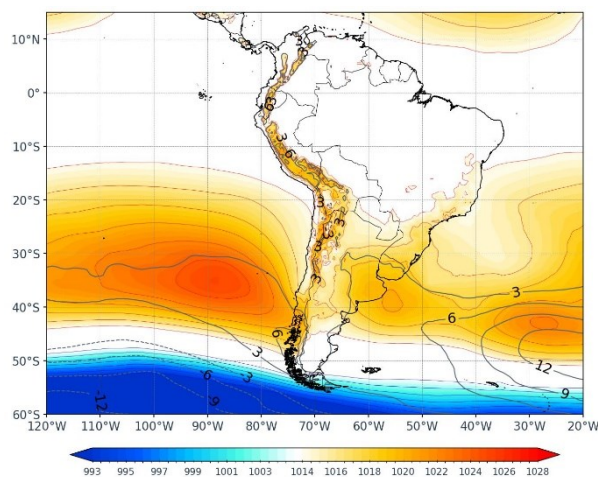
Figura N°01a. Variación del APS en la decadiaria 1.



1.2. SEGUNDA DECADIARIA (11 al 20 de marzo)

Durante la segunda decadiaria, el APS presentó una configuración cuasi meridional con núcleo en los 35°S y 88°W. Los valores de presión superaron los 1024 hPa, siendo más intenso respecto al climático y desplazado hacia el sureste^{6,1} (Figura N° 01b). A nivel de superficie, los vientos incidentes sobre la costa del AMLC presentaron una dirección predominante del sur y velocidades entre 3 y 5 m/s. Por otro lado, las ATSM⁷ frente a las costas del AMLC se encontraron alrededor de los -0.5°C, con una ligera tendencia a reducirse, lo cual repercutió en el aumento de las temperaturas máximas y mínimas del aire, ubicando a la máxima en su normal climática y la mínima en -0.8°C².

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



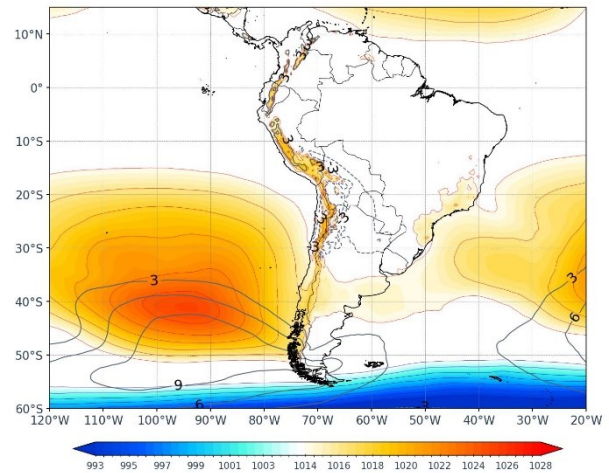
⁶ ¿Cómo responderán los anticiclones subtropicales del hemisferio sur al calentamiento global? Mecanismos y estacionalidad en las proyecciones de los modelos CMIP5 y CMIP6 (Pág. 704). Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-020-05290-7>

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 marzo)

Finalmente, durante la tercera decadiaria, el APS presentó una configuración meridional, con su núcleo en los 41°S y 95°W, y valores de presión alrededor de los 1024 hPa, siendo más intenso respecto a lo climático y desplazado hacia el suroeste^{6,1} (Figura N° 01c). Asimismo, se presentaron vientos con una dirección predominante del sur, con velocidades entre 2 y 4 m/s. Por otro lado, las ATSM frente a las costas de AMLC estuvieron cerca de -1°C, con una ligera tendencia a reducirse, lo que favoreció el incremento de las temperaturas máximas del aire en 1.8 y una disminución en las mínimas de -0.2°C².

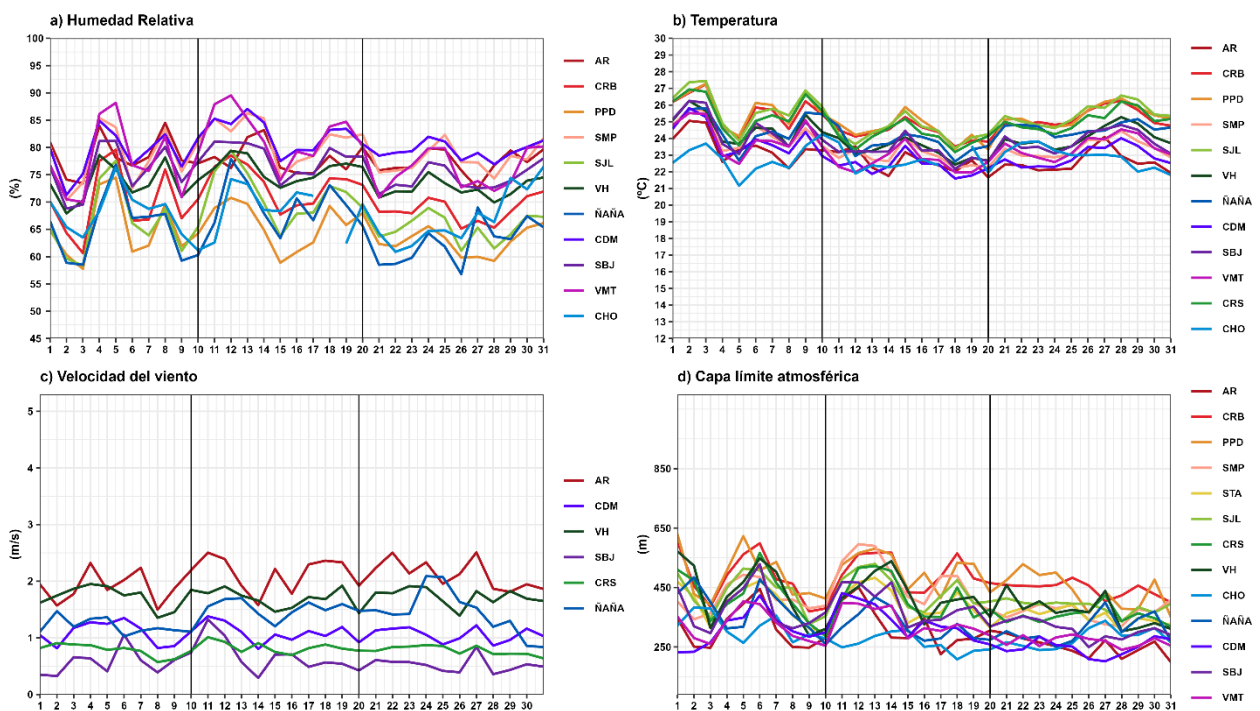
Figura N°01c. Variación del APS en la decadiaria 3.



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), Carabaylo (CRB), Puente Piedra (PPD), San Martín de Porres (SMP), Santa Anita (STA), San Juan de Lurigancho (S JL), 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 las salidas del modelo operativo WRF con resolución de 1 km.

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



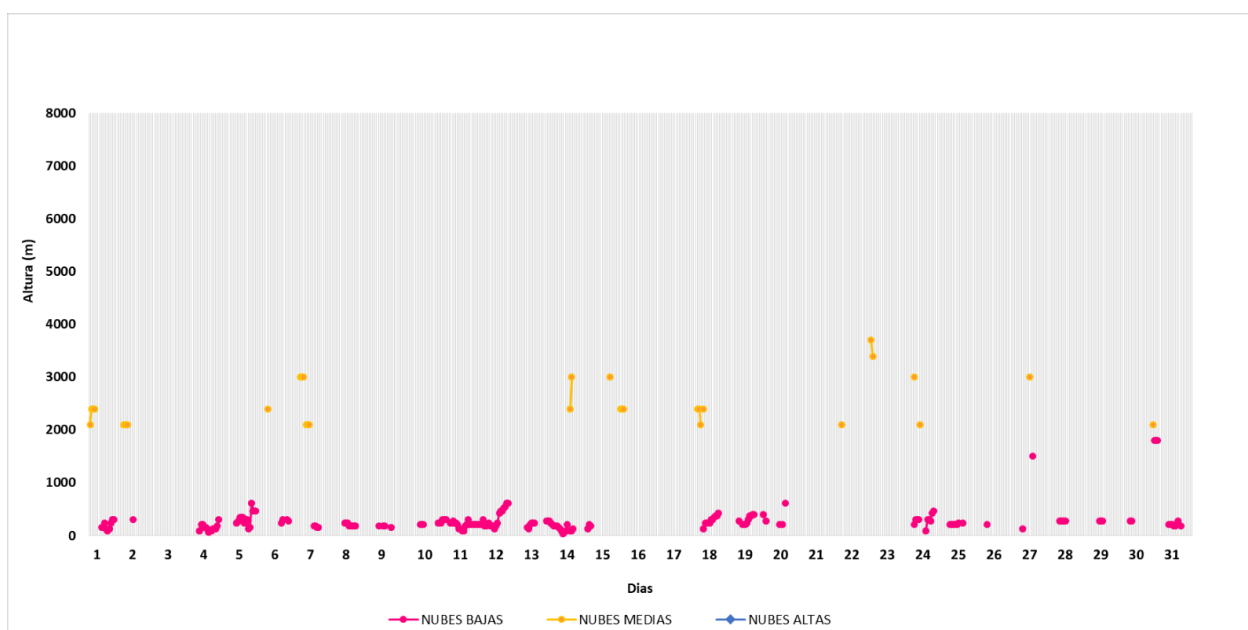
⁸ CLA: parte de la tropósfera influenciada directamente por la superficie terrestre, donde se concentra la mayor cantidad de sustancias contaminantes.

Con respecto a la humedad relativa (Figura N° 02a), durante la primera decadiaria se presentaron valores entre 57.7% a 88.1%, para la segunda decadiaria entre 58.8% a 89% y para la tercera decadiaria entre 59.2% a 80.1%, siendo las estaciones SMP y CDM aquellas que mantuvieron los promedios de humedad más altos, de 79.2.% y 80.3%, respectivamente. En relación con la temperatura (Figura N° 02b) durante la primera decadiaria se presentó valores entre 21.1 a 27.4°C, para la segunda decadiaria entre 21.6 a 25.9°C, y en la tercera decadiaria entre 21.6 a 26.5°C, siendo la estación de SJL la que alcanzó el valor promedio más alto de temperatura de 25.2 °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 0.3 a 2.5 m/s durante todo el mes, siendo la estación AR la que alcanzó los valores promedio más altos, con un promedio mensual de 2 m/s. En el caso de la altura de la CLA (Figura N° 02d), las estaciones PPD, CRB y SJL alcanzaron los valores promedio más altos, con una altura promedio de 477.4, 474.6, 419.1 m, respectivamente, mientras que, en las estaciones CHO y CDM se presentaron los valores promedio más bajos, con 285 y 295.1 m, respectivamente.

2.1. ALTURA DE LA BASE DE LA NUBE

De acuerdo con el registro horario de la Altura de la Base de la Nube (ABN) obtenido por el ceilómetro⁹ de la EMA Aeropuerto Internacional Jorge Chávez ubicada en el Callao (Figura N° 03), durante el mes de marzo se observó que las nubes bajas (ABN menor a 2000 m) se presentaron en el 25.5% de las horas. Las nubes medias (ABN entre 2000 m y 6000 m), se registraron en el 3.2% de los casos. En cuanto al cielo despejado, este se presentó en el 71.2% de las mediciones realizadas. En general, durante marzo predominaron las condiciones de cielo despejado, situación característica de fines de verano.

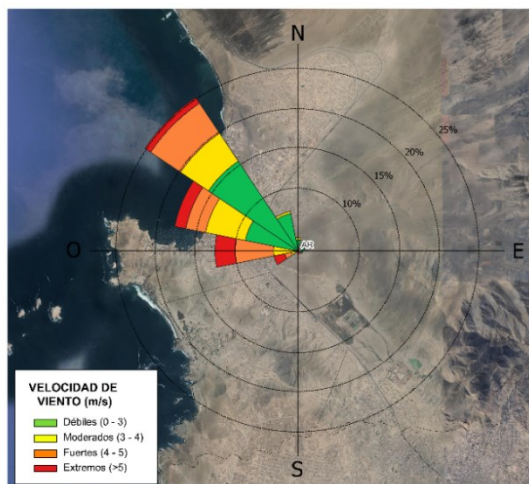
Figura N°03. Altura de base de la nube registrada en la estación Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (JCH).



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 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).

Durante el horario diurno (Figura N° 05a), en las estaciones VH y SBJ se alcanzaron vientos extremos y débiles, respectivamente, con una dirección predominante del oeste (O). En las estaciones CRS y CDM se alcanzaron vientos débiles, con direcciones predominantes del sur suroeste (SSO) y del suroeste (SO), respectivamente. Finalmente, en las estaciones de AR y ÑAÑA se alcanzaron vientos fuertes, con direcciones predominantes del oeste noroeste (ONO) y del oeste suroeste (OSO), respectivamente.

Durante el horario vespertino (Figura N°05b), en las estaciones CDM y ÑAÑA se alcanzaron vientos débiles y fuertes, respectivamente, con una dirección predominante del suroeste (SO). En las estaciones CRS y SBJ se presentaron vientos débiles con direcciones predominantes del sur suroeste (SSO) y del sur (S), respectivamente. En el caso de las estaciones VH y AR se alcanzaron vientos fuertes y extremos, con una dirección predominante del oeste (O) y noroeste (NO), respectivamente.

Durante el horario nocturno (Figura N°05c), en las estaciones CDM y ÑAÑA se alcanzaron vientos débiles y fuertes, respectivamente, con una dirección predominante del suroeste (SO). En las estaciones de CRS y SBJ se alcanzaron vientos débiles, con una dirección predominante del sur (S). Finalmente, en las estaciones de VH y AR se alcanzaron vientos débiles y moderados, con una dirección predominante del oeste noroeste (ONO) y noroeste (NO), respectivamente.

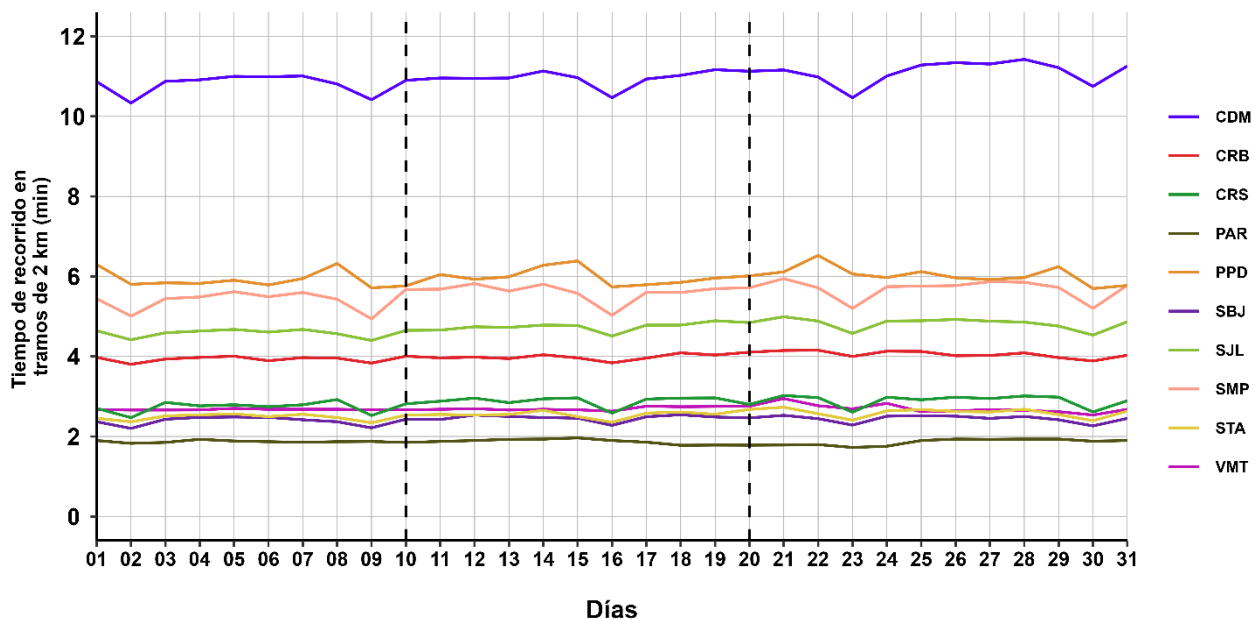
¹⁰ Como leer una rosa de vientos. Obtenido de: https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-01/documents/how_to_read_a_wind_rose.pdf

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 registraron en los alrededores de la estación CDM (zona centro), alcanzando un valor promedio diario máximo de 11.4 minutos durante la tercera decadiaria (viernes 28 de marzo), con los picos más altos entre las 18:00 y 19:00 horas. En la zona norte, el mayor tiempo de recorrido fue de 6.5 minutos, registrado también durante la tercera decadiaria (sábado 22 de marzo) en los alrededores de la estación PPD. En la zona este, el valor más alto fue de 5 minutos, alcanzado igualmente durante la tercera decadiaria (viernes 21 de marzo) en los alrededores de la estación SJL. Finalmente, en la zona sur, en los alrededores de la estación VMT, el valor más alto fue de 2.9 minutos, alcanzado también en la tercera decadiaria (viernes 21 de marzo). En general, los tiempos de recorrido se mantuvieron relativamente estables a lo largo del mes, sin variaciones significativas. Por otro lado, la Figura N° 07 muestra 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; asimismo, se destaca una reducción de los tiempos de demora los domingos, lo que refleja una menor carga vehicular durante los días de descanso, sin embargo, en el caso de la estación SJL y especialmente en la estación PPD se observa un incremento en los tiempos los sábados, probablemente asociados a actividades propias de estas zonas.

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>

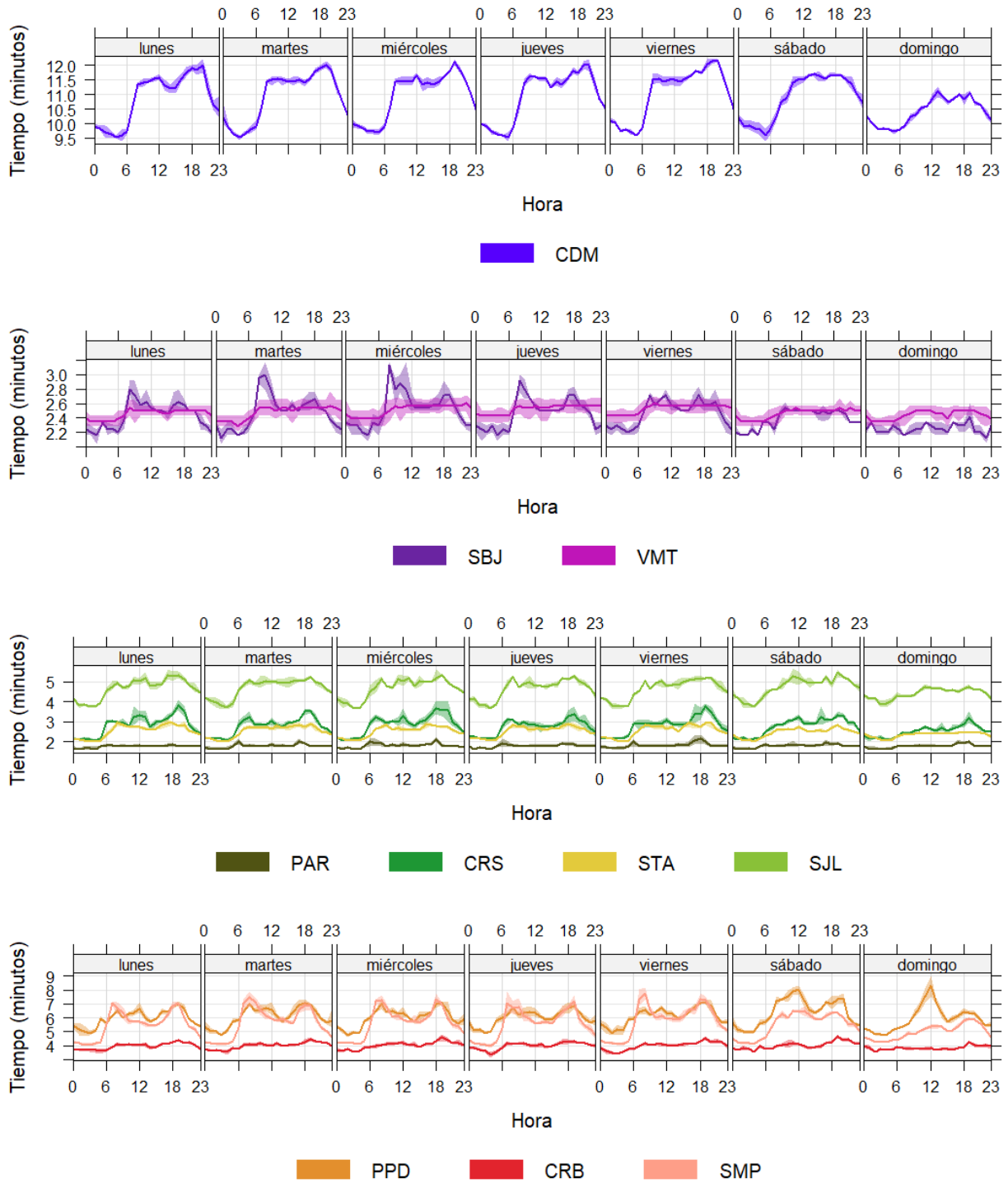
¹⁴ Sjodin et al. (1998) mostraron aumentos de hasta 4, 3 y 2 veces en las emisiones de CO, HC y NOx, respectivamente, en condiciones de congestión (velocidad promedio de 13 millas por hora, mph; 1 mph = 1,61 km por hora) en comparación con condiciones no congestionadas. Obtenido de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4243514/>

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

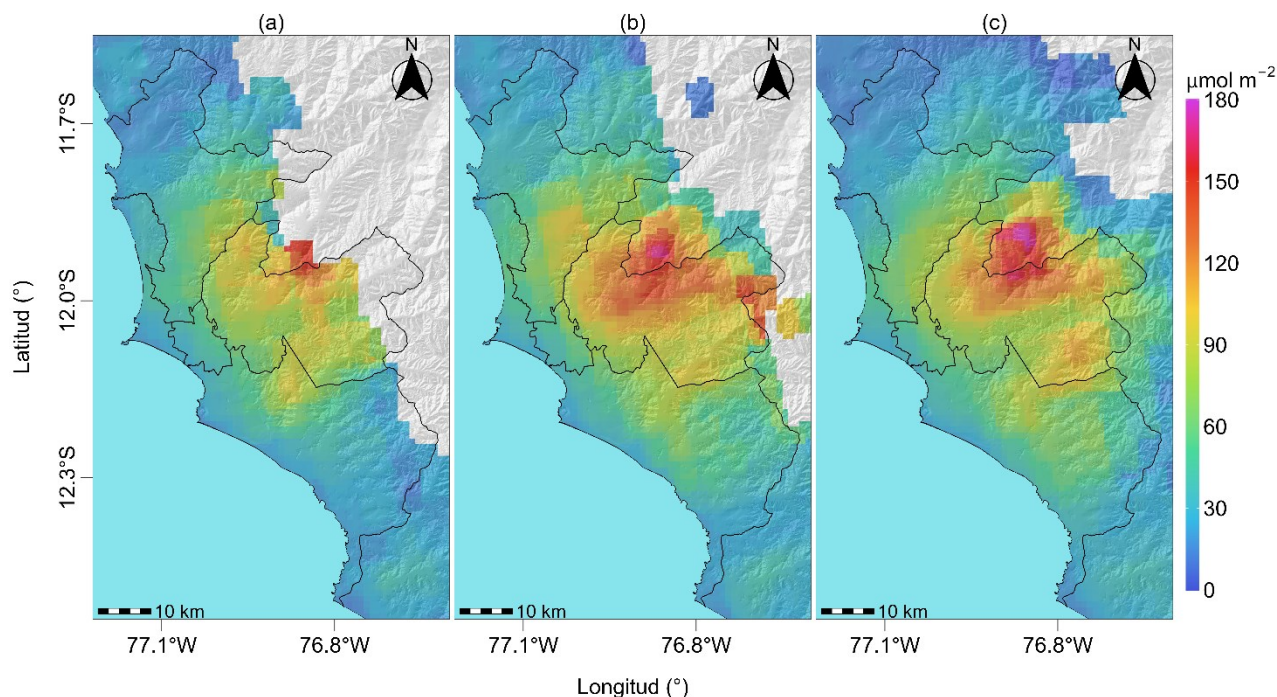
Figura N°07. Variación del tiempo de recorrido en tramos de 2 km en el ámbito de la REMCA según horario y día de semana



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 × 3.5 km durante el mes de marzo. Es así como, la Figura N° 08a, muestra la distribución espacial promedio de NO₂ en la primera decadiaria (1 a 10 de marzo), la Figura N° 08b, en la segunda decadiaria (11 al 20 de marzo) y la Figura N° 08c en la tercera decadiaria (21 al 31 de marzo).

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



Durante la primera decadiaria, el valor máximo de densidad del NO₂ en la columna vertical troposférica fue de 151.6 μmol/m² en la zona este. En la segunda decadiaria, se observa que en promedio se dio un incremento en todas las zonas, destacando la zona sur, donde se incrementó en 53.3% respecto a la primera decadiaria; asimismo, se alcanzó el valor máximo de 155.1 μmol/m² en la zona este. En la tercera decadiaria, se produjo una reducción de la densidad del NO₂ en las zonas este, oeste y norte, destacando la zona oeste donde se redujo en un 21.4% con relación a la segunda decadiaria; en esta decadiaria el valor máximo también fue registrado en la zona este, alcanzando 162.4 μmol/m².

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>

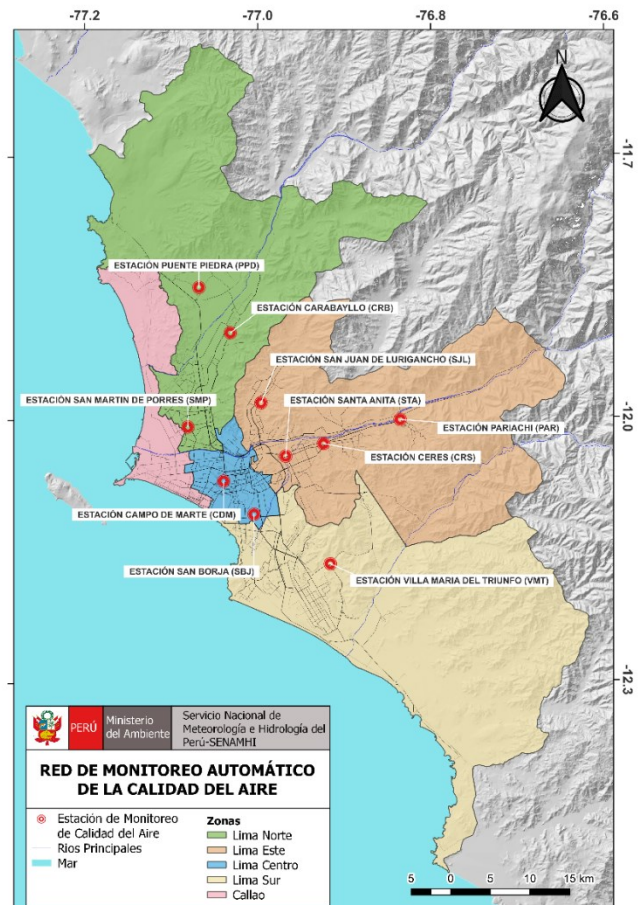
5. RED DE MONITOREO AUTOMÁTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL AMLC

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

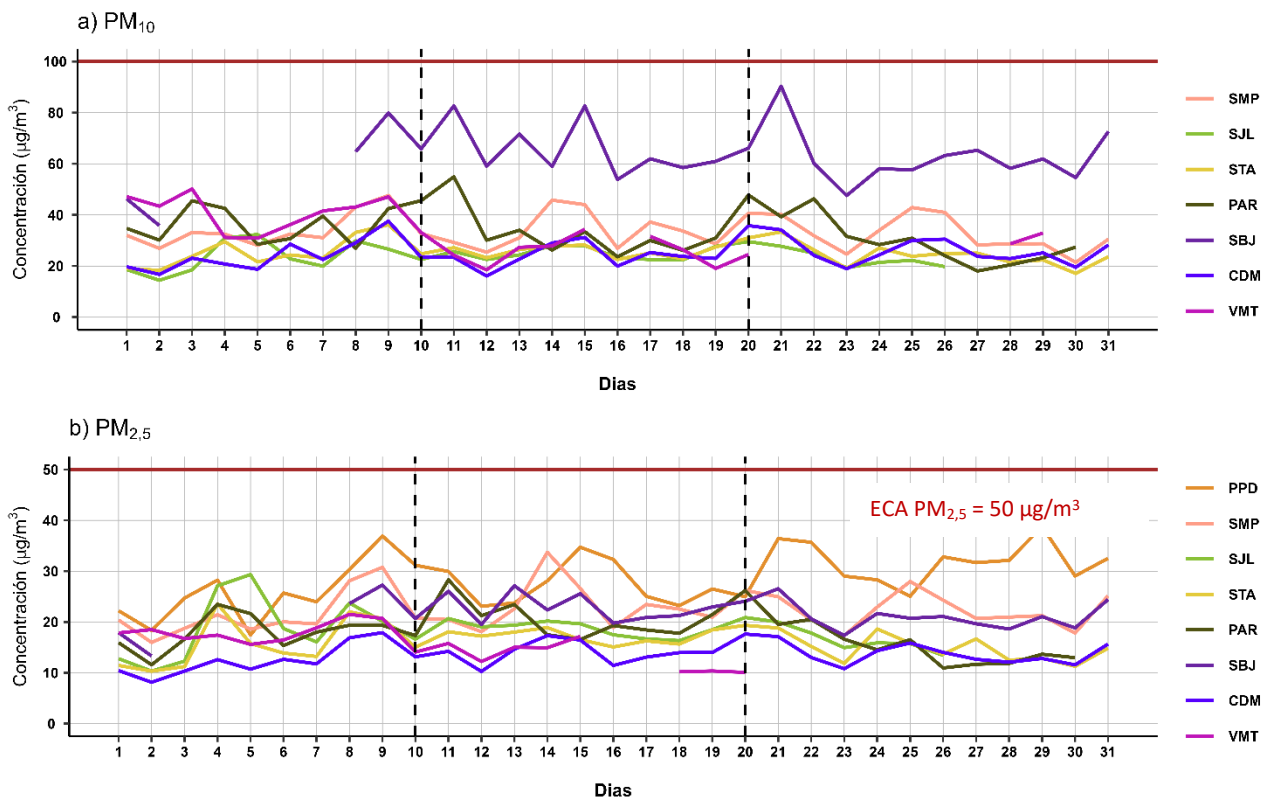
Con los datos de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire ubicadas en el AMLC, se analizó la variabilidad diaria de las concentraciones del material particulado y gases. Los datos provinieron de las estaciones: Puente Piedra (PPD), Carabaylo (CRB), San Martín de Porres (SMP), San Juan de Lurigancho (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 PM_{10})

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 $2,5 \mu m$ y las denominadas partículas gruesas que incluyen a las partículas con diámetro menor a $10 \mu m$ ¹⁹.

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 PM_{10} ²⁰.

Figura N°10. Variación diaria del PM_{10} y $PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$) 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, durante el periodo de monitoreo no se registraron concentraciones de PM₁₀ superiores al ECA-aire de 100 µg/m³ (como promedio diario). El valor máximo de 90.3 µg/m³ se alcanzó en la estación SBJ, en la zona centro, el viernes 21 de marzo, con los valores más altos entre las 10:00 y 11:00 horas, lo que estaría asociado a la resuspensión de polvo por actividad vehicular en la zona centro (durante días particulares), así como a un ligero incremento de la temperatura y velocidad del viento en ese día (ver Figura N° 02b y 02d). La concentración más alta registrada para la zona norte se dio el 9 de marzo en la estación SMP, alcanzando 47.6 µg/m³. En cuanto a la zona sur, la concentración más alta se registró el 3 de marzo en la estación VMT, alcanzando 50.1 µg/m³. Finalmente, en la zona este, la concentración más alta se registró el 11 de marzo en la estación PAR, alcanzando 54.9 µg/m³. A nivel decadiario, destaca la reducción de las concentraciones en la estación VMT durante la segunda decadiaria, con una disminución del 35.7 % respecto a la primera, asociada a una reducción en la temperatura; adicionalmente, se destaca una reducción de las concentraciones hacia la tercera decadiaria en la estación PAR (14.1% menor que la segunda decadiaria), asociada a una disminución en la altura de la CLA, condiciones que favorecieron la acumulación del contaminante (ver Figura N° 02c) ^{20, 21, 22}

En la Figura N° 10b, se observa que, durante el periodo de monitoreo, no se registraron concentraciones de PM_{2,5} superiores al ECA-aire de 50 µg/m³ (como promedio diario). El valor máximo de 38.8 µg/m³ se alcanzó el sábado 29 de marzo en la zona norte, estación PPD, asociado principalmente a la reducción en la altura de la CLA para esa fecha (ver Figura N° 02d), así como al incremento de la humedad relativa y del tiempo de demora (mayor congestión vehicular) en las horas donde se registraron las concentraciones más altas (entre las 10:00 y 13:00 horas). En la zona centro, el valor más alto fue de 27.3 µg/m³ registrado el 9 de marzo en la estación SBJ. En la zona sur, la concentración más alta fue de 21.5 µg/m³ el 8 de marzo en la estación VMT. Finalmente, para la zona este, la concentración más alta fue de 28.3 µg/m³, alcanzada el 11 de marzo en la estación PAR. A nivel decadiario, se destaca una reducción en las concentraciones de PM_{2,5} en la estación VMT hacia la segunda decadiaria, un 28.3% menor que la primera, asociada a un incremento de la altura de la CLA; mientras que hacia la tercera decadiaria se destaca una reducción promedio de 29.2% en la estación PAR, asociada a una reducción generalizada de la humedad relativa en toda el AMLC, lo que favoreció la disminución del PM_{2,5}. (ver Figura N° 02a) ^{20,21,22}

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

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

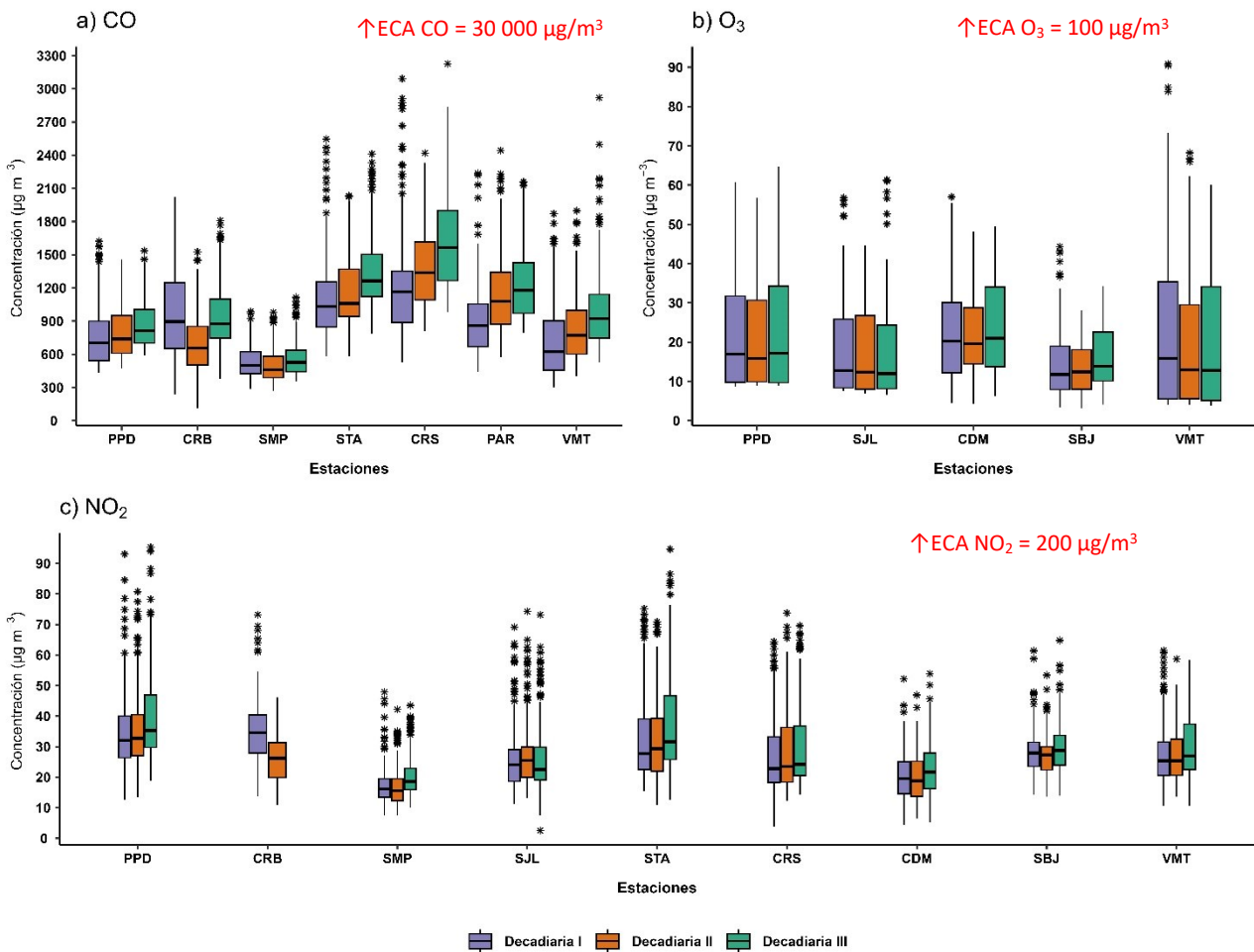
²³ Variaciones de las concentraciones de monóxido de carbono en la megaciudad de São Paulo de 2000 a 2015 en diferentes escalas de tiempo. Obtenido de: <https://www.mdpi.com/2073-4433/8/5/81>

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>

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.

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



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>

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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (como promedio horario) durante todo el periodo de monitoreo. Asimismo, el valor más alto se registró durante la primera decadiaria en la zona este, estación CRS, con una máxima de 3225.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (viernes 28 de marzo a las 08:00 horas), asociado a una reducción en la altura de la CLA y en la velocidad del viento para este día, condiciones que estarían favoreciendo la acumulación del contaminante (ver Figura N° 02d). Respecto al comportamiento decadiario, destaca la reducción de las concentraciones en la estación CRB hacia la segunda decadiaria (29.1% menor), relacionada a un incremento en la altura de la CLA. Asimismo, de la segunda a la tercera decadiaria se produjo un incremento generalizado de las concentraciones, destacándose la estación CRB con un incremento del 36.1%, situación que pudo haberse visto favorecida también por una reducción en la altura de la CLA (ver Figura N° 02d), que estaría limitando la dispersión del contaminante.

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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (como máxima media de 8 horas) durante los días monitoreados. Asimismo, se puede apreciar que el valor más alto se registró el domingo 2 de marzo, día en el que se alcanzó la temperatura promedio más alta del mes, alcanzando un valor máximo de 90.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, cabe mencionar que 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 la reducción de la concentración promedio de la primera a la segunda decadiaria en la estación VMT (15.7% menor), lo cual estuvo mayormente asociado a una reducción en los valores de temperatura, así como un incremento en la altura de la CLA; asimismo, de la segunda a la tercera decadiaria, destaca el incremento de las concentraciones ocurrido en la estación SBJ (23.3% mayor), asociado a un incremento ligero en la temperatura, así como una reducción en la altura de la CLA, lo cual habría favorecido la formación y acumulación de O₃.^{26 29} (Ver Figura N° 02b y 02c).

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 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (como promedio horario) durante todo el período de monitoreo. La mayor concentración se reportó en la zona norte, en la estación PPD (el sábado 29 de marzo a las 10:00 horas), alcanzando 95.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 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 e incremento en la humedad relativa, condiciones que favorecieron la acumulación de contaminantes durante este día (Ver Figura N° 02a y 02d). En el análisis decadiario, se destaca una reducción de la concentración promedio de la primera a la segunda decadiaria en la estación CRB (26.1% menor), la cual estuvo asociada a un incremento en la altura de la CLA (Ver Figura N° 02d); así como también un incremento de la concentración promedio de la segunda a la tercera decadiaria en las estaciones SMP y STA (19.4% y 17.9% mayor, respectivamente), asociada a la reducción en la altura de la CLA (Ver Figura N° 02d). Asimismo, destaca la reducción en las concentraciones la mayoría de los días domingo, lo cual estaría asociado a una reducción en la actividad vehicular (Ver Figura N° 07)

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}.

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.

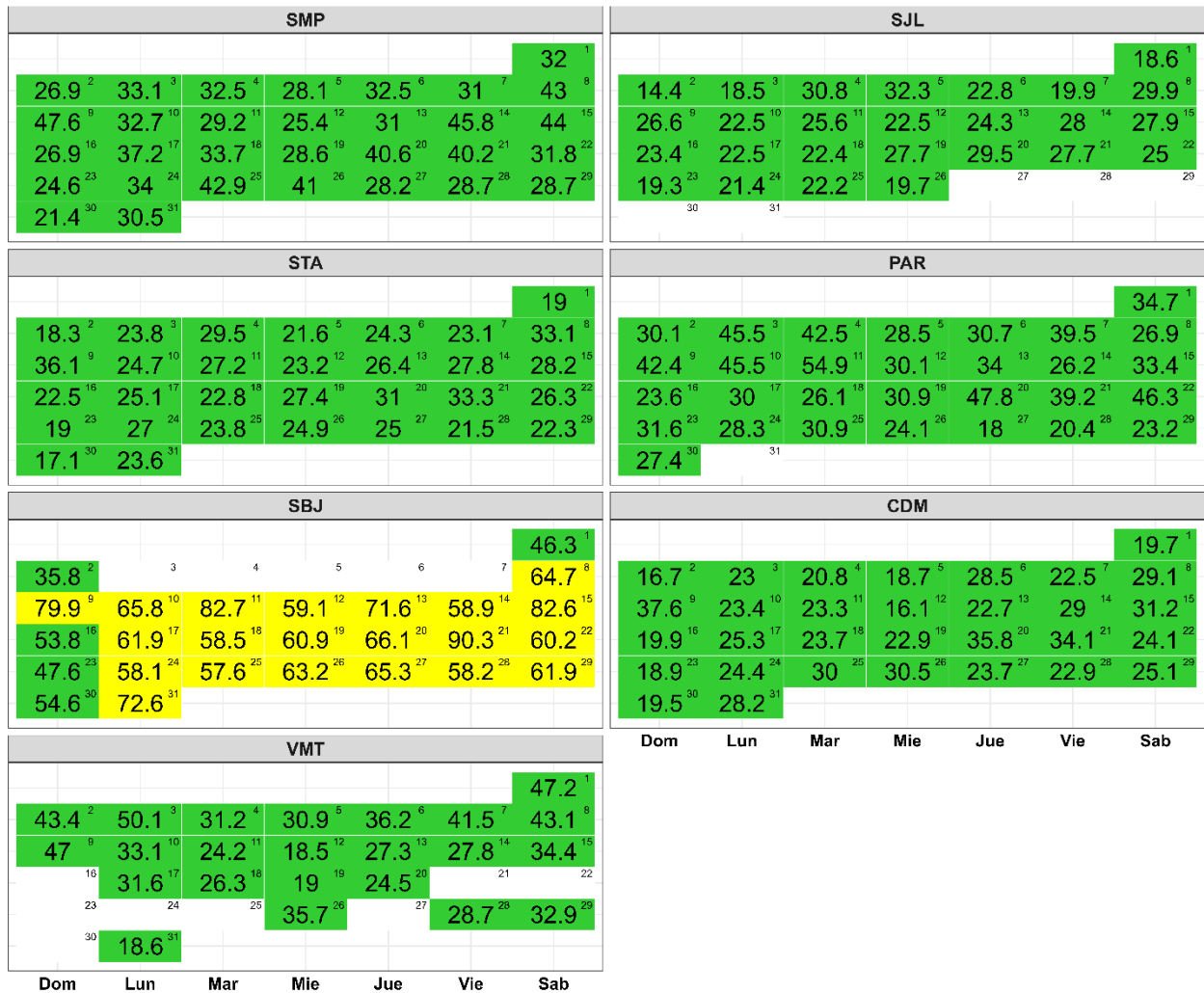
³⁰ Air Quality Index. A guide to Air Quality and Your Health. Obtenido de: https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/air_quality_brochure_02_14_0.pdf

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>

6.1. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM₁₀

La Figura N° 13 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM₁₀ 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 SJL, STA y PAR presentaron 26, 31 y 30 días con calidad del aire “Buena”, mientras que, la estación PAR presentó 18 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 21 días con calidad del aire “Moderada” y 5 días con calidad del aire “Buena”. Finalmente, la estación VMT presentó 23 días con calidad del aire “Buena”.

Figura N° 13. Índice de la Calidad del Aire para PM₁₀

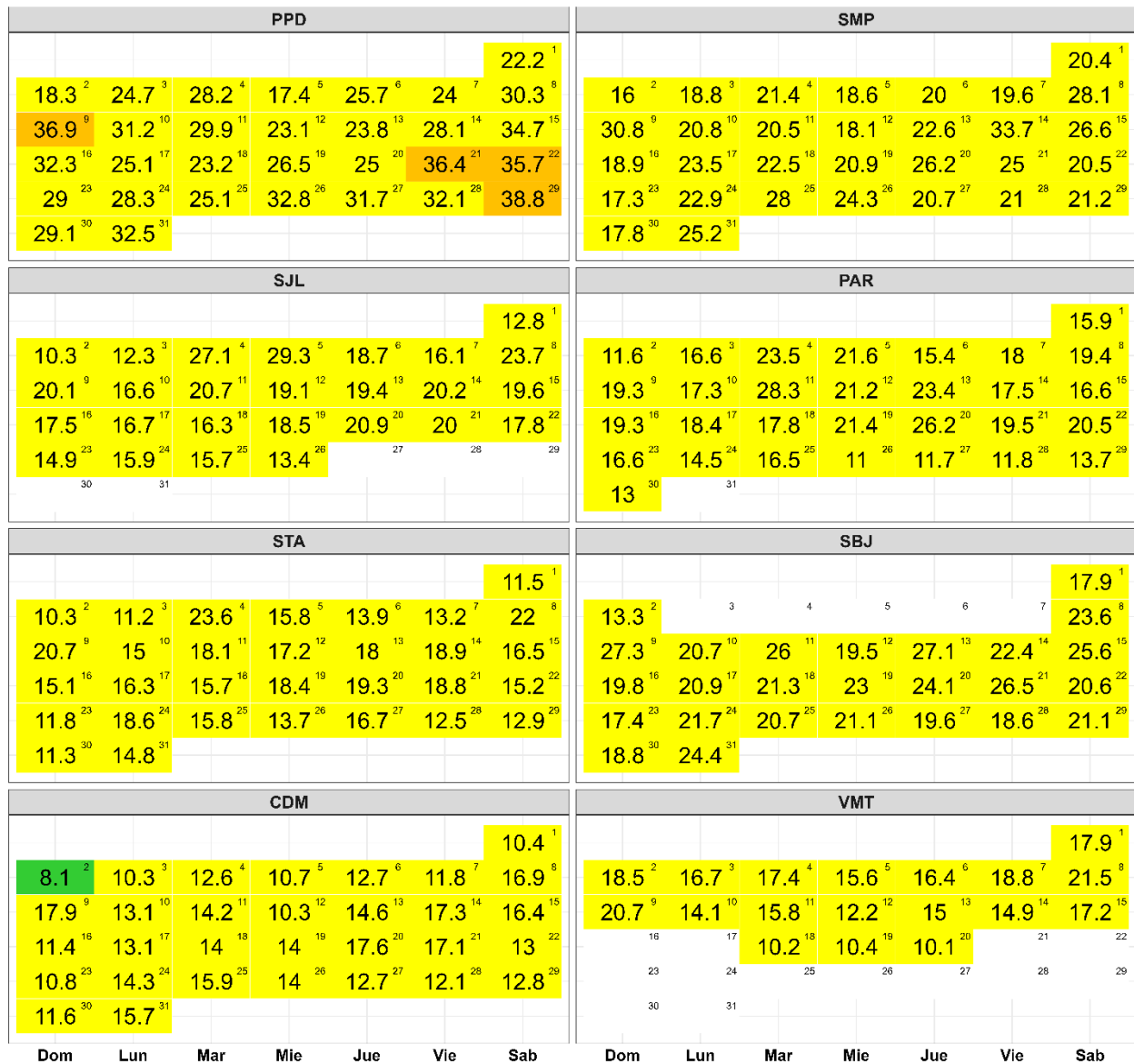


Concentración PM ₁₀ (µg/m³)		Estado	Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	54	Buena	0	50
55	154	Moderada	51	100
155	254	Insalubre para grupos sensibles	101	150
255	354	Insalubre	151	200

6.2. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM_{2,5}

La Figura N° 14 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM_{2,5} asociados a su respectivo estado de la calidad del aire. Se observó que, en la zona norte, la estación PPD presentó 4 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 27 días con calidad del aire “Moderada”; mientras que, la estación SMP presentó 31 días con calidad del aire “Moderada”. En la zona este, la estación SJL, STA y PAR presentaron 26, 31 y 30 días con calidad del aire “Moderada”. Por otro lado, en la zona centro, la estación SBJ presentó 26 días una calidad del aire “Moderada”; mientras que, la estación CDM presentó 30 días con calidad del aire “Moderada” y 1 día con calidad del aire “Buena”. Finalmente, en la zona sur, la estación VMT presentó 18 días con calidad del aire “Moderada”.

Figura N° 14. Índice de la Calidad del Aire para PM_{2,5}



Concentración PM _{2,5} (µg/m ³)		Estado	Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	9	Buena	0	50
9.1	35.4	Moderada	51	100
35.5	55.4	Insalubre para grupos sensibles	101	150
55.5	125.4	Insalubre	151	200

7. CONCLUSIONES

- Las condiciones meteorológicas influyeron en el comportamiento diario de los contaminantes atmosféricos en el AMLC durante el mes de marzo. 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 marzo, 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, la densidad de NO_2 en la columna vertical troposférica mostró un incremento, mientras que, en la tercera decadiaria, se registró una reducción, en la mayoría de las zonas. Los mayores valores se observaron en la zona este durante las tres decadiarias.
- Durante el periodo de análisis no hubo una superación del ECA – aire para PM_{10} , alcanzando un valor máximo de $90.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación SBJ. En el caso del $PM_{2,5}$, durante el periodo de monitoreo, no llegó a ser superado el ECA – aire, alcanzando un valor máximo de $38.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estas concentraciones estarían asociadas a las condiciones de actividad vehicular y meteorológicas presentes.
- 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 todas las estaciones. 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, la estación SBJ presentó más del 80% de los días monitoreados una calidad del aire “Moderada”. 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, PPD presentó 4 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles”.

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

De acuerdo con el pronóstico climático³² para el mes de abril 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 similar a lo registrado en el mes de marzo.

³² Documento: Boletín climático nacional – marzo 2025 SENAMHI. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02215SENA-141.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. 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 mayo del 2025