

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

Área metropolitana de Lima y Callao

Abril 2024



VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LIMA Y CALLAO (AMLC) – ABRIL 2024

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 abril^{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 – abril 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-110.pdf>

² Boletín climatológico de Lima – abril 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02232SENA-118.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.).

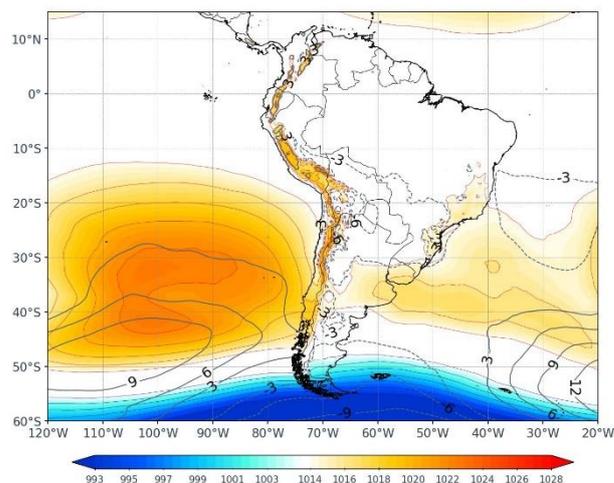
1. ANÁLISIS SINÓPTICO Y OCEÁNICO

Para un mejor entendimiento de las condiciones sinópticas a niveles bajos y oceánicos en el AMLC, se realizó un análisis por decadiarias (cada diez días), obteniéndose tres periodos de análisis. Es así que, para el mes de abril se conformó la decadiaria 1 (del 1 al 10), decadiaria 2 (del 11 al 20) y decadiaria 3 (del 21 al 30).

1.1. PRIMERA DECADIARIA (1 al 10 de abril)

En la primera decadiaria, se tiene que el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) presentó una configuración cuasi meridional, ligeramente desplazada hacia el suroeste en comparación con su posición climatológica⁶, con un doble núcleo ubicado en los 32°S – 42°S y 102°W, y valores de presión alrededor de los 1022 hPa, más intenso comparado con lo climático (Figura N°01a)¹. Los vientos incidentes sobre la costa del AMLC a nivel de superficie presentaron una dirección predominante del sur, con velocidades entre 1 y 3 m/s. Por otro lado, las Anomalías de Temperatura Superficial del Mar (ATSM) estuvieron cercanos a los +0.1°C frente a las costas de AMLC, lo cual repercutió en el incremento de temperaturas máximas y mínimas del aire por encima de su normal en +1.6°C y +1°C respectivamente².

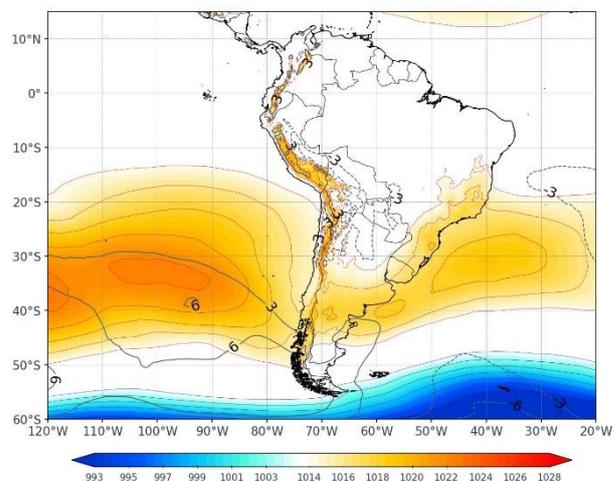
Figura N°01a. Variación del APS en la decadiaria 1.



1.2. SEGUNDA DECADIARIA (11 al 20 de abril)

Para la segunda decadiaria, el APS presentó una configuración zonal desplazada ligeramente hacia el suroeste con una intensidad de 1022 hPa respecto a lo climático y un núcleo sobre los 33°S y 100°W (Figura N° 01b)¹. Los vientos incidentes sobre la costa del AMLC a nivel de superficie presentaron una dirección predominante del sur y velocidades entre 3 m/s y 5 m/s. Por otro lado, respecto a las ATSM estas se encontraron alrededor de los -0.3°C frente a las costas del AMLC⁷, lo cual repercutió en el incremento de temperaturas máximas y mínimas del aire por encima de su normal en +1.1°C y -0.1°C respectivamente².

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



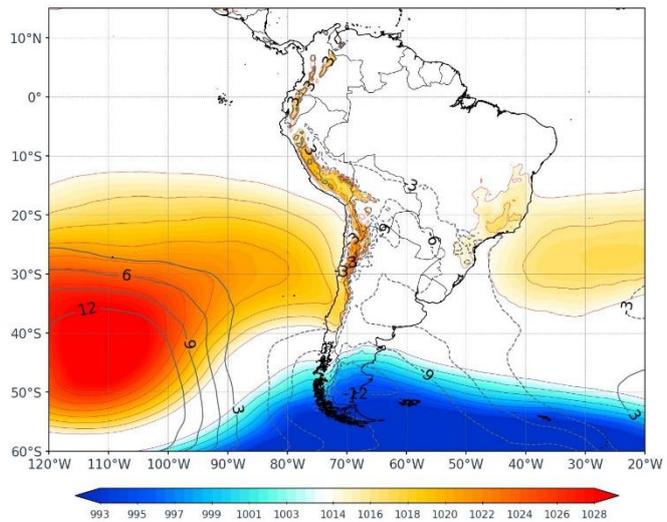
⁶ ¿Cómo responderán los anticiclones subtropicales del hemisferio sur al calentamiento global? Mecanismos y estacionalidad en las proyecciones de los modelos CMIP5 y CMIP6 (Pág. 704). Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-020-05290-7>

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 30 de abril)

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

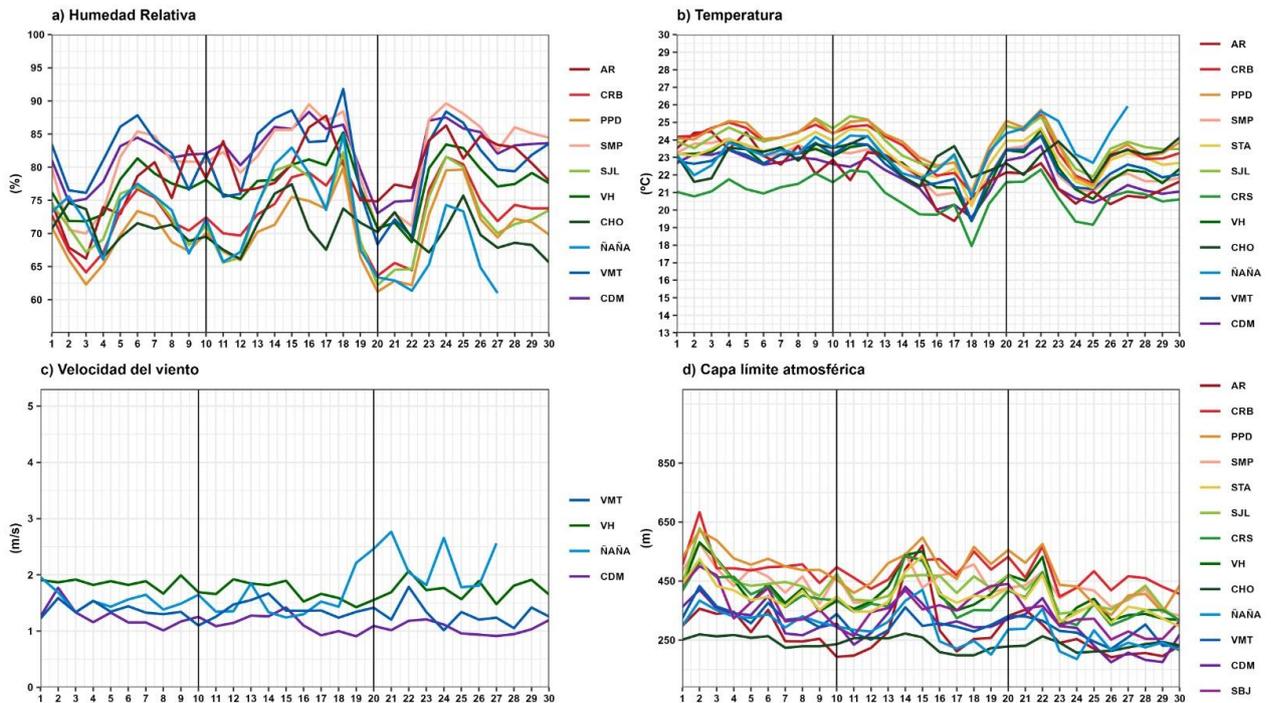
Finalmente, en la tercera decadiaria, el APS predominó desplazado hacia el suroeste, con un núcleo intenso y valores sobre los 1028 hPa sobre una amplia área alrededor de los 40°S - 110°W, intensidad alta respecto a lo climatológico (Figura N° 01c) ¹. Se presentaron vientos con una dirección predominante del sur, paralelos a la costa y velocidades entre 2 y 4 m/s. Por otro lado, la ATSM fue de -0.4°C frente a las costas de AMLC, lo cual sumado a días despejados durante esta decadiaria repercutió en las temperaturas máximas y mínimas del aire, ubicándose por encima de su normal en +2.5°C y +0.8°C, respectivamente².



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 (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 datos a 1 km del modelo operativo WRF.

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



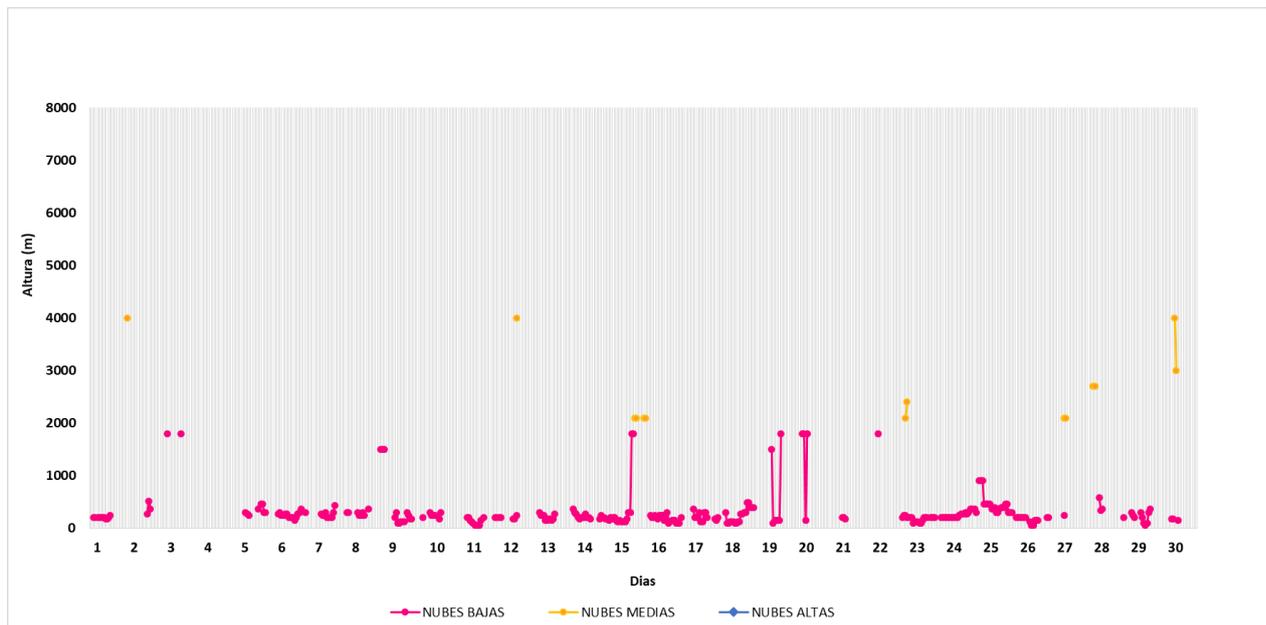
⁸ CLA: parte de la tropósfera influenciada directamente por la superficie terrestre, donde se concentra la mayor cantidad de sustancias contaminantes.

Con respecto a la humedad relativa (Figura N° 02a), durante la primera decadiaria se presentaron valores entre 62.3% a 87.8%, para la segunda decadiaria entre 61.2% a 91.7% y para la tercera decadiaria entre 61% a 89.6%, siendo las estaciones CDM y VMT aquellas que mantuvieron los valores promedio más altos, de 82.1% y 81.3%, respectivamente. Por otro lado, en relación con la temperatura (Figura N° 02b) durante la primera decadiaria se presentó valores entre 20.6 a 25.2 °C, para la segunda decadiaria entre 17.9 a 25.3 °C, y en la tercera decadiaria entre 19.2 a 25.7 °C, siendo las estaciones CRB y PPD las que alcanzaron los valores promedio más altos de temperatura, con 23.6 y 23.8 °C, respectivamente. 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 0.9 a 2.7 m/s durante todo el mes, siendo la estación VH la que alcanzó los valores promedio más altos, con un promedio mensual de 1.7 m/s. En el caso de la altura de la CLA (Figura N° 02d), las estaciones CRB, SJL y PPD alcanzaron los valores promedio más altos, con una altura promedio de 486, 427 y 485 m respectivamente, mientras que, en las estaciones CHO, ÑAÑA y AR se presentaron los valores promedio más bajos, con 280, 286 y 238 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 abril las nubes bajas (ABN menor a 2000 m) tuvieron mayor presencia, alcanzando un 55.4%. En contraste, la presencia de nubes medias (ABN mayor a 2000 m y menor a 6000 m) fue considerablemente menor, representando un 1.9%. Respecto a las horas con condición de despejado estas fueron del 42.6%. Durante el mes de abril predominaron las condiciones de nubes bajas seguido por periodos despejados, situación característica de inicios de otoño.

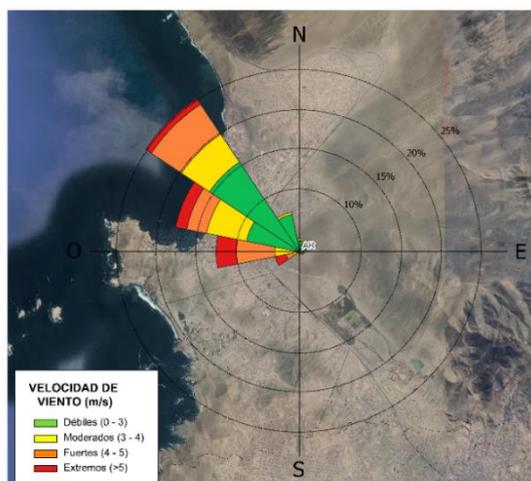
Figura N°03. Altura de base de la nube registrada en la estación Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (JCH).



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.

Por ejemplo: La Figura N° 04 muestra la rosa de vientos de la estación Antonio Raimondi la cual presenta una dirección predominante (con una frecuencia de vientos del 25%) proveniente 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).

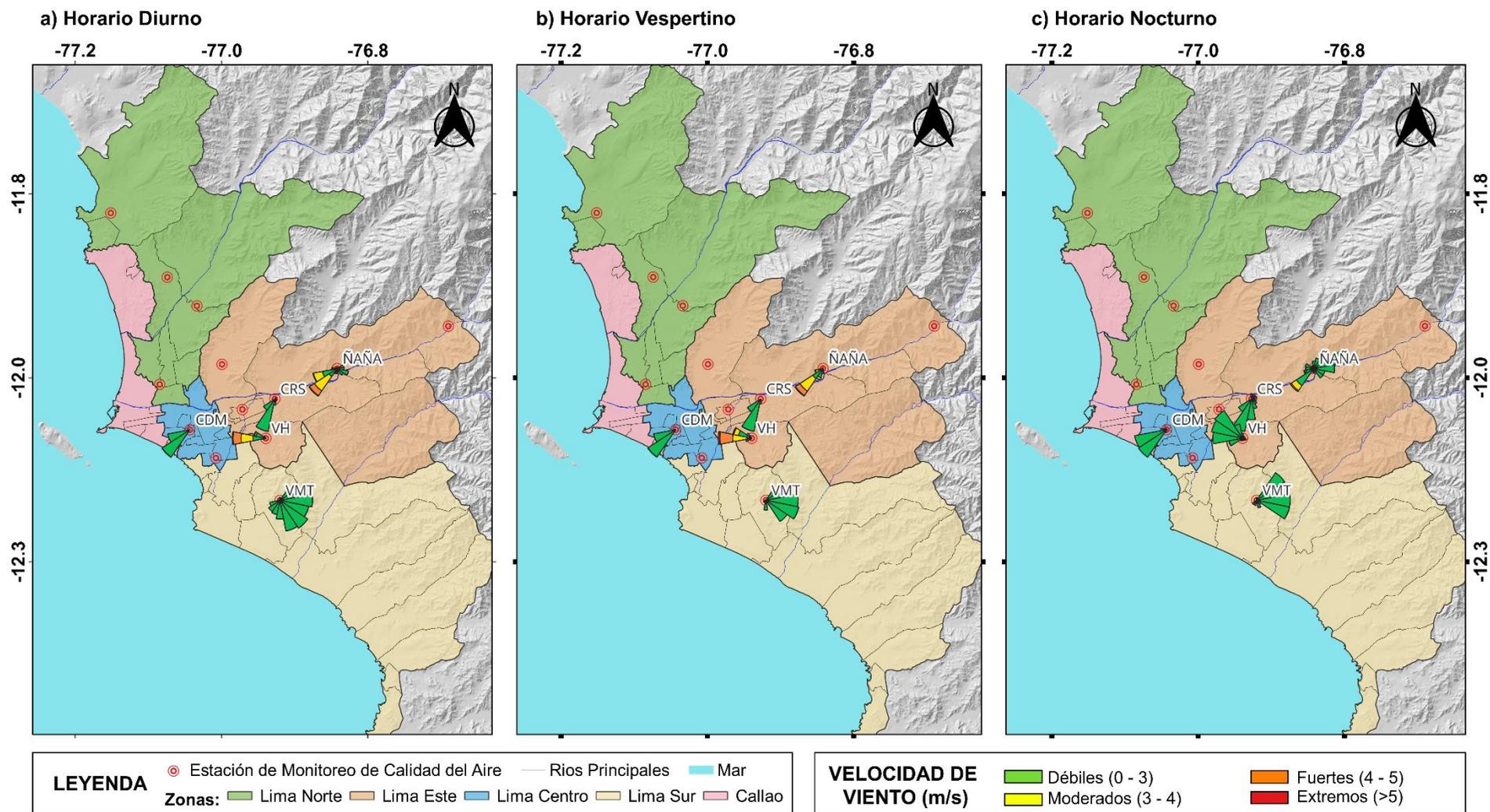
Es así como se observó, que en el horario diurno (Figura N° 05a), las estaciones CDM y ÑAÑA presentaron vientos con una dirección predominante del suroeste (SO) y con una intensidad máxima de débil y extrema, respectivamente. Por otro lado, la estación CRS presentó vientos con una dirección predominante del sur suroeste (SSO) y con una intensidad máxima de débil. La estación VH presentó una dirección predominante del oeste (O) y una intensidad máxima de extrema. Mientras que, la estación de VMT presentó vientos con una dirección predominante del sur sureste (SSE) y una intensidad máxima de débil.

Para el horario vespertino (Figura N°05b), las estaciones CDM y ÑAÑA presentaron vientos con una dirección predominante del suroeste (SO) y con intensidad máxima de débil y extrema respectivamente. Por otro lado, la estación de CRS presentó una dirección predominante del sur suroeste (SSO) con una intensidad máxima de débil, mientras que, VH presentó una dirección predominante del oeste (O) con una intensidad máxima de extrema. Finalmente, la estación de VMT presentó una dirección predominante del este sureste (ESE) y una intensidad máxima de débil.

Para el horario nocturno (Figura N° 05c), se observó que las estaciones CDM, CRS y ÑAÑA alcanzaron una dirección predominante del sur suroeste (SSO) con una intensidad máxima de débil, débil y fuerte, respectivamente. Por otro lado, la estación de VH presentó una dirección predominante del noreste (NE) con una intensidad máxima de débil. Finalmente, la estación VMT presentó una dirección predominante del este (E) y una intensidad máxima de débil.

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).

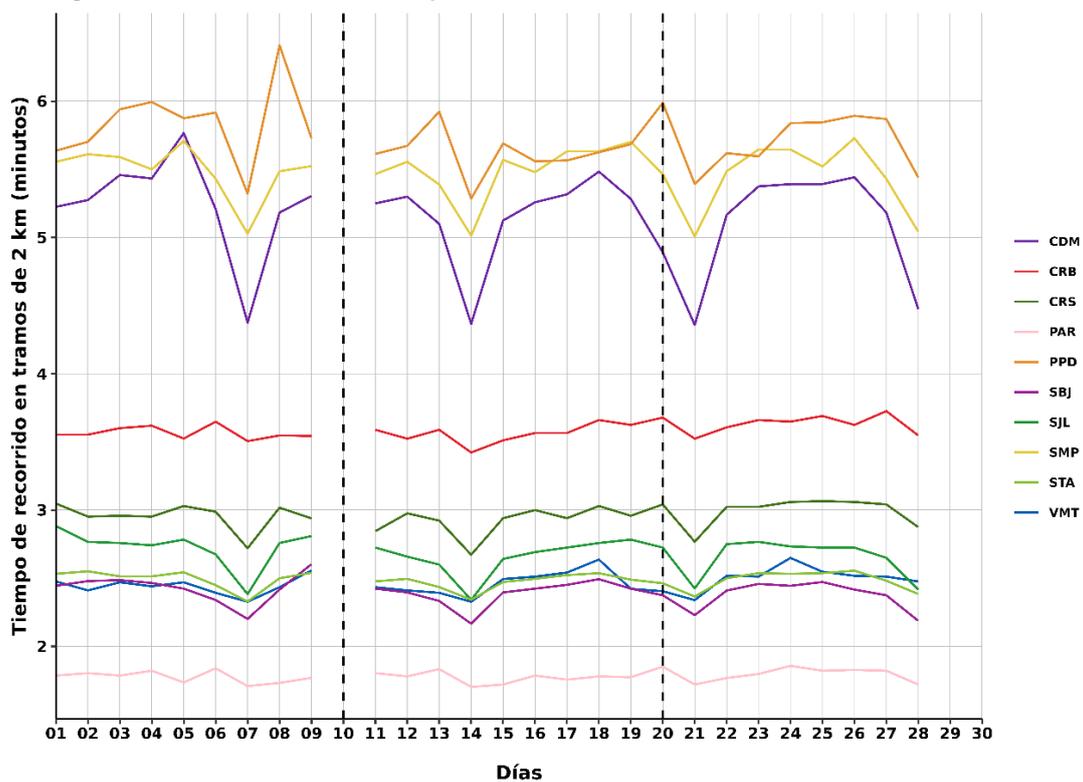
3. ACTIVIDAD VEHICULAR EN EL AMLC

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 valores promedio decadiario de tiempo de recorrido en tramos de 2 km, se registraron en los alrededores de las estaciones PPD, SMP y CDM, presentándose los valores más altos (con 5.8, 5.5 y 5.2 minutos, respectivamente) durante la primera decadiaria. En la segunda decadiaria, se observa una ligera reducción (hasta en 3%) del valor promedio decadiario en las estaciones PPD, SMP, CRS, SJL, STA, CDM y SBJ, mientras que en las estaciones CRB, PAR y VMT se aprecia un ligero incremento (hasta en 0.6%). Por último, en la tercera decadiaria, se evidencia un incremento del valor promedio decadiario en las estaciones PPD, CRB, PAR, CRS, STA y VMT (hasta en 2%), mientras que en las estaciones SMP, SJL, CDM y SBJ se aprecia una ligera reducción (hasta 1%).

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 Sjödin 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/>

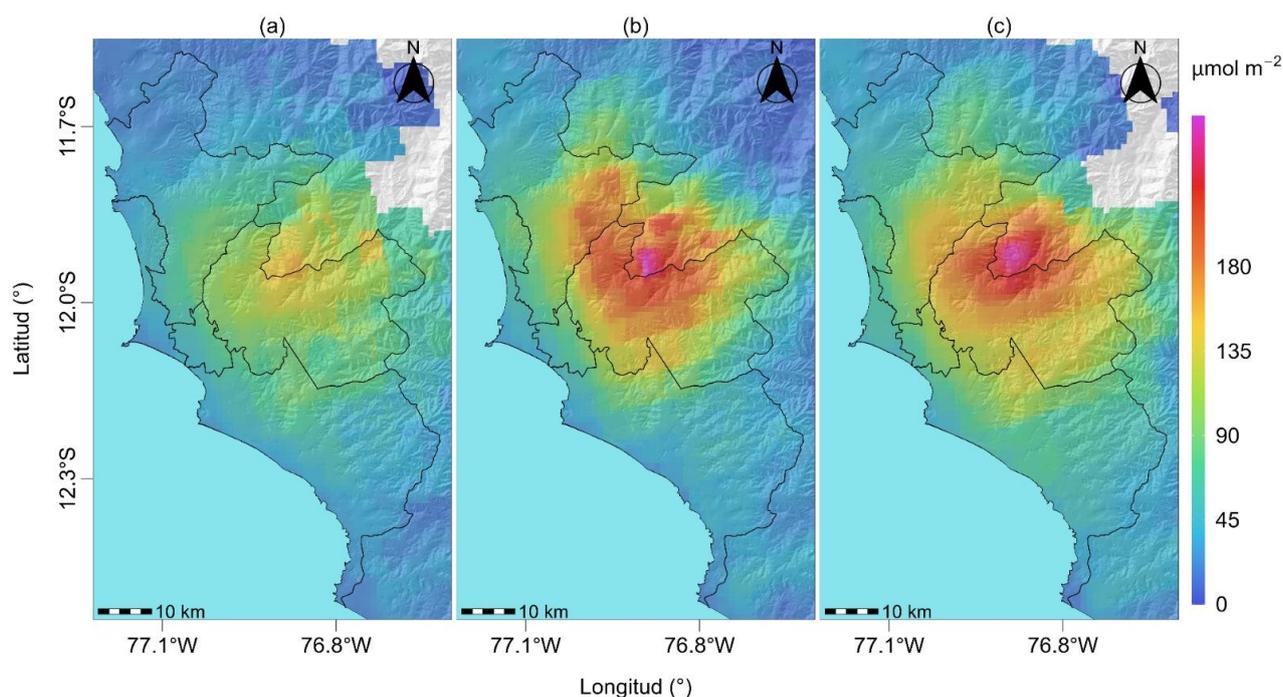
¹⁵ El web scraping es la práctica de recopilar datos de Internet de forma automatizada, mediante la escritura de programas que consultan servidores web y extraen información, usualmente en forma de archivos HTML, sin necesidad de interactuar con una interfaz de programación de aplicaciones (API) o navegadores web. Esta técnica ha sido conocida por diversos términos a lo largo del tiempo, pero actualmente se prefiere el término "web scraping". 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

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

La Figura N° 07, 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 abril. Es así como, la Figura N° 07a, muestra la distribución espacial promedio de NO₂ en la primera decadiaria (1 a 10 de abril), la Figura N° 07b, en la segunda decadiaria (11 al 20 de abril) y la Figura N° 07c en la tercera decadiaria (21 al 30 de abril).

Figura N° 07. 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 las zonas este y norte, mientras que la menor densidad se observó en la zona oeste. Durante la primera decadiaria, los mayores valores fueron de 159.3 μmol/m² en la zona este y de 99.4 μmol/m² en la zona norte. En la segunda decadiaria, se presentó un incremento de la densidad del NO₂ en la columna vertical troposférica en todas las zonas, siendo mayor en la zona norte (49.5% mayor que la primera decadiaria); los valores máximos fueron de 242.6 μmol/m² en la zona norte y 196.8 μmol/m² en la zona este. En la tercera decadiaria, se presentó una reducción de la densidad del NO₂ en la columna vertical troposférica en las zonas este y norte (6.4% y 14.2% menor que la segunda decadiaria, respectivamente), mientras que, en las zonas sur, centro y oeste se registró un ligero incremento (0.9%, 18.1% y 2.8% mayor que la segunda decadiaria, respectivamente); los valores máximos fueron de 227.1 μmol/m² en la zona norte y 168.9 μmol/m² en la zona este.

Cabe precisar, que el origen del NO₂ está vinculado a la oxidación del nitrógeno atmosférico por combustión, principalmente de la actividad vehicular.^{17,18}. Es así como los tiempos de recorrido (congestión vehicular ver Figura N°06) están directamente relacionados a la presencia de NO₂ en la atmósfera, sin embargo, las condiciones meteorológicas ejercen una influencia tal, que puede favorecer su incremento, como una reducción en la altura de la CLA (segunda y tercera decadiaria, ver Figura N° 07b, Figura N° 07c y Figura N° 02d).

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>

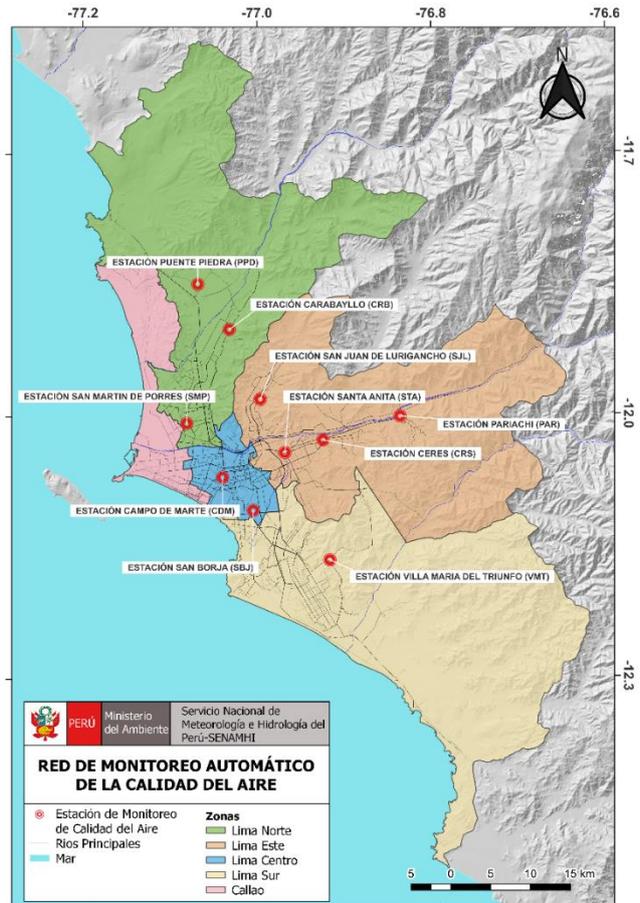
5. RED DE MONITOREO AUTOMÁTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL AMLC

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° 08.

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°08. 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)

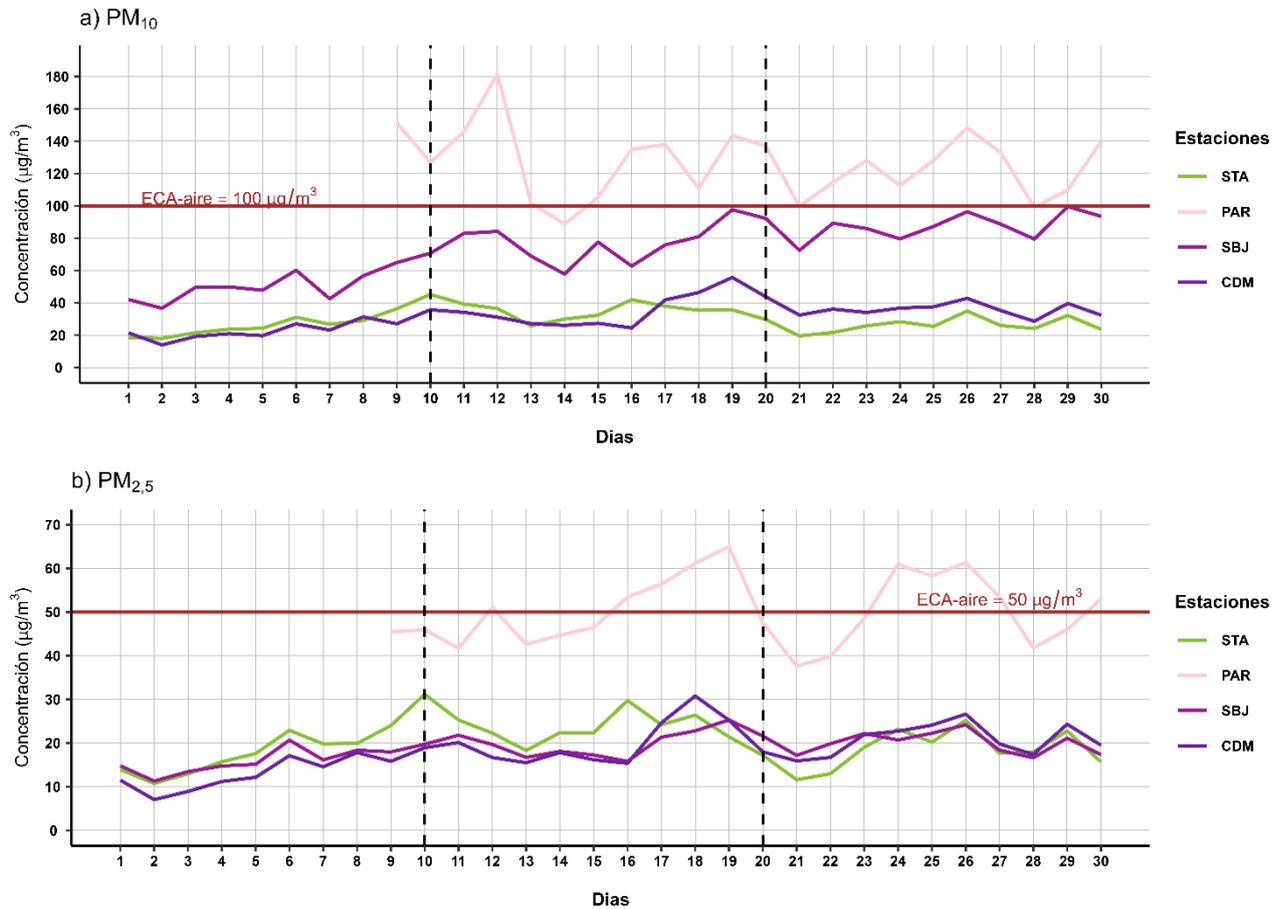
El material particulado hace referencia a partículas sólidas o líquidas, cuyo tamaño es más grande que una molécula, pero suficientemente pequeño para mantenerse suspendido en el aire. Pueden contener en su estructura iones inorgánicos, compuestos metálicos, carbono elemental, compuestos orgánicos y 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.

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/>

Figura N°09. Variación diaria del PM₁₀ y PM_{2.5} (µg/m³) en el AMLC.



En la Figura N° 09a, se observa que, la única estación que registró concentraciones diarias de PM₁₀ superiores al ECA-aire de 100 µg/m³ (como promedio diario) fue la estación PAR, esto durante casi todo el periodo de monitoreo, presentando el valor máximo de 181.5 µg/m³ el viernes 12 de abril (las concentraciones más altas se registraron entre las 7 y 9 horas), lo cual estaría asociado a la actividad vehicular en la zona este (durante días particulares) y el levantamiento de polvo por obras de mantenimiento, así como, una reducción de la humedad relativa (en horas de mayor concentración). Por otro lado, en general se registró un incremento de las concentraciones del PM₁₀ hacia la segunda decadiaria, causado por una reducción de la altura de la CLA (Ver Figura N° 02d), mientras que hacia la tercera decadiaria, se observó una disminución en las concentraciones de la mayoría de las estaciones, de manera particular en la estación STA, causado por un incremento en la velocidad del viento que habría permitido la dispersión del contaminante (ver Figura N° 02c).

En la Figura N° 09b, se evidencia que de la misma manera que en PM₁₀, la única estación que registró concentraciones diarias de PM_{2.5} superiores al ECA-aire de 50 µg/m³ (como promedio diario) fue la estación PAR tanto en la segunda como en la tercera decadiaria, presentando el valor máximo de 65 µg/m³ el viernes 19 de abril (las concentraciones más altas se registraron entre las 7 y 9 horas), lo cual estaría asociado a un incremento en los viajes en transporte público durante el día viernes, la quema de residuos, y un incremento de la humedad relativa (en horas de mayor concentración). Se destaca que, en general, las concentraciones tuvieron una tendencia al incremento hacia la segunda decadiaria, causada por un incremento de la humedad relativa y una disminución de la temperatura ²⁰, ¡Error! Marcador no definido., ¡Error! Marcador no definido., , asimismo, hacia la tercera decadiaria se presentó una tendencia a la disminución de las concentraciones, causado por una reducción en promedio de la humedad relativa (ver Figura N° 02a y 02b).

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 CO²¹.

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 O₃²², siendo que, el pico del ciclo del O₃ aparece aproximadamente 6 horas después del pico del NO y 5 horas después del NO₂²³. 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 temperatura²⁴.

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 amplio²⁵. 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.

²¹ 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>

²² 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

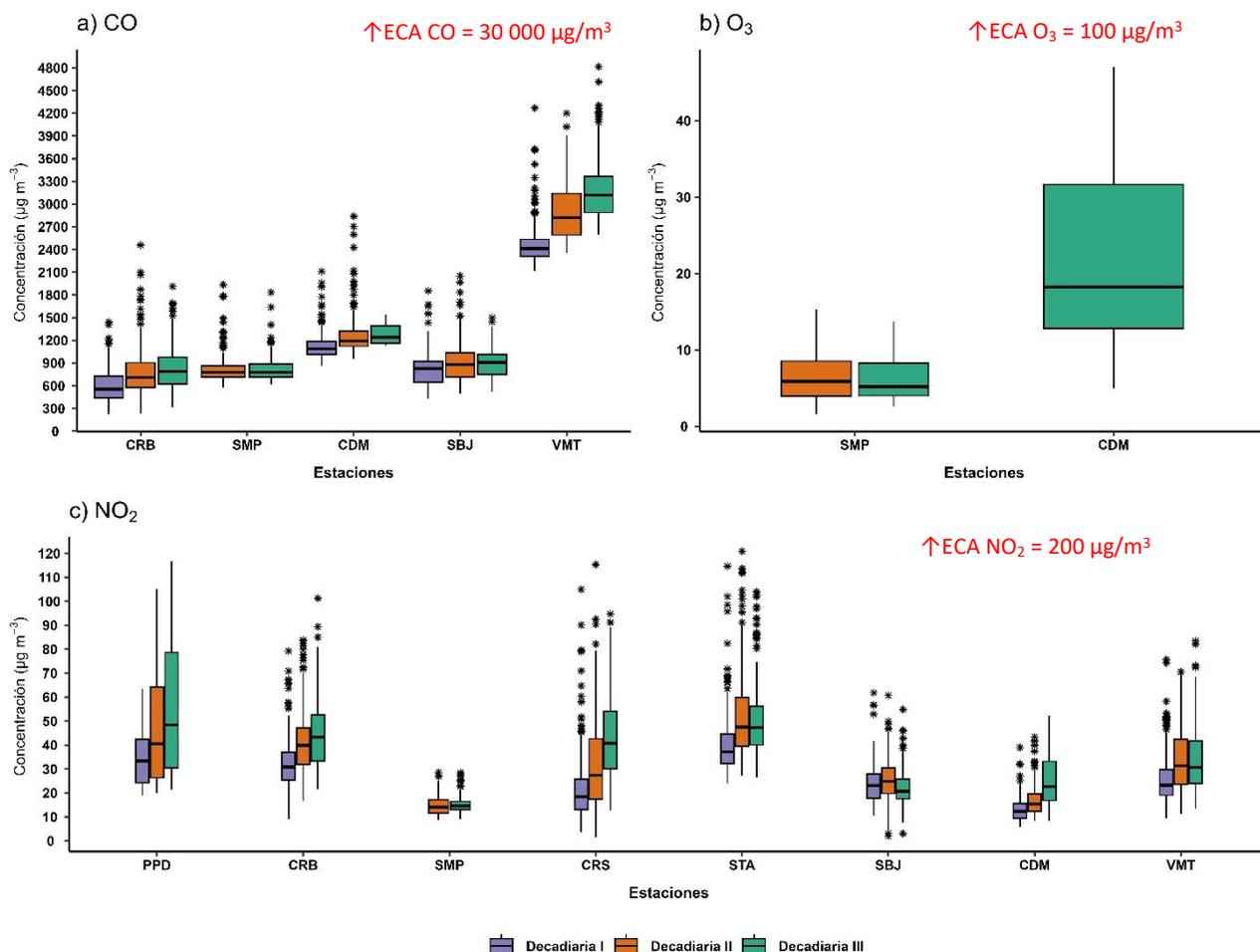
²³ Análisis de la Relación entre O₃, NO y NO₂ en Tianjin, China. Obtenido de: <https://aaqr.org/articles/aaqr-10-07-0a-0055>

²⁴ 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

²⁵ 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>

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

Figura N°10. Variación de las concentraciones del CO, O₃ y NO₂ (µg/m³) por decadiaria en el AMLC.



En la Figura N° 10a, 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 el periodo de monitoreo. Se destaca que, en la zona norte, centro y sur, el promedio decadiario muestra un incremento de las concentraciones, causada por un ligero incremento de los tiempos de recorrido (ver Figura N° 06) así como un incremento en la humedad relativa y una ligera disminución en la temperatura (ver Figura N° 02a y Figura N° 02b)

Respecto a la Figura N° 10b, las concentraciones promedio móvil de cada 8 horas de O₃ registradas en las estaciones no superaron el valor de su ECA-aire de 100 µg/m³ (como máxima media de 8 horas) durante los días monitoreados. Se destaca que, en general, las concentraciones registradas en la estación CDM (de la zona centro) fueron mayores que las registradas en la estación SMP (de la zona norte), lo cual estaría asociado a las concentraciones del NO₂ presentadas en estas mismas estaciones, ya que el NO₂ actúa como precursor de la formación de O₃. Asimismo, en todos los casos, las mayores concentraciones se registraron en los horarios posteriores al periodo de máxima radiación solar²² (comprendido entre las 11:00 horas y 15:00 horas).

En la Figura N° 10c, 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 el período de monitoreo. Se destaca que, en general, las concentraciones tuvieron una tendencia al incremento, lo cual también se ve reflejado en los mapas de distribución espacial de la columna de NO₂ en la tropósfera (ver Figura N° 07). La mayor concentración se reportó en la estación STA durante la segunda decadiaria, alcanzando el valor de 120.8 µg/m³ el lunes 15 de abril a las 14:00 horas (las concentraciones más altas se registraron entre las 12 y 14 horas), lo cual estaría asociado a la actividad vehicular en la zona este (durante días particulares, ver Figura N° 06).

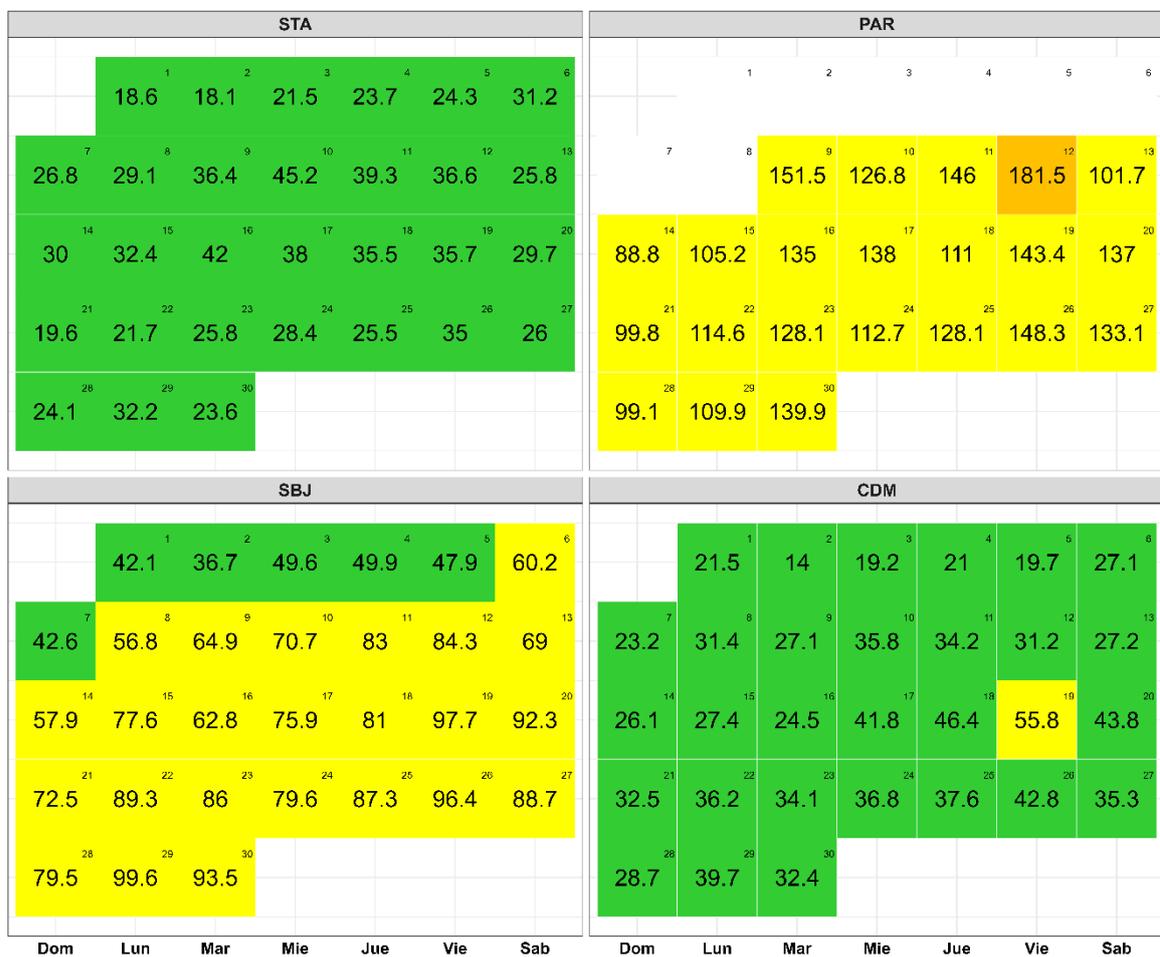
6. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL AMLC

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 salud²⁷.

6.1. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM₁₀

La Figura N° 11 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM₁₀ asociados a su respectivo estado de la calidad del aire, en la cual se observa que la estación STA presentó 30 días con calidad del aire “Buena”. La estación PAR presentó 1 día con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 21 días con calidad del aire “Moderada”. La estación SBJ presentó 24 días con calidad del aire “Moderada” y 6 días con calidad del aire “Buena”. La estación CDM presentó 1 día con calidad del aire “Moderada” y 29 días con calidad del aire “Buena”.

Figura N° 11. Índice de la Calidad del Aire para PM₁₀



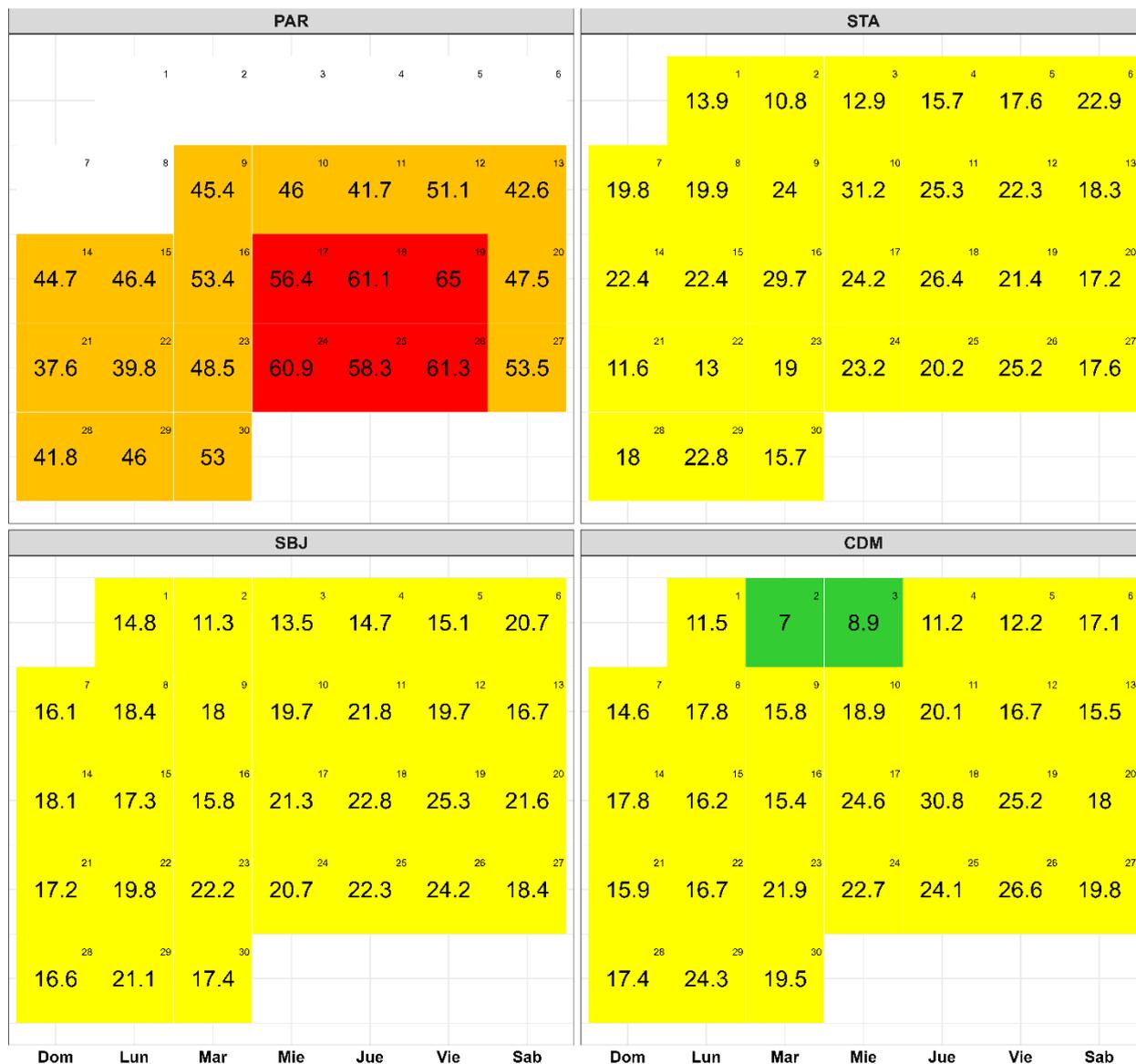
Concentración PM ₁₀ (µg/m ³)		Estado	Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	54		0	50
55	154	Buena	51	100
155	254	Moderada	101	150
255	354	Insalubre para grupos sensibles	151	200
		Insalubre		

²⁷ Air Quality Index. A guide to Air Quality and Your Health. Obtenido de: https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/aji_brochure_02_14_0.pdf

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

La Figura N° 12 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM_{2,5} asociados a su respectivo estado de la calidad del aire, en la cual se observó que la estación PAR presentó 6 días con calidad del aire “Insalubre” y 16 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles”. Las estaciones STA y SBJ presentaron 30 días con calidad del aire “Moderada”. Finalmente, la estación CDM presentó 28 días con calidad del aire “Moderada” y 2 días con calidad del aire “Buena”.

Figura N° 12. 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		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 abril. La persistencia de temperaturas altas y el incremento de la velocidad de vientos favorecieron el incremento del PM₁₀. Asimismo, el incremento de los valores de humedad relativa y actividad vehicular (expresada en términos de tiempo de recorrido) estuvieron vinculados a concentraciones altas de PM_{2,5}.
- Durante el mes de abril, los valores más altos de tiempo de recorrido (mayor congestión vehicular), se presentaron en la primera decadiaria y sobre todo en los alrededores de las estaciones PPD, SMP y CDM.
- Se observa un incremento en la densidad de NO₂ en la columna vertical troposférica hacia la segunda decadiaria, especialmente en las zonas este y norte. Estos valores se vieron reflejados en los valores de concentración en superficie registrados por las estaciones de la REMCA.
- Se superó el ECA – aire para PM₁₀ en la estación PAR durante casi todo el periodo de monitoreo, alcanzando un valor máximo de 181.5 µg/m³. En el caso del PM_{2,5}, se superó el ECA – aire también en la estación PAR, alcanzando el valor máximo de 65 µg/m³ durante la segunda y tercera decadiaria. Estas concentraciones estarían asociadas a las condiciones meteorológicas y de actividad vehicular presentes.
- Durante el período de análisis, las concentraciones diarias de CO, NO₂ y O₃ 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 de contaminantes atmosféricos, así como a la actividad vehicular.
- Con respecto al ICA para PM₁₀, de los días monitoreados, se observó que la estación PAR registró la calidad del aire más baja, con un día de calidad del aire "Insalubre para grupos sensibles" y el resto de los días "Moderada". Le sigue la estación SBJ, que presentó un 80% de los días con calidad del aire "Moderada". De manera similar, para el contaminante PM_{2,5}, la estación PAR mostró la calidad del aire más baja, con cerca del 25% de los días registrando una calidad del aire "Insalubre" y el resto de los días "Insalubre para grupos sensibles".

8. PERSPECTIVAS DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL MES DE MAYO 2024

De acuerdo al pronóstico climático²⁸ para el mes de mayo del 2024, se espera que en el AMLC las temperaturas máximas se ubiquen dentro de su valor normal, mientras que las mínimas presenten un escenario de normal - inferior. Considerando el comportamiento estacional de estas variables meteorológicas, se esperaría un ligero incremento de las concentraciones de PM_{2,5}, característico de la estación otoño.

²⁸ Documento: Boletín climático nacional – abril 2024 SENAMHI. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02215SENA-130.pdf>

Para más información sobre el presente informe, contactar con:

Ing. Jhojan Pool Rojas Quincho

jprojas@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

Ing. Elvis Anthony Medina Dionicio

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 junio del 2024

industrias

parque
automotor

