

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

Área metropolitana de Lima y Callao

Julio 2024



VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LIMA Y CALLAO (AMLC) – JULIO 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 julio^{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 – julio 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-113.pdf>

² Boletín climatológico de Lima – julio 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02232SENA-121.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.).

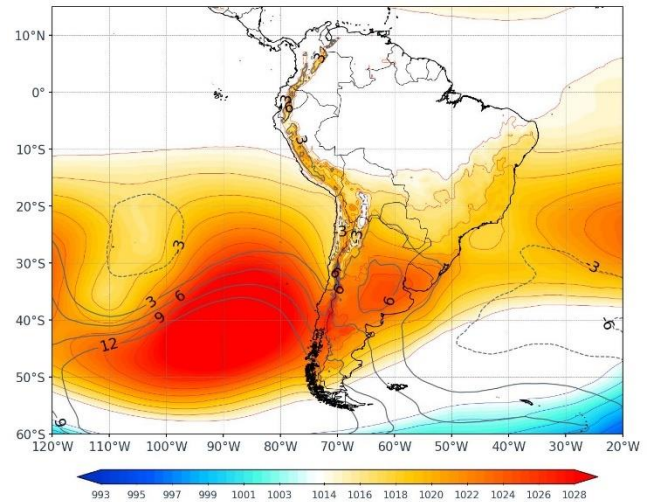
1. ANÁLISIS SINÓPTICO Y OCEÁNICO

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 julio 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 julio)

En la primera decadiaria, se tiene que el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) presentó una configuración meridional con núcleo intensificado y desplazado hacia sureste, ubicado sobre los 45°S-90°W ^{6,1} (Figura N°01a). Los vientos incidentes sobre la costa del AMLC a nivel de superficie presentaron una dirección predominante del sur con velocidades entre 2 y 4 m/s. Por otro lado, las Anomalías de Temperatura Superficial del Mar (ATSM) estuvieron cercanos a los -0.5°C frente a las costas de AMLC, lo cual repercutió en las anomalías de temperaturas máximas y mínimas del aire, encontrándose en +0.6°C y -0.5°C, respectivamente².

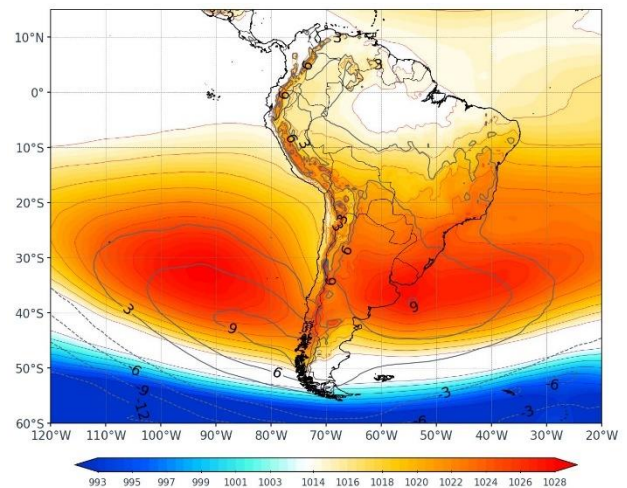
Figura N°01a. Variación del APS en la decadiaria 1.



1.2. SEGUNDA DECADIARIA (11 al 20 de julio)

Para la segunda decadiaria, el APS presentó una configuración con tendencia meridional desplazado hacia el sureste con una intensidad superior a los 1026 hPa y núcleo sobre los 32° S - 92° W ^{6,1} (Figura N° 01b). Los vientos incidentes sobre la costa del AMLC a nivel de superficie presentaron una dirección predominante del sur y velocidades entre 2 m/s y 4 m/s. Por otro lado, respecto a las ATSM estas se encontraron alrededor de los -0.4°C frente a las costas del AMLC⁷, lo cual repercutió en las temperaturas máximas y mínimas del aire, ubicándolas por debajo de su normal en -0.9°C y -1.4°C respectivamente².

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



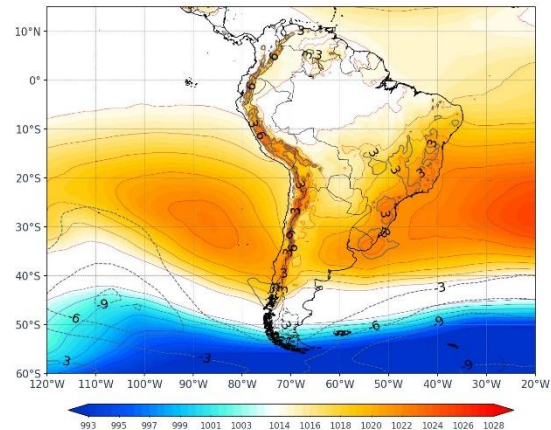
⁶ ¿Cómo responderán los anticiclones subtropicales del hemisferio sur al calentamiento global? Mecanismos y estacionalidad en las proyecciones de los modelos CMIP5 y CMIP6 (Pág. 704). Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-020-05290-7>

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

1.3. TERCERA DECADIARIA (21 al 31 de julio)

Finalmente, en la tercera decadiaria, el APS predominó al sureste de su posición climática, sobre los 30°S – 88°W, con valores de presión alrededor de los 1022 hPa, siendo una intensidad promedio respecto a su climatología^{6,1} (Figura N° 01c). Se presentaron vientos con una dirección predominante del sur, paralelos a la costa y velocidades entre 1 y 4 m/s. Por otro lado, la ATSM fue de -0.5°C frente a las costas de AMLC, lo cual repercutió en las anomalías de temperatura máxima y mínima, ubicándose por debajo de su normal en -0.2°C y -1.0°C, respectivamente².

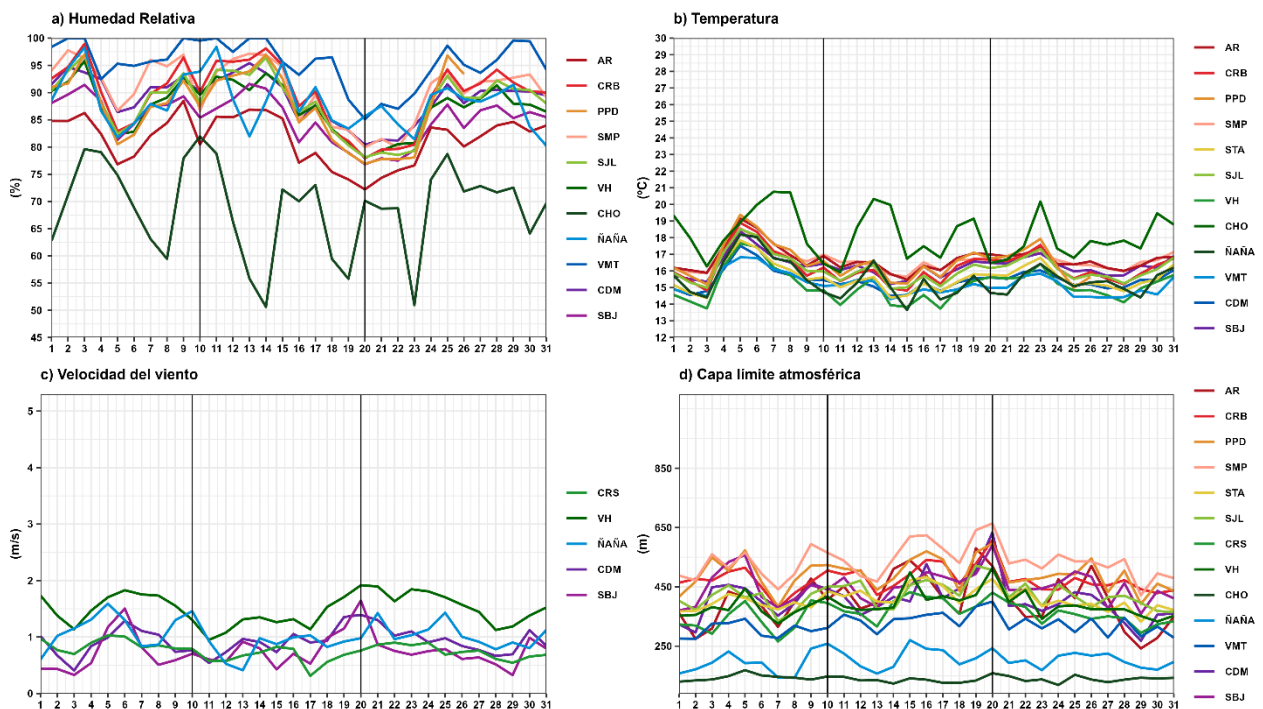
Figura N°01c. Variación del APS en la decadiaria 3.



2. CONDICIONES METEOROLÓGICAS LOCALES EN EL AMLC

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

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



Con respecto a la humedad relativa (Figura N° 02a), durante la primera decadiaria se presentaron valores entre 59.4% a 100%, para la segunda decadiaria entre 50.6% a 100% y para la tercera decadiaria entre

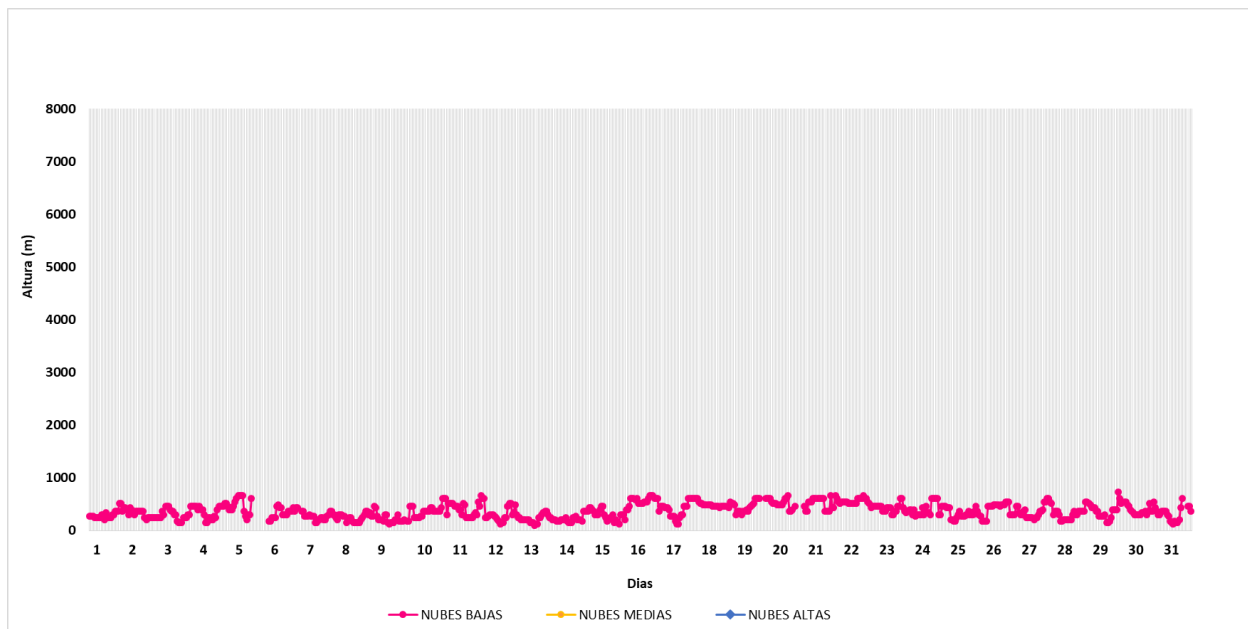
⁸ CLA: parte de la tropósfera influenciada directamente por la superficie terrestre, donde se concentra la mayor cantidad de sustancias contaminantes.

50.9% a 99.5%, siendo las estaciones CRB, SMP y VMT aquellas que mantuvieron los promedios de humedad más altos, de 89.8%, 90.7% y 95.5%, respectivamente. En relación con la temperatura (Figura N° 02b) durante la primera decadiaria se presentó valores entre 13.7 a 20.7°C, para la segunda decadiaria entre 13.6 a 20.3 °C, y en la tercera decadiaria entre 14.1 a 20.1 °C, siendo la estación de CHO la que alcanzó el valor promedio más alto de temperatura de 18.1°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 0.4 a 1.9 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, CDM y SMP alcanzaron los valores promedio más altos, con una altura promedio de 466, 400 y 533 m respectivamente, mientras que, en las estaciones CHO y ÑAÑA se presentaron los valores promedio más bajos, con 139.8 y 201 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 julio, las nubes bajas (ABN menor a 2000 m) tuvieron mayor presencia, siendo el 96.5% de los casos. Con respecto a la presencia de nubes medias (ABN mayor a 2000 m y menor a 6000 m) durante el mes de julio, no se presentaron nubes dentro de esta capa. Respecto a las horas con condición de despejado estas fueron del apenas 3.5%. En julio predominaron las condiciones de nubes bajas, situación característica de invierno.

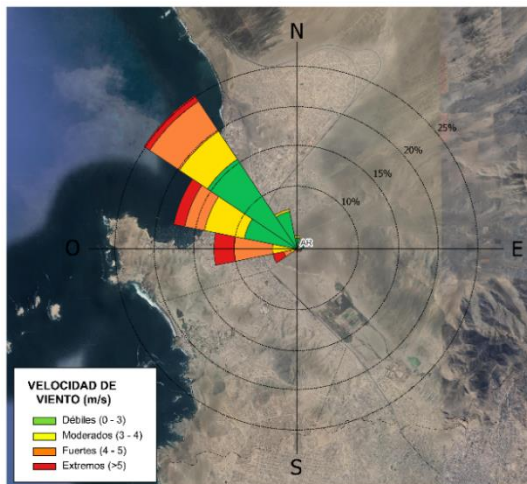
Figura N°03. Altura de base de la nube registrada en la estación Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (JCH).



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).

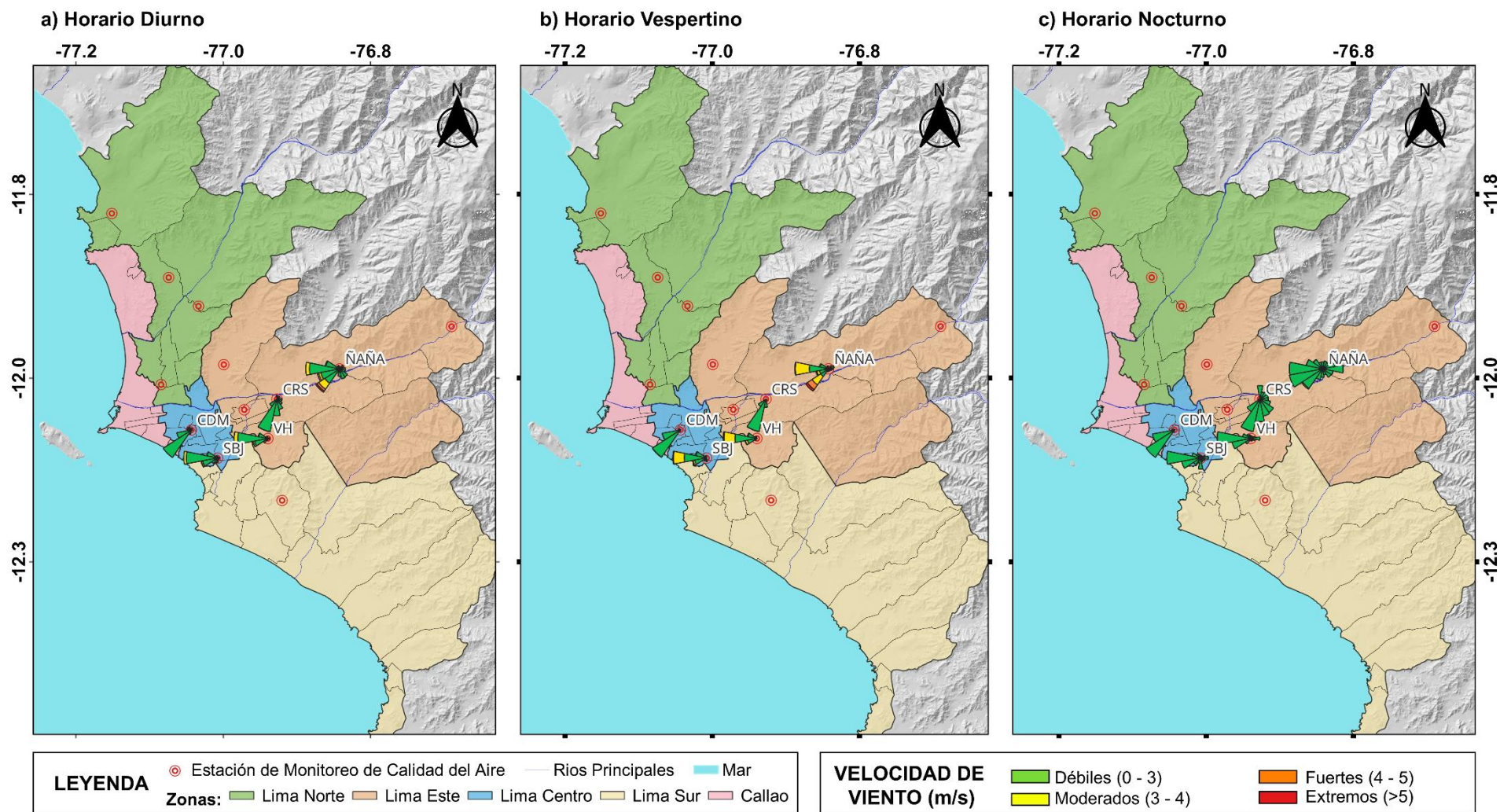
Es así como se observó, que en el horario diurno (Figura N° 05a), las estaciones de CDM y CRS presentaron vientos con una dirección predominante del suroeste (SO) y sur suroeste (SSO) respectivamente con una intensidad máxima de débil. La estación VH, SBJ y Ñaña presentaron una dirección predominante del oeste (O) y una intensidad máxima de moderada.

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), con intensidad máxima de débil. Mientras que, las estaciones VH, SBJ y Ñaña presentaron una dirección predominante del oeste (O) con una intensidad máxima de fuerte, respectivamente.

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



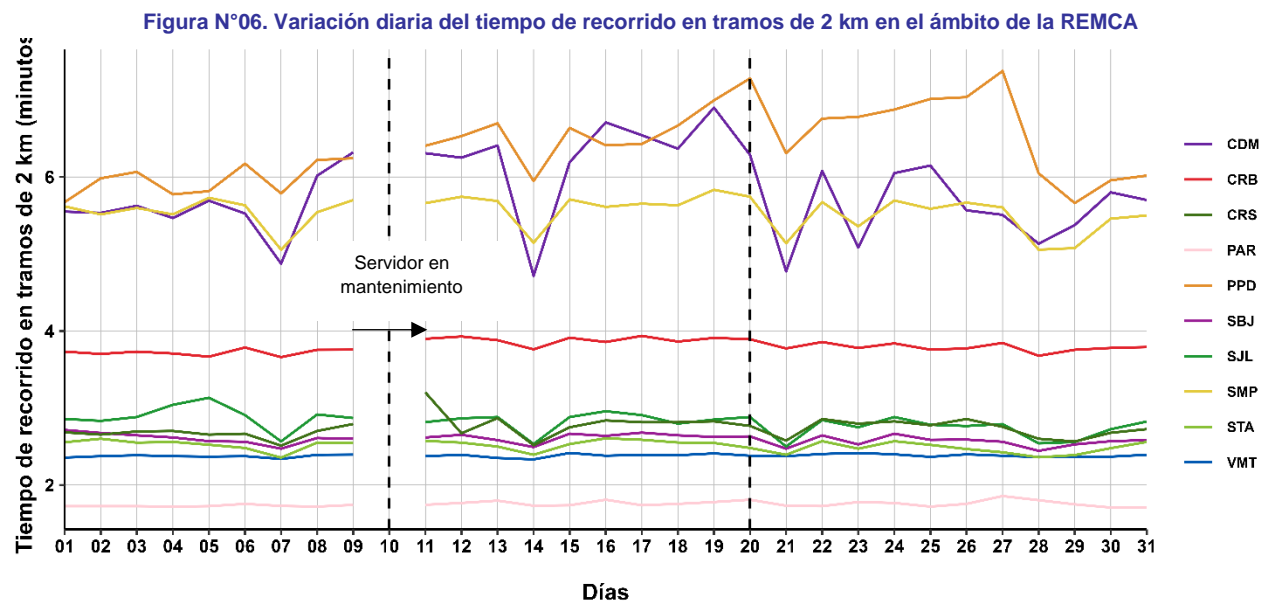
La Figura N° 05 muestra el comportamiento de la dirección y velocidad del viento en cada una de las EMA para los horarios diurnos (07:00 - 12:59 horas), vespertinos (13:00 - 18:59 horas) y nocturnos (19:00 - 06:59 horas).

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 de tiempo de recorrido en tramos de 2 km se presentaron en los alrededores de las estaciones PPD, CDM y SMP. En el caso de PPD el valor promedio diario más alto de 7.4 minutos se alcanzó el 27 de julio (tercera decadiaria), en el caso de CDM se alcanzó el valor promedio diario más alto de 6.9 minutos el 19 de julio (segunda decadiaria) y en el caso de SMP se alcanzó el valor promedio diario más alto de 5.8 minutos el 19 de julio (segunda decadiaria). A nivel de promedios decadiarios, se observó que en la segunda decadiaria hubo una tendencia al incremento en los tiempos de demora para la mayoría de las estaciones (hasta en 11.5% en los alrededores de la estación CDM), exceptuando la estación SJL, donde se observó una ligera reducción. Asimismo, en la tercera decadiaria se evidenció para la mayoría de las estaciones una tendencia a la reducción en el valor promedio decadiario (hasta en 11.2% en los alrededores de la estación CDM), exceptuando la estación VMT, cuyo valor promedio decadiario se mantuvo casi constante.



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, 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.

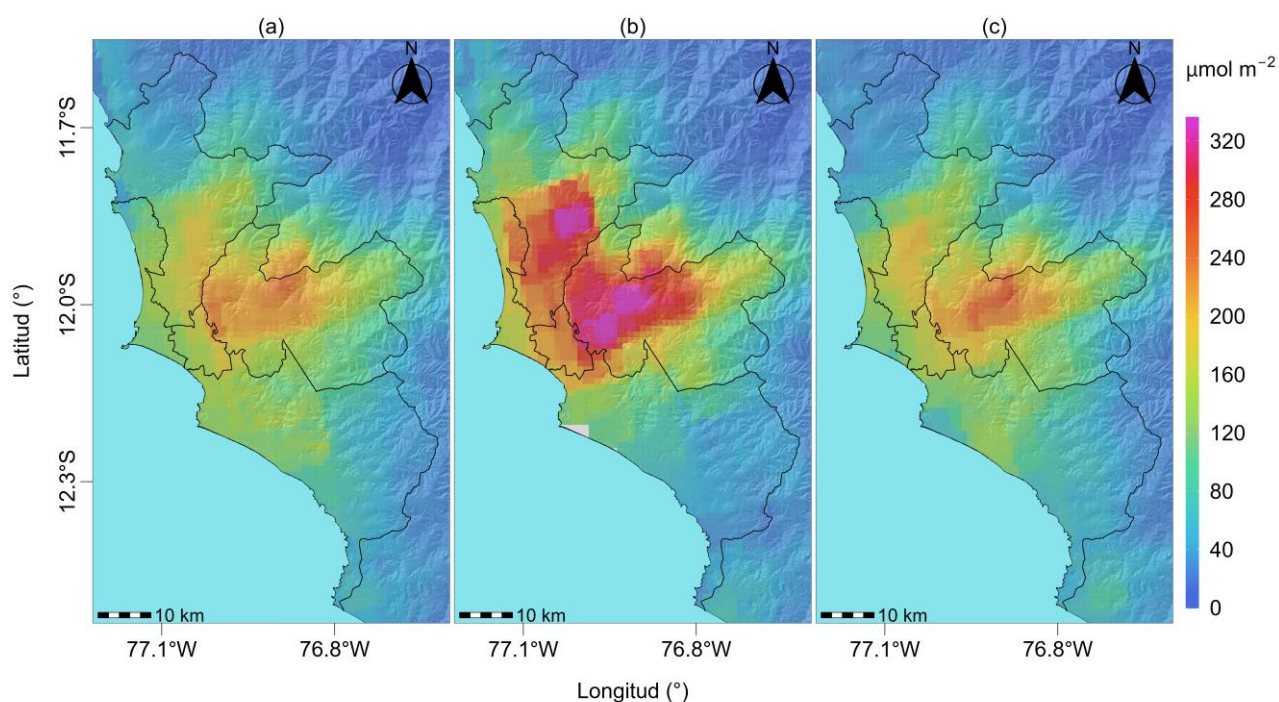
¹⁶ Estudio: Extracción y Minería de Datos de Tráfico en Google Maps. Obtenido de:

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 julio. Es así como, la Figura N° 07a, muestra la distribución espacial promedio de NO₂ en la primera decadiaria (1 a 10 de julio), la Figura N° 07b, en la segunda decadiaria (11 al 20 de julio) y la Figura N° 07c en la tercera decadiaria (21 al 31 de julio).

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 la zona este, mientras que la menor densidad se observó en la zona oeste. Durante la primera decadiaria, los mayores valores fueron de 245.8 μmol/m² en la zona este y de 228.2 μmol/m² en la zona sur. En la segunda decadiaria, se presentó un incremento de la densidad del NO₂ en la columna vertical troposférica en casi todas las zonas, siendo mayor en la zona oeste (62.9% mayor que la primera decadiaria); los valores máximos fueron de 336 μmol/m² en la zona este y 331.6 μmol/m² en la zona norte. En la tercera decadiaria, se presentó una reducción de la densidad del NO₂ en la columna vertical troposférica en todas las zonas, siendo mayor en la norte (38% menor que la segunda decadiaria, respectivamente); el valor máximo fue de 261.2 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 temperatura (segunda decadiaria, ver Figura N° 07b y Figura N° 02b).

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>

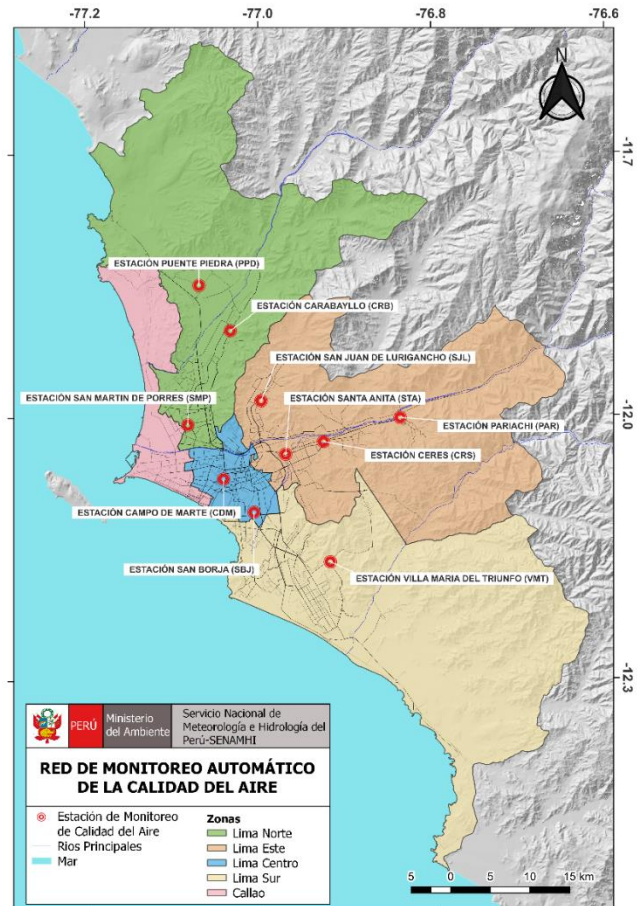
5. RED DE MONITOREO AUTOMÁTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL AMLC

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

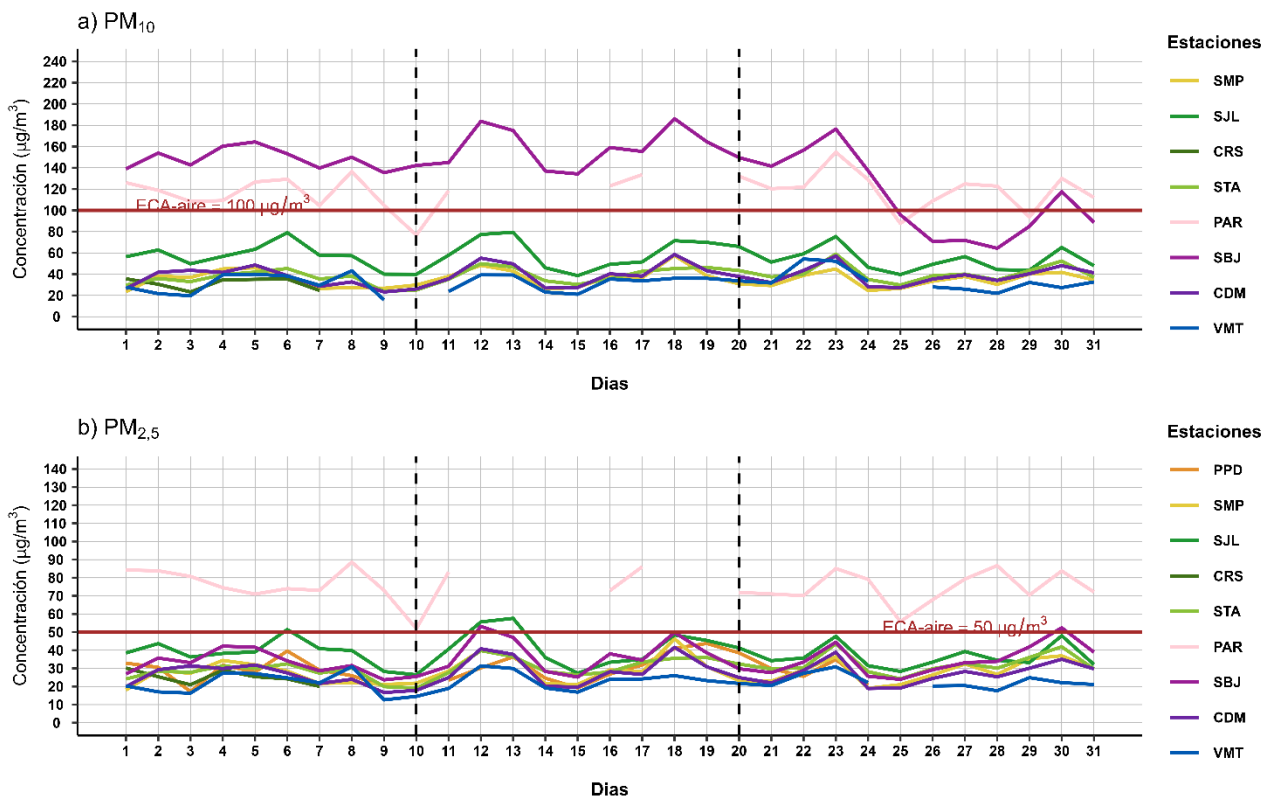
Con los datos de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire ubicadas en el AMLC, se analizó la variabilidad diaria de las concentraciones del material particulado y gases. Los datos provinieron de las estaciones: Puente Piedra (PPD), Carabayllo (CRB), San Martín de Porres (SMP), San Juan de Lurigancho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

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

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

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

Figura N°09. Variación diaria del PM₁₀ y PM_{2,5} (µg/m³) en el AMLC.



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

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

En la Figura N° 09a, se observa que, las estaciones PAR y SBJ registraron concentraciones diarias de PM₁₀ superiores al ECA-aire de 100 µg/m³ (como promedio diario) durante la mayor parte del periodo de monitoreo, presentando el valor máximo de 186.2 µg/m³ en la estación SBJ el jueves 18 de julio (las concentraciones más altas se registraron entre las 00:00 y 2:00 horas así como a las 12:00 horas), lo cual estaría asociado al levantamiento de polvo por actividad vehicular en la zona centro (durante días particulares), una tendencia al incremento en la velocidad del viento y de reducción de la humedad relativa alrededor del 18 de julio, así como una reducción de la altura de la CLA durante las horas previas a las horas de mayor concentración. Por otro lado, en promedio se registró una tendencia al incremento de las concentraciones del PM₁₀ hacia la segunda decadiaria, causado por una reducción en la humedad relativa (Ver Figura N° 02c); sin embargo, hacia la tercera decadiaria, se observó nuevamente una tendencia a la reducción en las concentraciones, de manera particular en la estación SBJ, principalmente favorecido por una reducción en la velocidad del viento, así como una reducción promedio en los tiempos de recorrido (congestión vehicular) (ver Figura N° 02c y Figura N° 06)^{20, 21, 22}

En la Figura N° 09b, se evidencia que respecto a PM_{2,5}, las estaciones PAR, SJL y SBJ 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. El valor máximo de 88.6 µg/m³ fue alcanzado en la estación PAR durante la primera decadiaria, el lunes 8 de julio, lo cual estaría asociado a la actividad vehicular en la zona este, y una reducción de la altura de la CLA. Se destaca que, en general, las concentraciones tuvieron una tendencia al incremento hacia la segunda decadiaria, asociado a un incremento en promedio en los tiempos de recorrido (congestión vehicular), mientras que la tendencia fue negativa hacia la tercera decadiaria, lo cual estaría asociado a una reducción en promedio de la humedad relativa (ver Figura N° 06 y 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 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.

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>

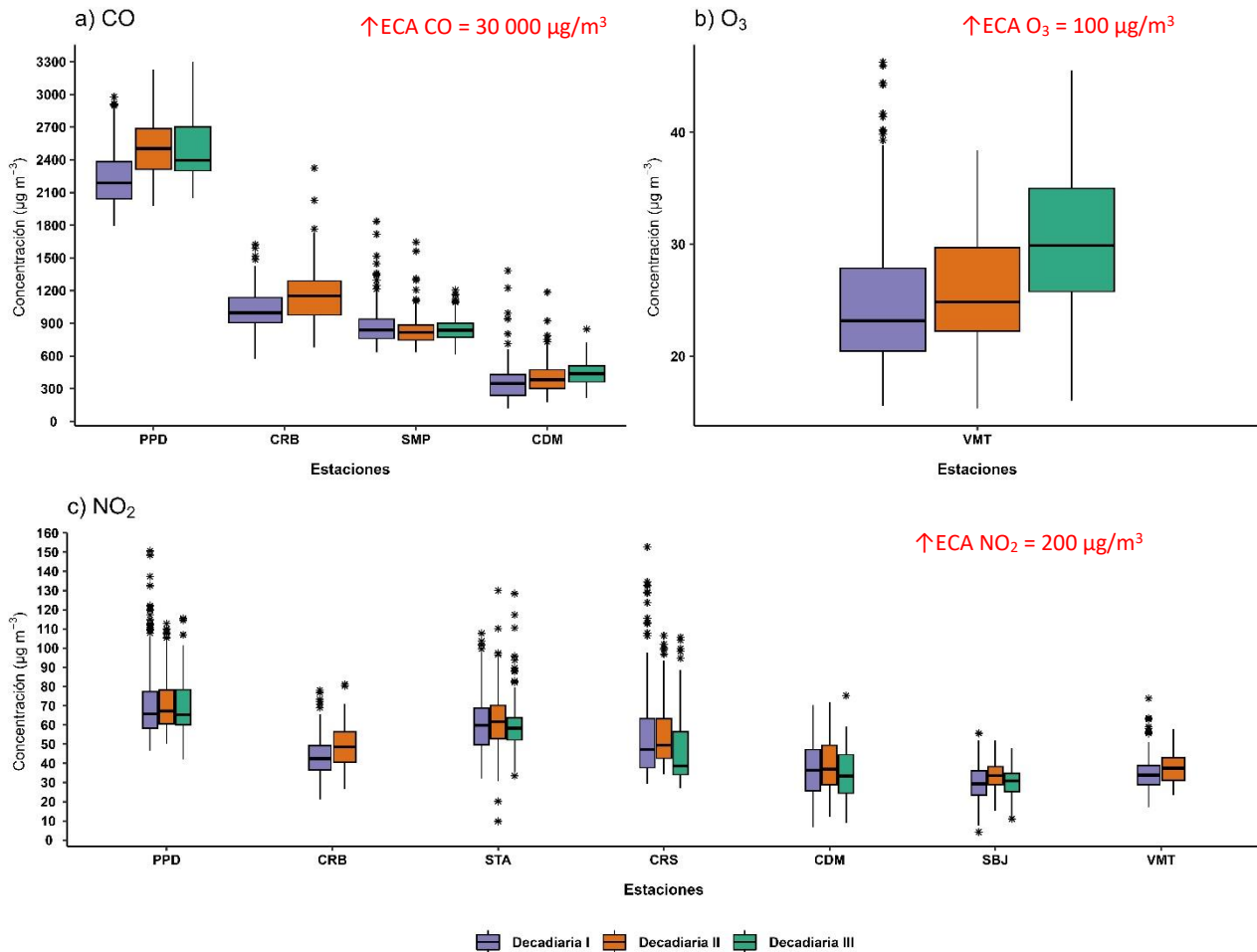
²⁴ Ozono y compuestos orgánicos volátiles en el área metropolitana de Lima-Callao, Perú. Obtenido de: https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20_500_12542/237

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

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 precursor²⁸.

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 todo el periodo de monitoreo. Asimismo, se puede apreciar que, respecto a la zona este, en la estación PPD se registraron las concentraciones más altas, con una concentración máxima de 3297 µg/m³ (31 de julio a las 21:00 horas) y una mínima de 1792.8 µg/m³ (03 de julio a las 04:00 horas); mientras que en la zona centro, en la estación CDM se registró una máxima de 1382.3 µg/m³ (04 de julio a las 09:00 horas) y una mínima de 118.4 µg/m³ (02 de julio a las 06:00 horas). Respecto al comportamiento decadiario, se observa que de manera general hubo una tendencia al incremento de las concentraciones hacia la segunda decadiaria, lo cual estaría asociado a una ligera disminución en la temperatura (ver Figura N° 02b). Hacia la tercera decadiaria, se observó que en promedio hubo una reducción en las concentraciones registradas por la estación PPD, lo cual estaría asociado a un incremento de temperatura, mientras que en el caso de las estaciones SMP y

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>

²⁸ 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

CDM, prevalecieron las condiciones de altura de la CLA (se presentó una reducción) favoreciendo un incremento en las concentraciones para esta decadiaria (ver Figura N° 02b y 02d).

Respecto al O₃, en julio se registraron datos en la estación VMT de la zona sur, en este sentido, en la Figura N° 10b, se observa que las concentraciones promedio móvil de cada 8 horas no superaron el valor de su ECA-aire de 100 µg/m³ (como máxima media de 8 horas) durante los días monitoreados. Cabe mencionar que se alcanzó la concentración máxima de 46.3 µg/m³ el 04 de julio, asociada a un incremento en la temperatura, asimismo, se registró una concentración mínima de 15.3 µg/m³ el 12 de julio, asociada a una reducción en la temperatura para esa fecha. Respecto al comportamiento decadiario se observa que en promedio hubo una tendencia al incremento de las concentraciones en la segunda decadiaria, lo cual estaría asociado al incremento de las concentraciones del NO₂ como precursor de la formación de O₃. Asimismo, para la tercera decadiaria prevalecieron las condiciones de altura de la CLA (se presentó una reducción), favoreciendo que se mantenga el incremento de las concentraciones (ver Figura N° 07 y Figura N°02d). Cabe mencionar que, las mayores concentraciones se registraron en los horarios posteriores al periodo de máxima radiación solar²⁹ (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 todo el período de monitoreo. La mayor concentración se reportó en la estación CRS durante la primera decadiaria, alcanzando el valor de 152.7 µg/m³ el jueves 04 de julio a las 15:00 horas. Respecto a comportamiento decadiario se observa que en promedio hubo una tendencia al incremento de las concentraciones hacia la segunda decadiaria y una reducción hacia la tercera decadiaria, lo cual también se ve reflejado en los mapas de distribución espacial de la columna de NO₂ en la tropósfera (ver Figura N° 07), 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 para la segunda decadiaria e incremento para la tercera (ver Figura N° 02b).

²⁹ Ozone and volatile organic compounds in the metropolitan area of Lima- Callao, Perú. Obtenido de: <https://rdcu.be/3z8c>

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 salud³⁰.

6.1. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM₁₀

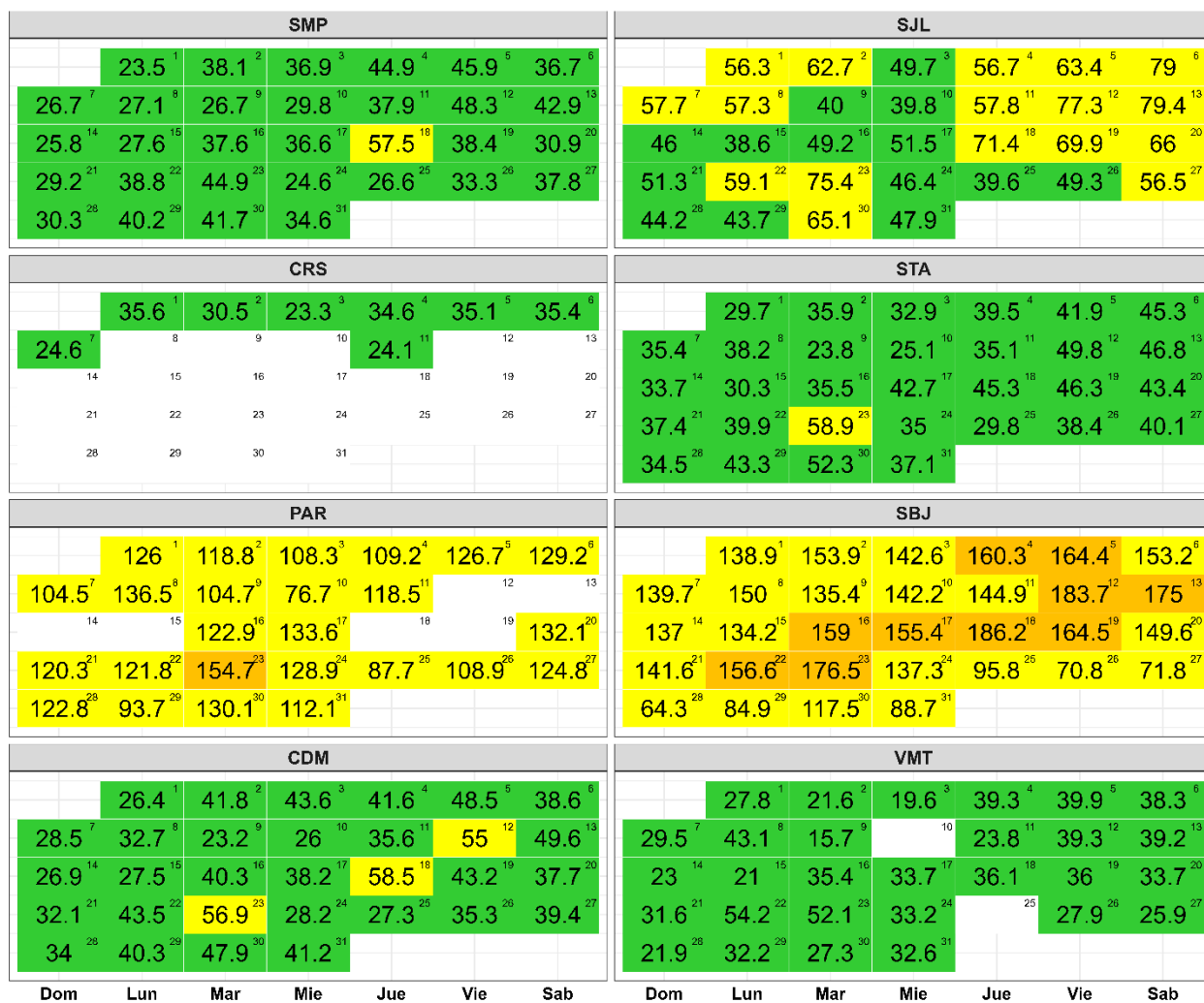
La Figura N° 11 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM₁₀ asociados a su respectivo estado de la calidad del aire. Se observó que en la zona centro, la estación SBJ presentó 10 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 21 días con calidad del aire “Moderada”, asimismo, la estación CDM presentó 3 días con calidad del aire “Moderada” y 28 días con calidad del aire “Buena”. En la zona este, la estación PAR presentó 1 día con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 24 días con calidad del aire “Moderada”, asimismo, las estaciones SJL y STA presentaron 17 y 1 días con calidad del aire “Moderada” y 14 y 30 días con calidad del aire “Buena”, respectivamente, mientras que la estación CRS presentó 8 días con calidad del aire “Buena”. En la zona norte se observó que la estación SMP presentó 1 día con calidad del aire “Moderada” y 30 días con calidad del aire “Buena”. Finalmente, la estación VMT presentó 29 días con calidad del aire “Buena”.

6.1. 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. Se observó que, en la zona este, la estación PAR presentó 24 días con calidad del aire “Insalubre” y 1 día con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles”, la estación SJL presentó 2 días con calidad del aire “Insalubre”, 17 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 12 días con calidad del aire “Moderada”, asimismo, la estación STA presentó 7 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 24 días con calidad del aire “Moderada”, mientras que la estación CRS presentó 8 días con calidad del aire “Moderada”. En la zona norte se observó que las estaciones PPD y SMP presentaron 6 y 5 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 18 y 26 días con calidad del aire “Moderada”, respectivamente. En la zona centro se observó que las estaciones SBJ y CDM presentaron 12 y 4 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles”, respectivamente, y 19 y 27 días con calidad del aire “Moderada”, respectivamente. Finalmente, la estación VMT presentó 30 días con calidad del aire “Moderada”.

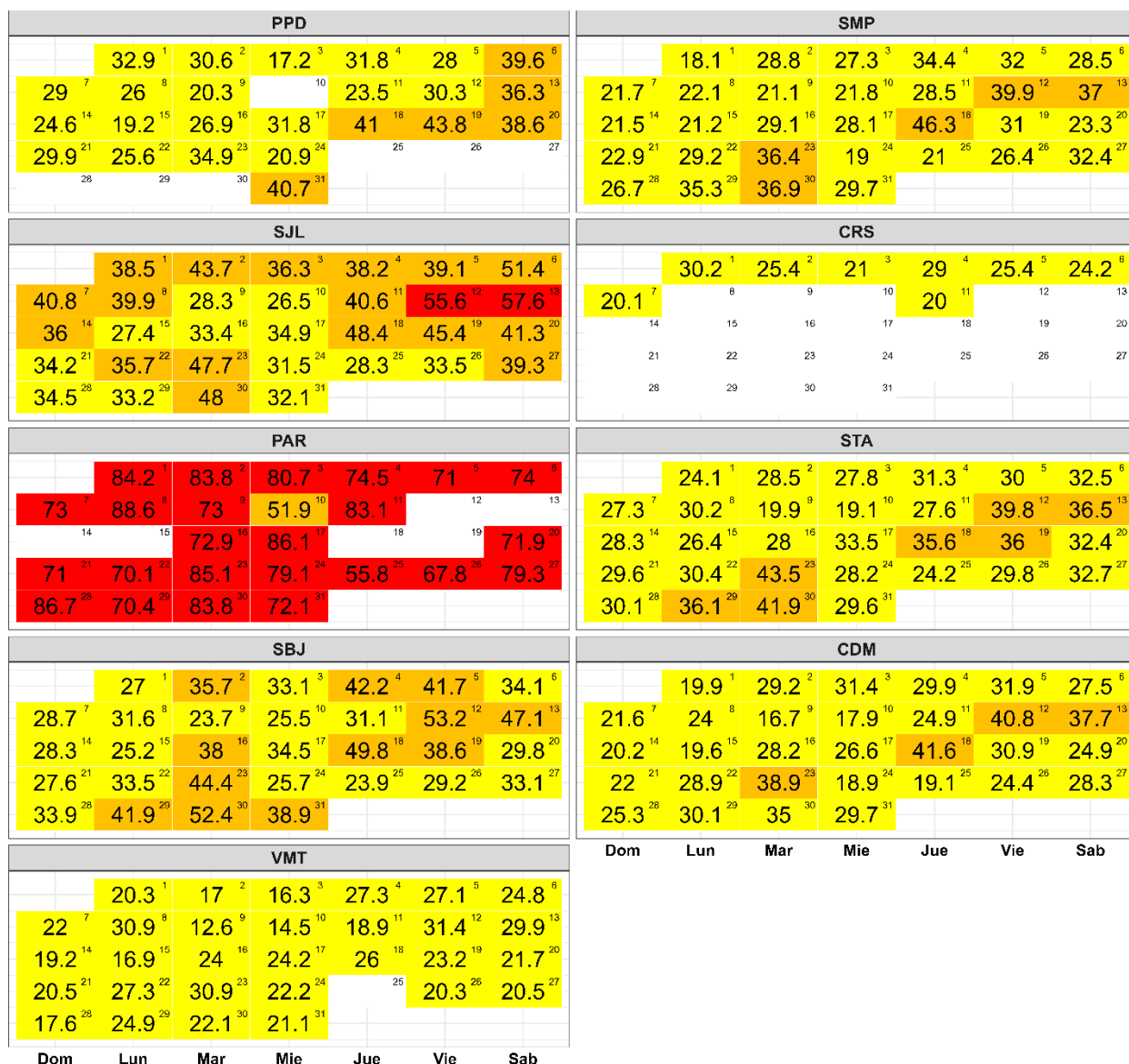
³⁰ Air Quality Index. A guide to Air Quality and Your Health. Obtenido de: https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/aji_brochure_02_14_0.pdf

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

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	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 julio. La tendencia a la reducción de temperaturas y el incremento de humedad relativa, sumado al incremento de la actividad vehicular, favorecieron el incremento del PM_{2.5}.
- Durante el mes de julio, los valores más altos de tiempo de recorrido (mayor congestión vehicular), se presentaron en la segunda decadiaria y sobre todo en los alrededores de las estaciones PPD, CDM y SMP.
- Se observa un incremento en la densidad de NO₂ en la columna vertical troposférica hacia la segunda decadiaria, mientras que para la tercera decadiaria se observa una reducción, encontrándose los mayores valores en la zona este.
- Se superó el ECA – aire para PM₁₀ en las estaciones PAR y SBJ durante la mayor parte del periodo de monitoreo, alcanzando un valor máximo de 186.2 µg/m³ en la estación SBJ. En el caso del PM_{2.5}, las estaciones PAR, SJL y SBJ superaron el ECA – aire durante al menos un día del periodo de monitoreo, alcanzando el valor máximo de 88.6 µg/m³ 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, 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 el contaminante PM₁₀, se pudo apreciar que la estación SBJ presentó la mayor cantidad de días una calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” (hasta un 32% de los días monitoreados), mientras que, las estaciones SMP y VMT presentaron una mayor cantidad de días una calidad del aire “Buena” (100% de los días monitoreados). Asimismo, para el contaminante PM_{2.5}, la estación PAR presentó la mayor cantidad de días una calidad del aire “Insalubre” (hasta un 96% de los días monitoreados) y el resto de los días “Insalubre para Grupos Sensibles”, mientras que, las estaciones VMT y CRS presentaron la mayor cantidad de días una calidad del aire “Moderada” (100% de los días monitoreados).

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

De acuerdo con el pronóstico climático³¹ para el mes de agosto del 2024, se espera que en el AMLC las temperaturas máximas se encuentren entre normales y por debajo de lo normal, mientras que las mínimas se encuentren por debajo de lo normal. 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.

³¹ Documento: Boletín climático nacional – julio 2024 SENAMHI. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02215SENA-133.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 septiembre del 2024

industrias

parque
automotor

