

BOLETÍN VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE

Área metropolitana de Lima y Callao

Junio 2024



VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LIMA Y CALLAO (AMLC) – JUNIO 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 junio^{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 – junio 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-112.pdf>

² Boletín climatológico de Lima – junio 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02232SENA-120.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.).

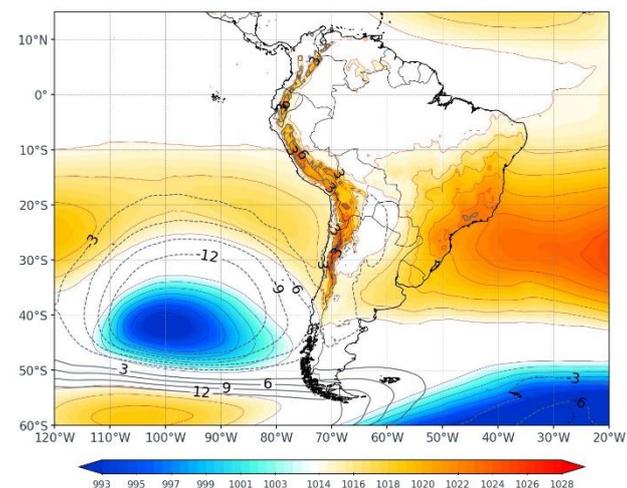
1. ANÁLISIS SINÓPTICO Y OCEÁNICO

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 junio 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 junio)

En la primera decadiaria, se tiene que el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) se mantuvo debilitado o desplazado hacia longitudes más al oeste debido al dominio de un sistema de baja presión, núcleo en los 40°S y 100°W y valores de presión por debajo de los 993 hPa reflejado con valores de anomalías muy bajas sobre esta zona (Figura N°01a)¹. Los vientos incidentes sobre la costa del AMLC a nivel de superficie presentaron una dirección predominante del sur, paralelos a la línea costera y con velocidades entre 2 y 5 m/s. Por otro lado, las Anomalías de Temperatura Superficial del Mar (ATSM) estuvieron cercanos a los -0.8°C frente a las costas de AMLC, lo cual repercutió en las anomalías de temperaturas máximas y mínimas del aire, encontrándose en -1°C y -2°C, respectivamente².

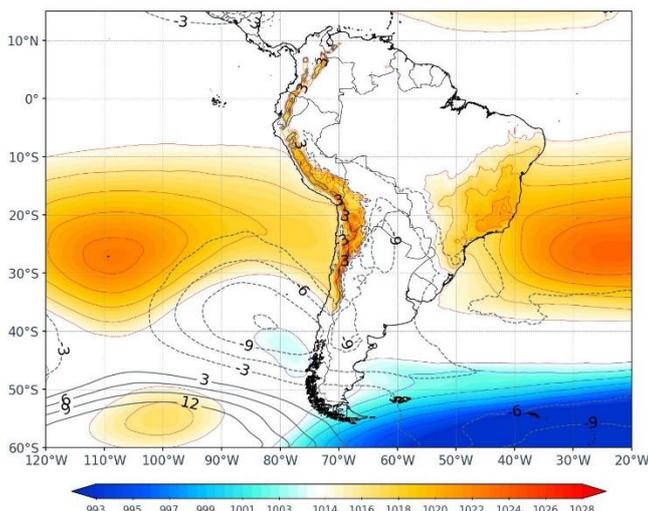
Figura N°01a. Variación del APS en la decadiaria 1.



1.2. SEGUNDA DECADIARIA (11 al 20 de junio)

Para la segunda decadiaria, el APS presentó una configuración meridional desplazado hacia el oeste con una intensidad superior a los 1022 hPa y núcleo sobre los 28 ° S - 108 ° 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 -0.8°C frente a las costas del AMLC⁶, lo cual repercutió en el incremento de temperaturas máximas y mínimas del aire por debajo de su normal en -0.9°C y -1.3°C respectivamente².

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

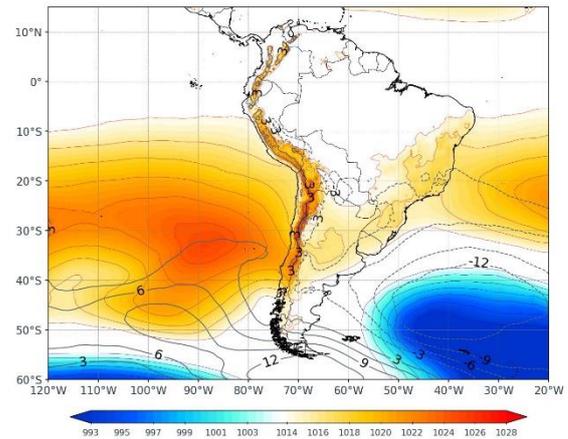


⁶ Temperatura superficial del mar y anomalías térmicas en el litoral peruano. Obtenido de: https://www.imarpe.gob.pe/imarpe/index2.php?id_seccion=1017803020000000000000

1.3. TERCERA DECADIARIA (21 al 30 de junio)

Finalmente, en la tercera decadiaria, el APS predominó sobre su posición climática con valores de presión alrededor de los 1025 hPa sobre los 34°S - 87°W, intensidad alta respecto a su climatología (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 -0.5°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 debajo de su normal en -1.7°C para ambas².

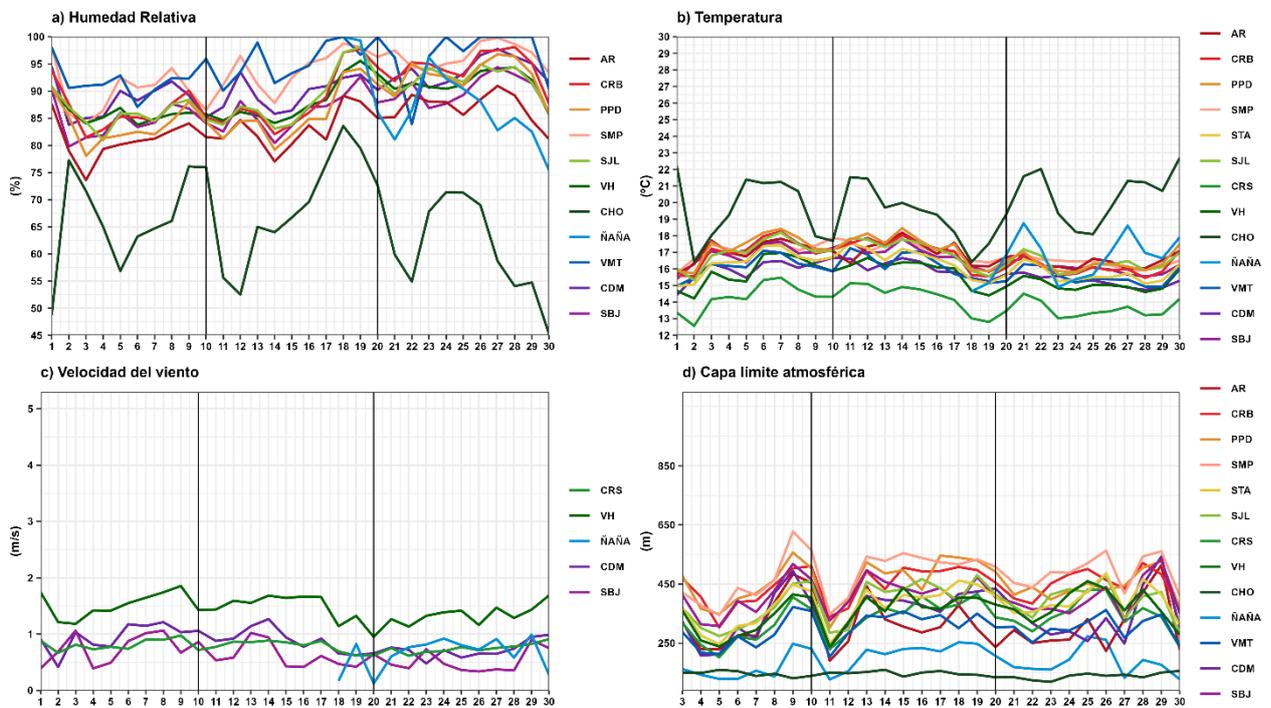
Figura N°01c. Variación del APS en la decadiaria 3.



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 (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)⁷ 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



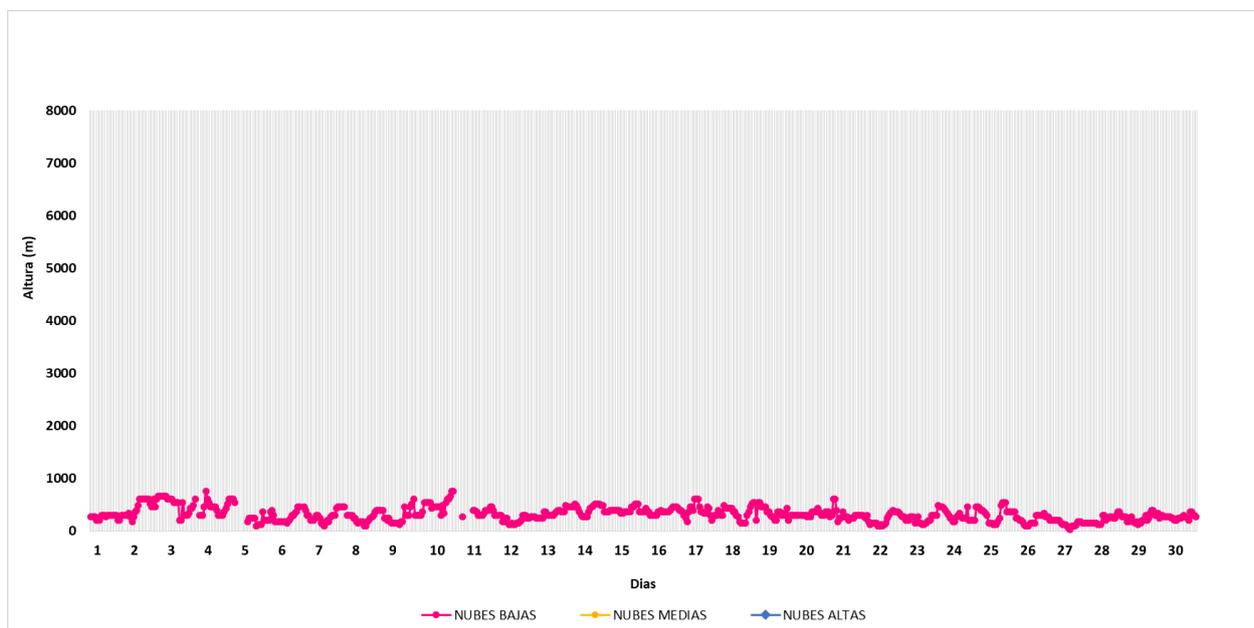
⁷ CLA: parte de la tropósfera influenciada directamente por la superficie terrestre, donde se concentra la mayor cantidad de sustancias contaminantes.

Con respecto a la humedad relativa (Figura N° 02a), durante la primera decadiaria se presentaron valores entre 48.7 a 98.1%, para la segunda decadiaria entre 52.5 a 98.7% y para la tercera decadiaria entre 45.2 a 100%, siendo las estaciones SMP y VMT aquellas que mantuvieron los promedios de humedad más altos, de 93.6 y 94.8%, respectivamente. En relación con la temperatura (Figura N° 02b) durante la primera decadiaria se presentó valores entre 12.5 a 22.2°C, para la segunda decadiaria entre 12.8 a 21.5 °C, y en la tercera decadiaria entre 13.0 a 22.7 °C, siendo la estación de CHO la que alcanzó el valor promedio más alto de temperatura de 19.8°C (cabe mencionar que, esta estación al encontrarse ubicada en el extremo este y en un nivel altitudinal mayor, presenta condiciones meteorológicas diferentes a los presentados por las estaciones ubicadas dentro del AMLC, especialmente con las variables de temperatura y humedad relativa). 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 1.8 m/s durante todo el mes, siendo la estación VH la que alcanzó los valores promedio más altos, con un promedio mensual de 1.5 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 446, 453 y 483 m respectivamente, mientras que, en las estaciones CHO y ÑAÑA se presentaron los valores promedio más bajos, con 144.1 y 189.5 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 ceilómetro⁸ de la EMA Aeropuerto Internacional Jorge Chávez ubicada en el Callao (Figura N° 03), se observó que, durante el mes de junio, las nubes bajas (ABN menor a 2000 m) tuvieron mayor presencia, superando el 96.8%. Con respecto a la presencia de nubes medias (ABN mayor a 2000 m y menor a 6000 m) durante el mes de junio, no se presentaron nubes dentro de esta capa. Respecto a las horas con condición de despejado estas fueron del 3.2%. En junio predominaron las condiciones de nubes bajas, situación característica de fines de otoño e inicios de invierno.

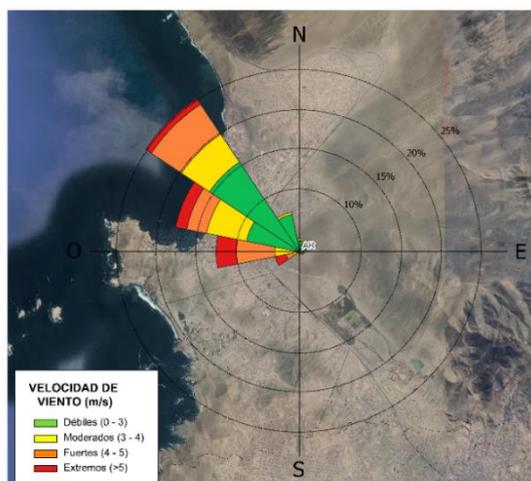
Figura N°03. Altura de base de la nube registrada en la estación Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (JCH).



⁸ Instrumento que mide la altura de la base de la nube más cercana a superficie tomando a esta 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 velocidad⁹.

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).

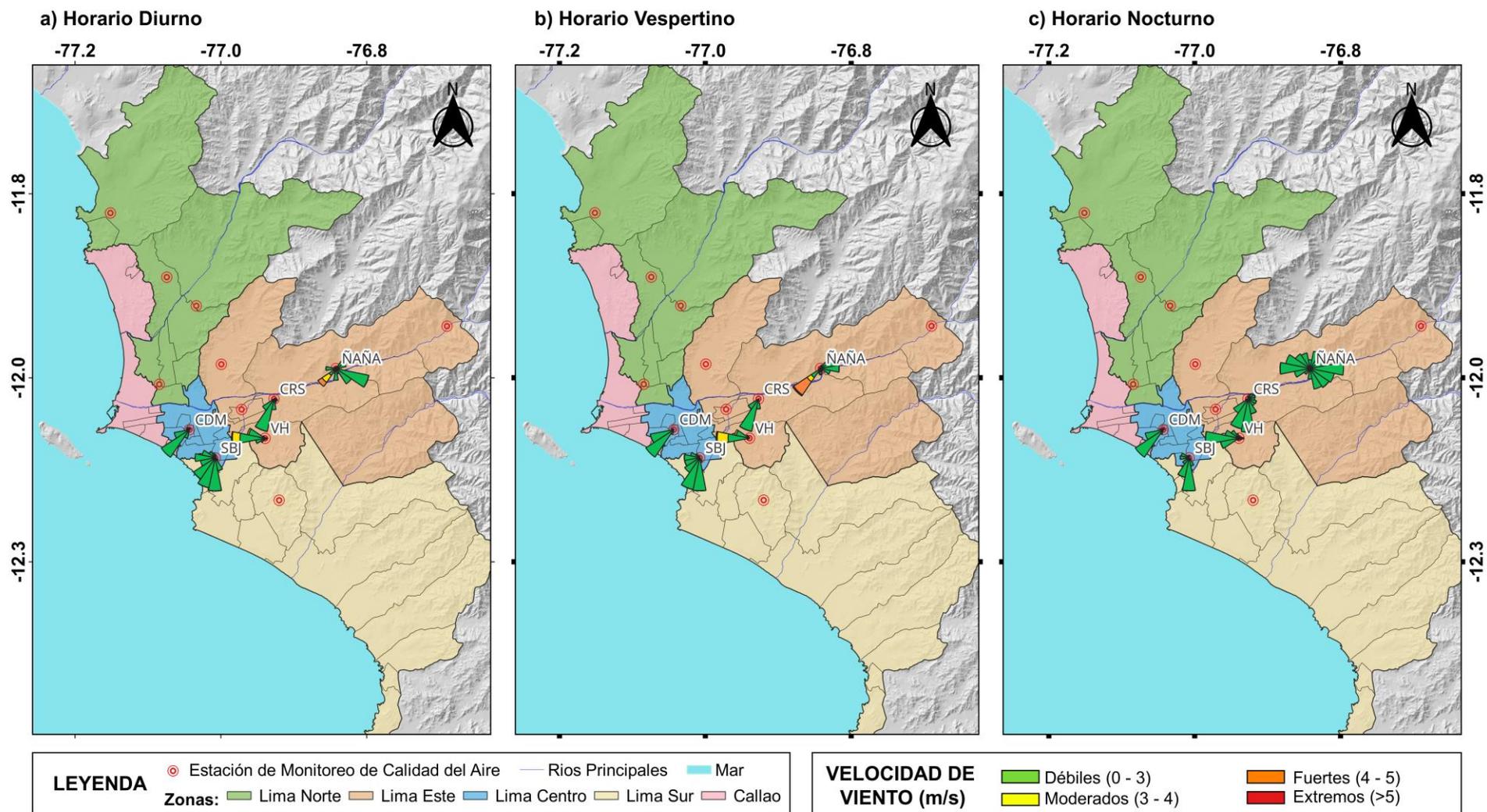
Es así como se observó, que en el horario diurno (Figura N° 05a), las estaciones CDM y CRS presentaron vientos con una dirección predominante del suroeste (SO) y sur suroeste (SSO), respectivamente y con una intensidad máxima de débil. La estación VH presenta una dirección predominante del oeste (O) con una intensidad máxima de fuerte, por otro lado, la estación SBJ presentó vientos con una dirección predominante del sur (S) y una intensidad máxima de débil. Finalmente, la estación Ñaña presenta una dirección predominante del este sureste (ESE), con una intensidad máxima de débil.

Para el horario vespertino (Figura N°05b), las estaciones CDM y CRS presentaron vientos con una dirección predominante del suroeste (SO) y sur suroeste (SSO) respectivamente, con intensidad máxima de débil, mientras que, la estación VH presenta una dirección predominante del oeste (O) con una intensidad de fuerte, por otro lado, la estación SBJ presentó vientos con una dirección predominante del sur (S) y una intensidad máxima de débil. Finalmente, la estación Ñaña presenta una dirección predominante del suroeste (SO) y una intensidad máxima de extrema.

Para el horario nocturno (Figura N° 05c), se observó que las estaciones CDM y CRS presentaron vientos con una dirección predominante del suroeste (SO) y sur suroeste (SSO), respectivamente, y una intensidad máxima de débil. Por otro lado, la estación de VH presentó vientos con una dirección predominante del oeste (O) y una intensidad máxima de débil. Por otro lado, SBJ presentó vientos con una dirección predominante del sur (S) y una intensidad máxima de débil. Finalmente, la estación Ñaña presentó vientos con una dirección predominante del este (E) y una intensidad máxima de débil.

⁹ 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).

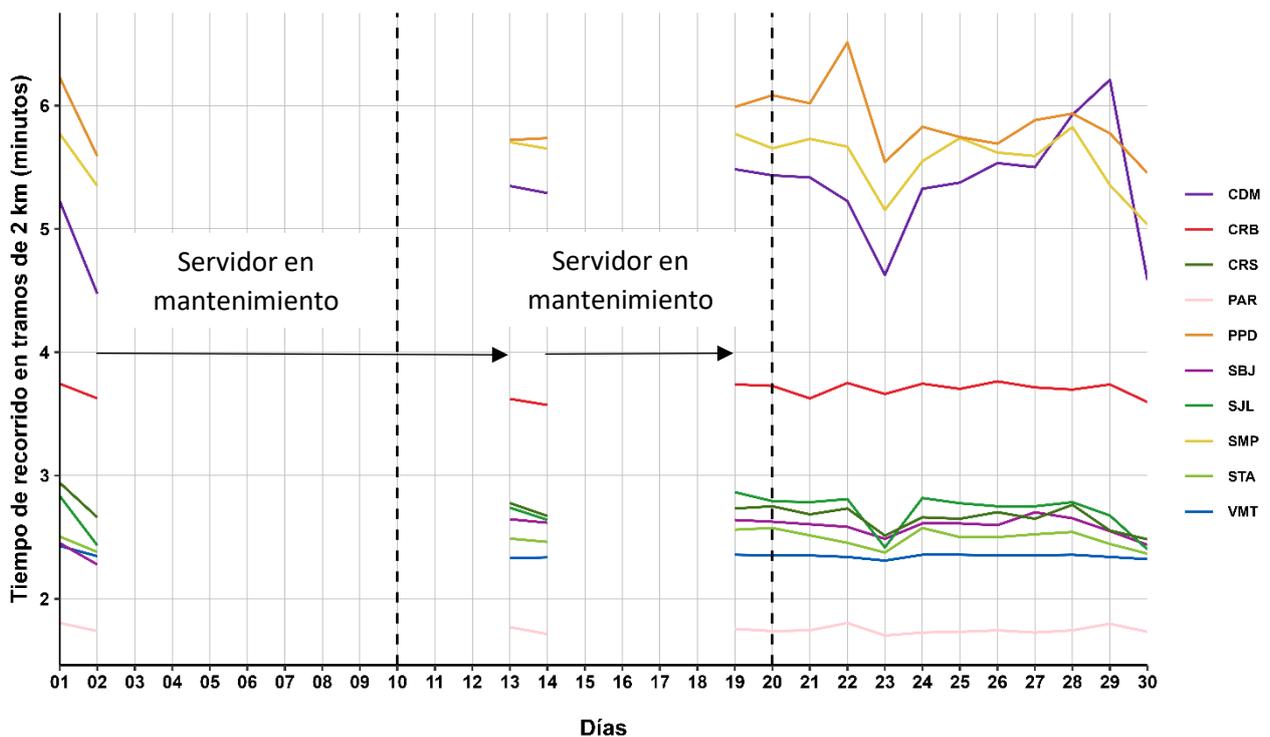
3. ACTIVIDAD VEHICULAR EN EL AMLC

La actividad vehicular tiene una contribución de más del 50% sobre la contaminación del aire en el AMLC¹⁰, 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 minutos¹¹. 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^{12,13}.

En relación con lo indicado, se ha desarrollado un algoritmo en Python que utiliza la técnica de web scraping¹⁴ para extraer datos sobre el tiempo de recorrido en tramos de 2 km de las principales avenidas¹⁵, 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, CDM y SMP, presentándose los valores más altos el 22 de junio para el caso de la estación PPD (con 6.1 minutos), el 29 de junio para el caso de la estación CDM (con 6.2 minutos) y el 6 de junio para el caso de la estación SMP (con 6 minutos). Asimismo, de manera general, los menores valores de tiempo de recorrido en tramos de 2 km, se registraron en los alrededores de la estación PAR, presentándose los valores más bajos el 23 de junio para el caso de la estación PAR (con 1.7 minutos). Cabe mencionar que, durante la primera y segunda 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



¹⁰ 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>

¹¹ Ranking 2023 "TOMTOM TRAFFIC INDEX". Obtenido de: <https://www.tomtom.com/traffic-index/ranking/>

¹² 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>

¹³ 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/>

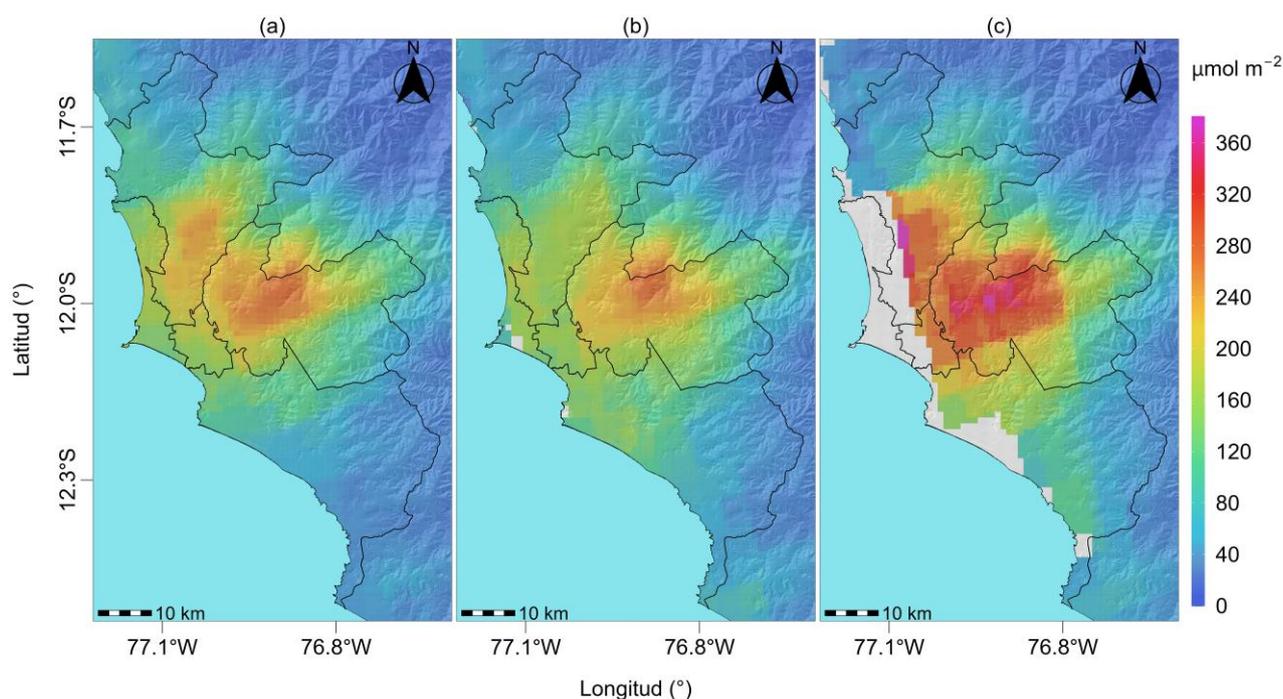
¹⁴ El web scraping es la práctica de recopilar datos de Internet de forma automatizada, mediante la escritura de programas que consultan servidores web y extraen información, usualmente en forma de archivos HTML, sin necesidad de interactuar con una interfaz de programación de aplicaciones (API) o navegadores 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.

¹⁵ 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 junio. Es así como, la Figura N° 07a, muestra la distribución espacial promedio de NO₂ en la primera decadiaria (1 a 10 de junio), la Figura N° 07b, en la segunda decadiaria (11 al 20 de junio) y la Figura N° 07c en la tercera decadiaria (21 al 30 de junio).

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. Durante la primera decadiaria, los mayores valores fueron de 281.1 μmol/m² en la zona este y de 250.3 μmol/m² en la zona norte. En la segunda decadiaria, se presentó una reducción de la densidad promedio del NO₂ en la columna vertical troposférica en casi todas las zonas, siendo mayor la reducción en la zona norte (24.5% menor que la primera decadiaria); los valores máximos en esta decadiaria fueron de 281.3 μmol/m² en la zona este y 207.4 μmol/m² en la zona centro. En la tercera 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 y Sur (97.3% y 51.2% mayor que la segunda decadiaria, respectivamente); los valores máximos en esta decadiaria fueron de 373 μmol/m² en la zona norte y 365.5 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^{16,17}. Es así como los tiempos de recorrido (congestión vehicular) 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 (tercera decadiaria, ver Figura N° 02d).

¹⁶ Monitoreando el Dióxido de Nitrógeno desde el Espacio. Obtenido de: https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/Inside_Look_AQ_Spanish.pdf

¹⁷ 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>

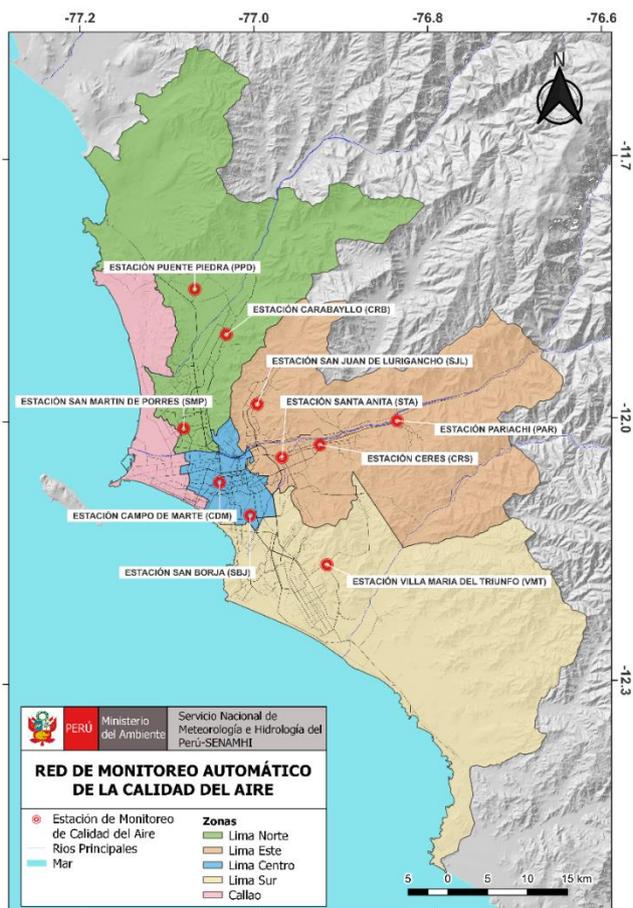
5. RED DE MONITOREO AUTOMÁTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL AMLC

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)

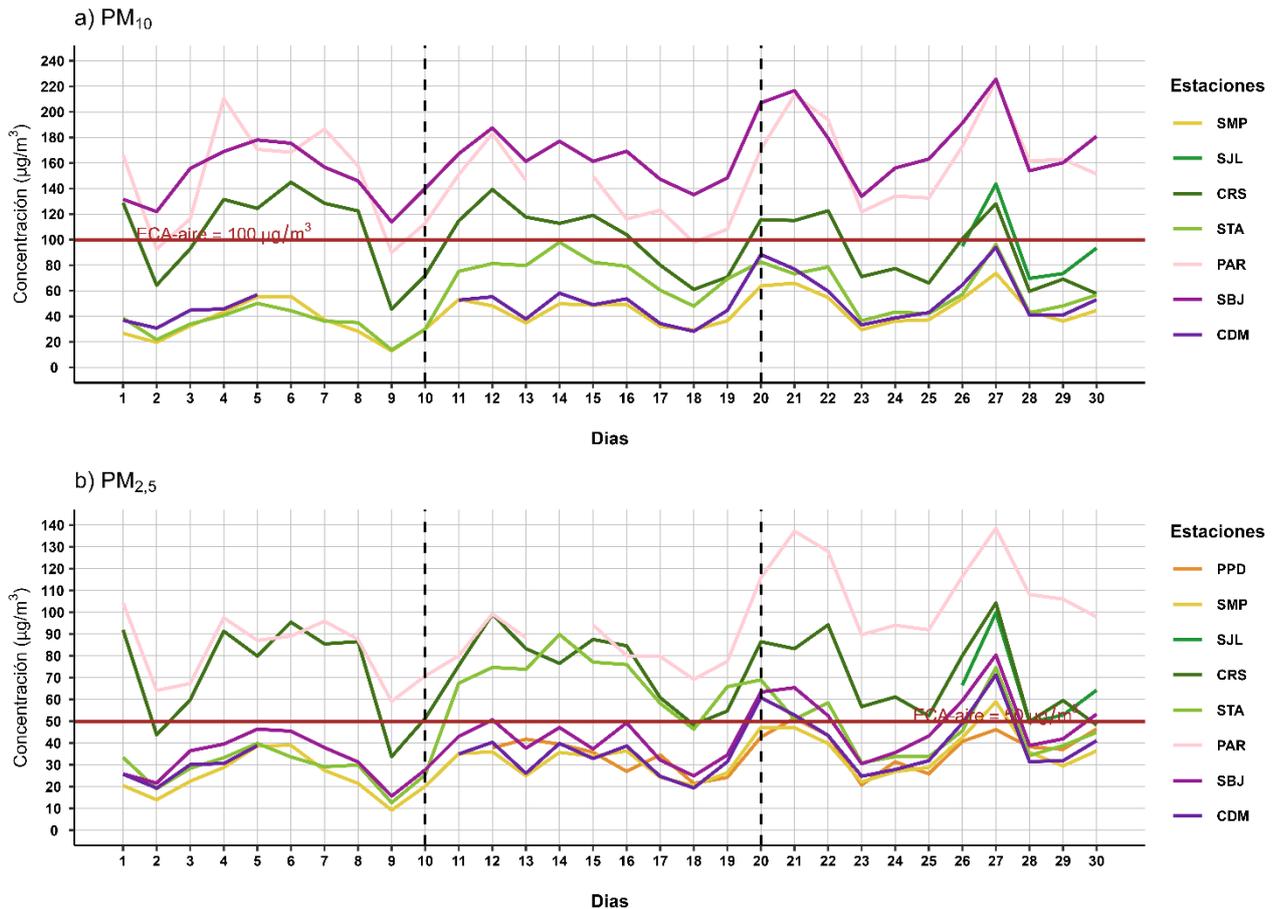
El material particulado hace referencia a partículas sólidas o líquidas, cuyo tamaño es más grande que una molécula, pero suficientemente pequeño para mantenerse suspendido en el aire. Pueden contener en su estructura iones inorgánicos, compuestos metálicos, carbono elemental, compuestos orgánicos y 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 µm¹⁸.

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)¹⁰. 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 PM₁₀¹⁹.

¹⁸ 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>

¹⁹ 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, las estaciones SBJ, PAR, CRS y SJL registraron concentraciones diarias de PM₁₀ superiores al ECA-aire de 100 µg/m³ (como promedio diario), durante las tres decadiarias. Asimismo, se pudo destacar que, en la zona norte, la estación SMP alcanzó una concentración máxima de 73.7 µg/m³ (jueves 27); en la zona este, la estación PAR alcanzó una concentración máxima de 224.1 µg/m³ (jueves 27); y en la zona centro, la estación SBJ alcanzó una concentración máxima de 225.6 µg/m³ (jueves 27), siendo este el mayor valor alcanzado durante todo el periodo de monitoreo. Por otro lado, el comportamiento decadiario muestra de manera general, una tendencia al incremento de las concentraciones de PM₁₀, alcanzándose las concentraciones más altas, el jueves 27 de junio; lo cual estaría asociado a una reducción de la altura de la CLA (ver Figura N° 02d), así como al levantamiento de polvo por actividad vehicular (durante días particulares).

En la Figura N° 09b, se evidencia que respecto a PM_{2,5}, las estaciones PPD, SMP, SJL, CRS, STA, PAR, SBJ y CDM registraron concentraciones diarias de PM_{2,5} superiores al ECA-aire de 50 µg/m³ (como promedio diario), durante al menos un día del periodo de monitoreo. Asimismo, se pudo destacar que, en la zona norte, la estación SMP alcanzó una concentración máxima de 58.9 µg/m³ (jueves 27); en la zona centro, la estación SBJ alcanzó una concentración máxima de 80.4 µg/m³ (jueves 27); y en la zona este, la estación PAR una concentración máxima de 138.5 µg/m³ (jueves 27); siendo este el mayor valor alcanzado durante todo el periodo de monitoreo. Por otro lado, el comportamiento decadiario muestra de manera general, una tendencia al incremento de las concentraciones de PM_{2,5}, alcanzándose, mayormente, las concentraciones más altas, el jueves 27 de junio, lo cual estaría asociado a un incremento en la humedad relativa y una reducción de la temperatura (ver Figura N° 02a y 02b)¹⁹. Cabe mencionar que durante las tres decadiarias, las mayores concentraciones se presentaron en la estación PAR (zona este), lo cual habría sido favorecido por la actividad vehicular en los alrededores de la carretera central, así como una menor altura de la CLA en los alrededores de esta zona.

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 CO²⁰.

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 O₃²¹, siendo que, el pico del ciclo del O₃ aparece aproximadamente 6 horas después del pico del NO y 5 horas después del NO₂²². 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 temperatura²³.

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 amplio²⁴. 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 precursor²³.

²⁰ 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>

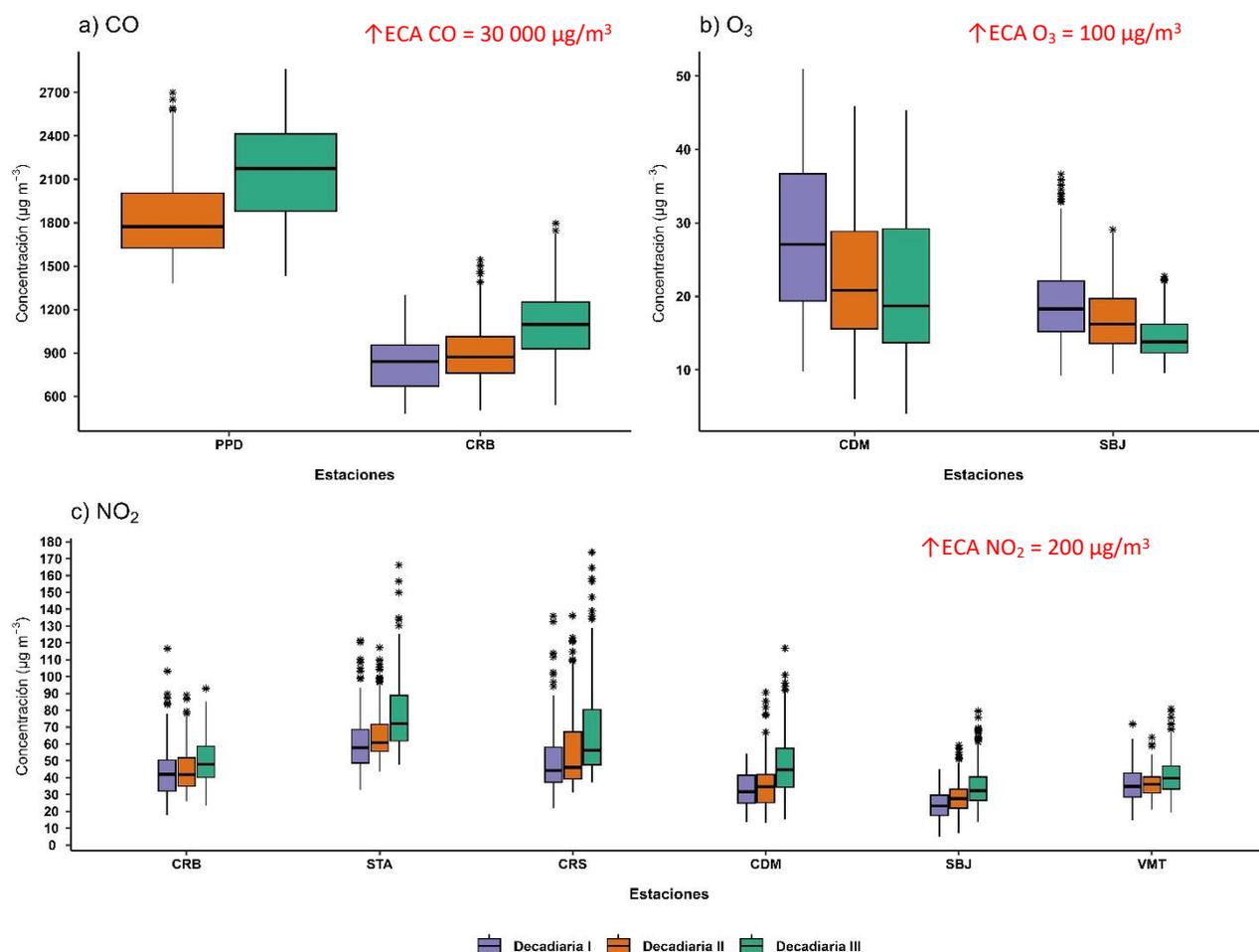
²¹ Ozono y compuestos orgánicos volátiles en el área metropolitana de Lima-Callao, Perú. Obtenido de: <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/237>

²² Análisis de la Relación entre O₃, NO y NO₂ en Tianjin, China. Obtenido de: <https://aaqr.org/articles/aaqr-10-07-0a-0055>

²³ 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

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



En junio se registraron datos de CO en las estaciones de la zona norte CRB y PPD, en este sentido, en la Figura N° 10a, se observa que las concentraciones horarias de CO se mantuvieron por debajo del ECA-aire de 30 000 µg/m³ (como promedio horario) durante el periodo de monitoreo. Asimismo, se puede apreciar que, en la estación PPD se registraron las concentraciones más altas, con una concentración máxima de 2863.5 µg/m³ (27 de junio a las 21:00 horas) y una mínima de 1381.1 µg/m³ (18 de junio a las 18:00 horas); mientras que en la estación CRB se registró una máxima de 1796.3 µg/m³ (27 de junio a las 09:00 horas) y una mínima de 478.4 µg/m³ (09 de junio a las 04:00 horas). Respecto al comportamiento decadiario, se observa que de manera general hubo una tendencia al incremento de las concentraciones. Los valores registrados estarían asociados a un incremento en la humedad relativa y una ligera disminución en la temperatura (ver Figura N° 02a y Figura N° 02b)

Respecto a O₃, en junio se registraron datos en las estaciones de la zona centro SBJ y CDM, en este sentido, en la Figura N° 10b, se observa que 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 fueron mayores a las registradas en la estación SBJ, alcanzando un máximo de 51 µg/m³ el 3 de junio y un mínimo de 4 µg/m³ el 22 de junio. Respecto a comportamiento decadiario se observa que en promedio hubo una tendencia a la reducción de las concentraciones, lo cual estaría asociado a una reducción en la temperatura. En todos los casos, las mayores concentraciones se registraron en los horarios posteriores al periodo de máxima radiación solar²¹ (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. La mayor concentración se reportó en la estación CRS durante la tercera decadiaria, alcanzando el valor de 173.7 µg/m³ el jueves 27 de junio a las 12:00 horas (las concentraciones más altas se registraron entre las 11:00 y 14:00 horas). Respecto a comportamiento decadiario se observa que en promedio hubo una tendencia al incremento de las concentraciones, lo cual también se ve reflejado en los mapas de distribución espacial de la columna de NO₂ en la tropósfera (ver Figura N° 07), lo cual estaría asociado principalmente al incremento de la actividad vehicular (89% de las emisiones de NO_x provienen de vehículos a diésel)¹⁰, así como una reducción en la temperatura.

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 ^{25, 26}.

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 SBJ presentó 20 días una calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 10 días una calidad del aire “Moderada”. La estación PAR presentó 14 días una calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 15 días una calidad del aire “Moderada”. La estación CRS presentó 29 días una calidad del aire “Moderada” y 1 día una calidad del aire “Buena”. La estación STA presentó 14 días una calidad del aire “Moderada” y 16 días una calidad del aire “Buena”. La estación CDM presentó 8 días una calidad del aire “Moderada” y 17 días una calidad del aire “Buena”. Finalmente, la estación SMP y SJL presentaron 5 días una calidad del aire “Moderada” y 25 y 1 días una calidad del aire “Buena”, respectivamente.

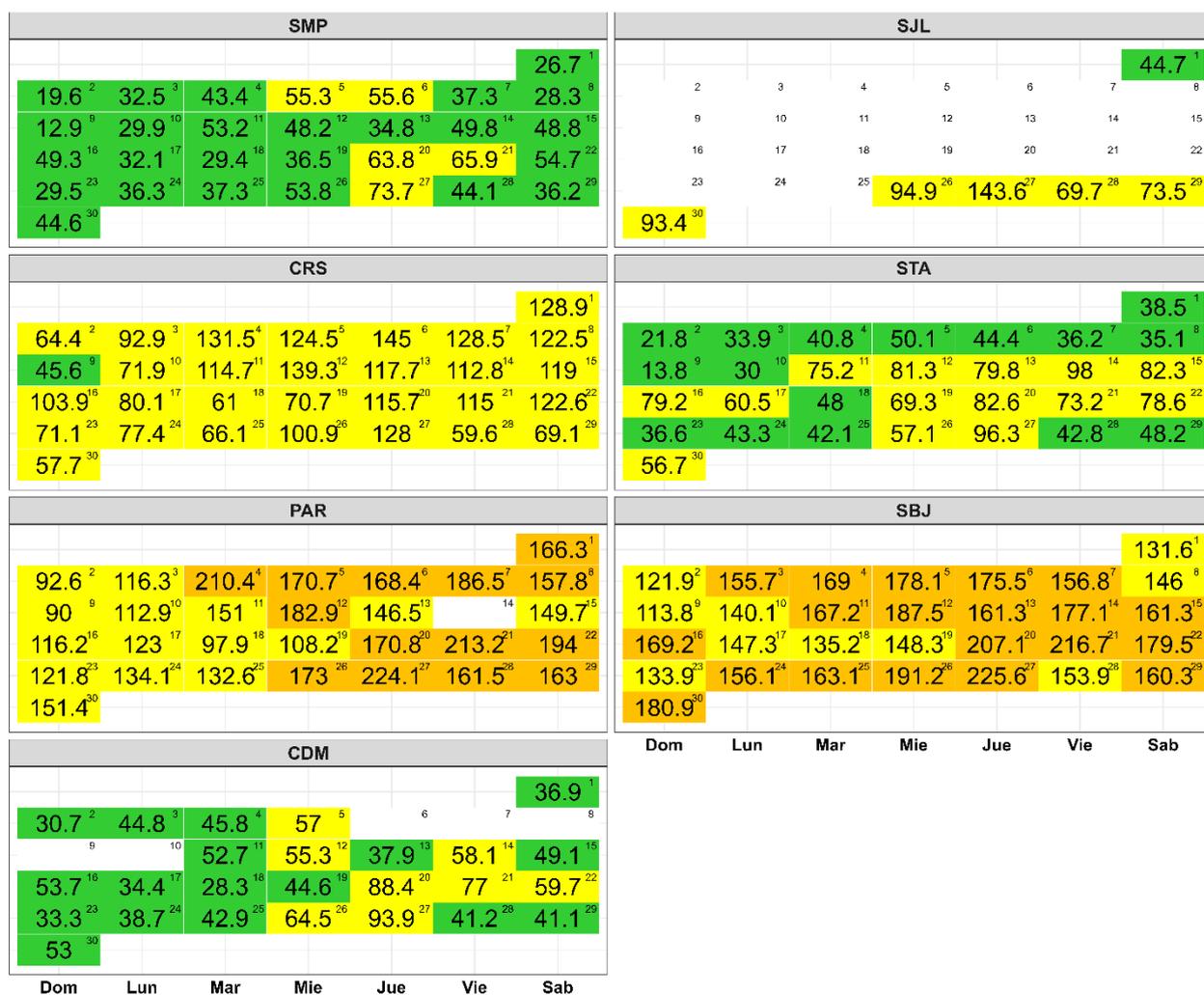
6.2. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM_{2,5}

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 3 días con calidad del aire “Muy insalubre” y 26 días con calidad del aire “Insalubre”. La estación CRS presentó 22 días con calidad del aire “Insalubre”, 7 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 1 día con calidad del aire “Moderada”. La estación STA presentó 11 días con calidad del aire “Insalubre”, 6 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 13 días con calidad del aire “Moderada”. La estación SJL presentó 3 días con calidad del aire “Insalubre”, 3 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles”. La estación SBJ presentó 4 días con calidad del aire “Insalubre”, 17 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 9 días con calidad del aire “Moderada”. La estación CDM presentó 2 días con calidad del aire “Insalubre”, 8 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 15 días con calidad del aire “Moderada”. La estación SMP presentó 1 día con calidad del aire “Insalubre”, 11 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 18 días con calidad del aire “Moderada”. Finalmente, la estación PPD presentó 12 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 7 días con calidad del aire “Moderada”.

²⁵ 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

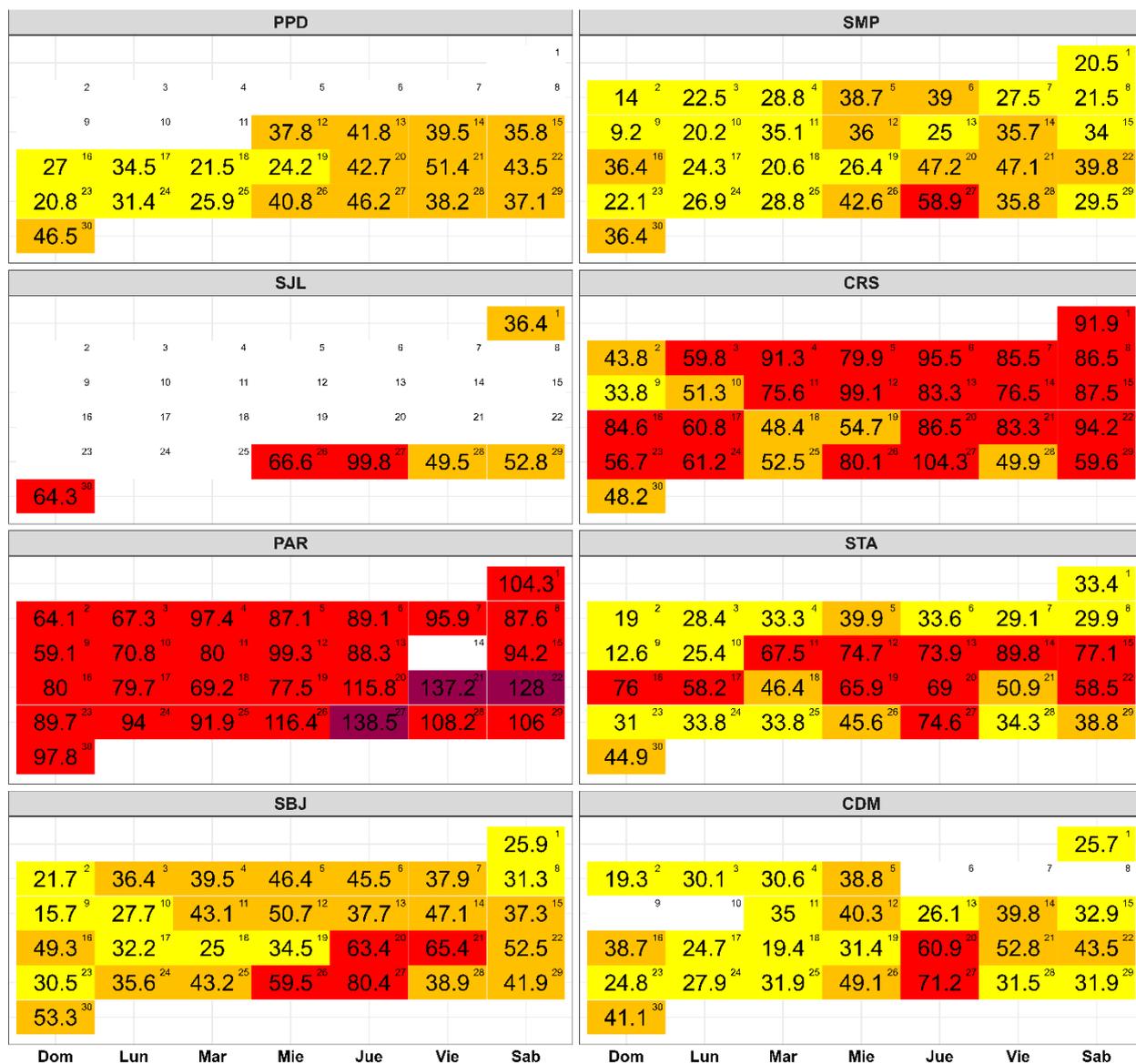
²⁶ Final Updates to the Air Quality Index (AQI) for Particulate Matter. Obtenido de: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-02/pm-naaqs-air-quality-index-fact-sheet.pdf>

Figura N° 11. 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
355	424	Muy Insalubre	201	300

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
0	9.1	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
125.5	225.4	Muy Insalubre	201	300

7. CONCLUSIONES

- Las condiciones meteorológicas influyeron en el comportamiento diario de los contaminantes atmosféricos en el AMLC durante el mes de junio. La tendencia a la reducción de temperaturas, el incremento de humedad relativa y la actividad vehicular, favorecieron el incremento del $PM_{2.5}$.
- Durante el mes de junio, los valores más altos de tiempo de recorrido (mayor congestión vehicular), se presentaron en los alrededores de las estaciones CDM, PPD y SMP, con 6.2, 6.1 y 6 minutos, respectivamente.
- La densidad de NO_2 en la columna vertical troposférica mostró una reducción hacia la segunda decadiaria, mientras que para la tercera decadiaria se observó un incremento. De manera general, la mayor densidad del NO_2 en la columna vertical troposférica se observó en las zonas este y norte.
- Las concentraciones diarias de PM_{10} superaron el ECA – aire en las estaciones SBJ, PAR, CRS y SJL durante las tres decadiarias, alcanzando un valor máximo de $225.6 \mu g/m^3$ en la estación SBJ. En el caso del $PM_{2.5}$, las estaciones PPD, SMP, SJL, CRS, STA, PAR, SBJ y CDM superaron el ECA – aire durante al menos un día del periodo de monitoreo, alcanzando el valor máximo de $138.5 \mu g/m^3$ en la estación PAR. Estas concentraciones estarían asociadas a las condiciones meteorológicas y de actividad vehicular 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. 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.
- Respecto al ICA para el contaminante PM_{10} , se observó que en la estación SBJ se presentó la mayor cantidad de días con calidad del aire “Insalubre para Grupos Sensibles”, mientras que, en las estaciones SMP y CDM se presentaron la mayor cantidad de días con calidad del aire “Buena”. Asimismo, para el contaminante $PM_{2.5}$, se observó que en la estación PAR se presentó la mayor cantidad de días con calidad del aire “Insalubre”, alcanzando incluso tres días con calidad del aire “Muy Insalubre”, por otro lado, en las estaciones SMP y CDM se presentaron la mayor cantidad de días con calidad del aire “Moderada”.

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

De acuerdo con el pronóstico climático²⁷ para el mes de julio del 2024, se espera que en el AMLC las temperaturas máximas se ubiquen por debajo de lo normal, al igual que las mínimas. Considerando el comportamiento estacional de estas variables meteorológicas, se esperaría un ligero incremento de las concentraciones de $PM_{2.5}$, característico de la estación invierno.

²⁷ Documento: Boletín climático nacional – junio 2024 SENAMHI. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02215SENA-132.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. 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 agosto del 2024