

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

Área metropolitana de Lima y Callao

Marzo 2024



VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LIMA Y CALLAO (AMLC) – MARZO 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 marzo^{1,2} y las salidas resultantes de la aplicación del modelo Weather Research and Forecasting (WRF)³ para el ámbito del AMLC, el cual tiene una resolución espacial de 1 km y temporal de 1 hora. Por otro lado, se realizó un análisis del comportamiento del tránsito vehicular en el AMLC a partir de la información extraída de Google Traffic⁴. Con respecto a la información de contaminantes atmosféricos, se usaron los datos de la Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire (REMCA) de SENAMHI e información del satélite Sentinel 5P⁵.

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

¹ Informe de Vigilancia Sinóptica de Sudamérica – marzo 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-109.pdf>

² Boletín climatológico de Lima – marzo 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02232SENA-117.pdf>

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

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

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

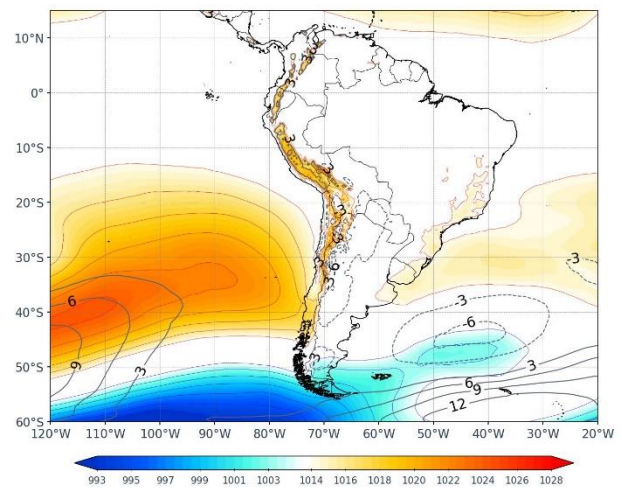
1. ANÁLISIS SINÓPTICO Y OCEÁNICO

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

1.1. PRIMERA DECADIARIA (1 al 10 de marzo)

En la primera decadiaria, se tiene que el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) mantuvo una configuración zonal sobre su posición climática⁶, con una intensificación del núcleo de 1024 hPa y un ligero desplazamiento hacia el sur ¹ (Figura N°01a). Los vientos incidentes sobre la costa del AMLC a nivel de superficie presentaron una dirección predominante del sur sureste, con velocidades entre 2 y 4 m/s. Por otro lado, las Anomalías de Temperatura Superficial del Mar (ATSM) estuvieron cercanos a los +0.9°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 +1.8°C y +0.9°C respectivamente².

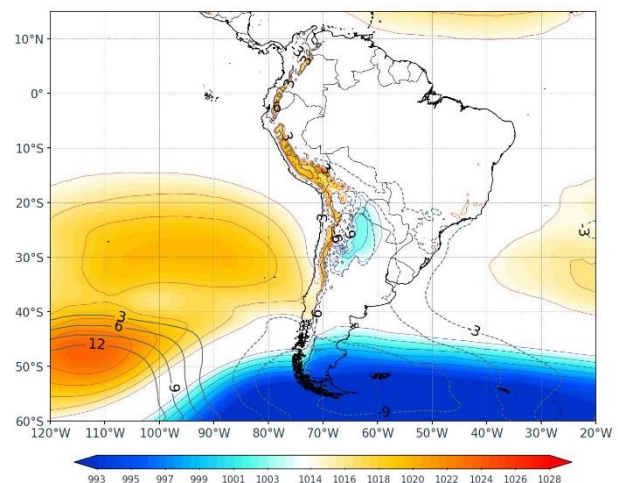
Figura N°01a. Variación del APS en la decadiaria 1.



1.2. SEGUNDA DECADIARIA (11 al 20 de marzo)

Para la segunda decadiaria, el APS abarcó gran área debido a que presentó dos núcleos; uno sobre 30°S y 95°W alcanzando valores de 1020 hPa y otro núcleo más al suroeste sobre los 48°S y 105°W alcanzando los 1023 hPa 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 3 m/s y 6 m/s. Por otro lado, respecto a las ATSM⁶ estas se encontraron alrededor de los +0.7°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 +1.2°C y +0.3°C respectivamente².

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



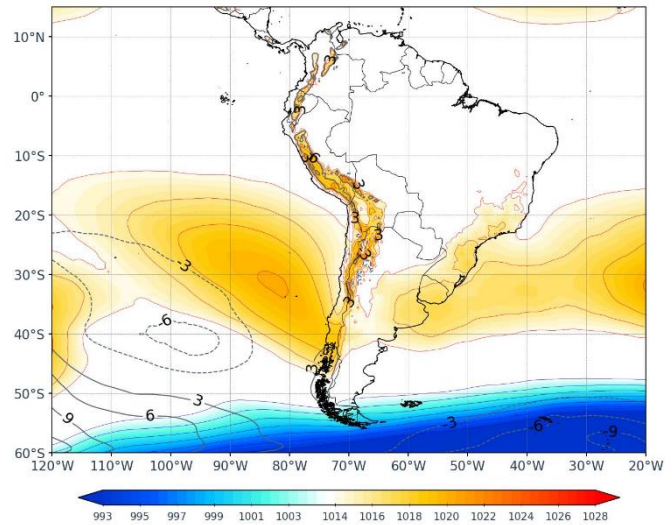
⁶ ¿Cómo responderán los anticiclones subtropicales del hemisferio sur al calentamiento global? Mecanismos y estacionalidad en las proyecciones de los modelos CMIP5 y CMIP6 (Pág. 704). Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-020-05290-7>

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 29 de marzo)

Finalmente, para la tercera decadiaria, el APS predominó con una configuración cuasi zonal y desplazado hacia el este acercándose a continente, su núcleo en los 32°S - 82°W con valores de presión superiores a los 1020 hPa manteniendo su intensidad climática⁶, asimismo, el desplazamiento del APS se reflejó por la presencia de anomalías negativas al suroeste de este sistema¹. Se presentaron vientos con una dirección predominante del sur sureste, ligeramente paralelos a la costa y velocidades entre 2 y 5 m/s. Por otro lado, respecto a la ATSM esta fue de +1.8°C frente a las costas de AMLC, lo cual repercutió en las temperaturas máximas y mínimas del aire, ubicándose por encima de su normal en +1.0°C para ambas².

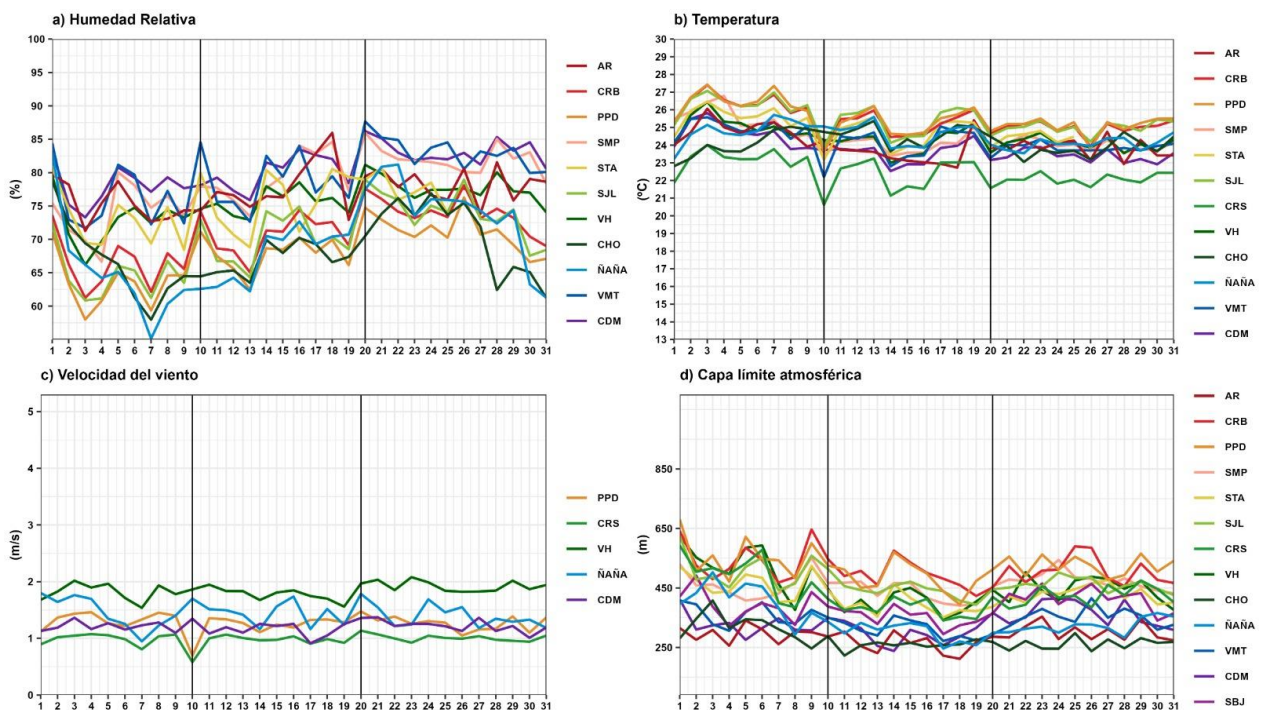
Figura N°01c. Variación del APS en la decadiaria 3.



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 (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



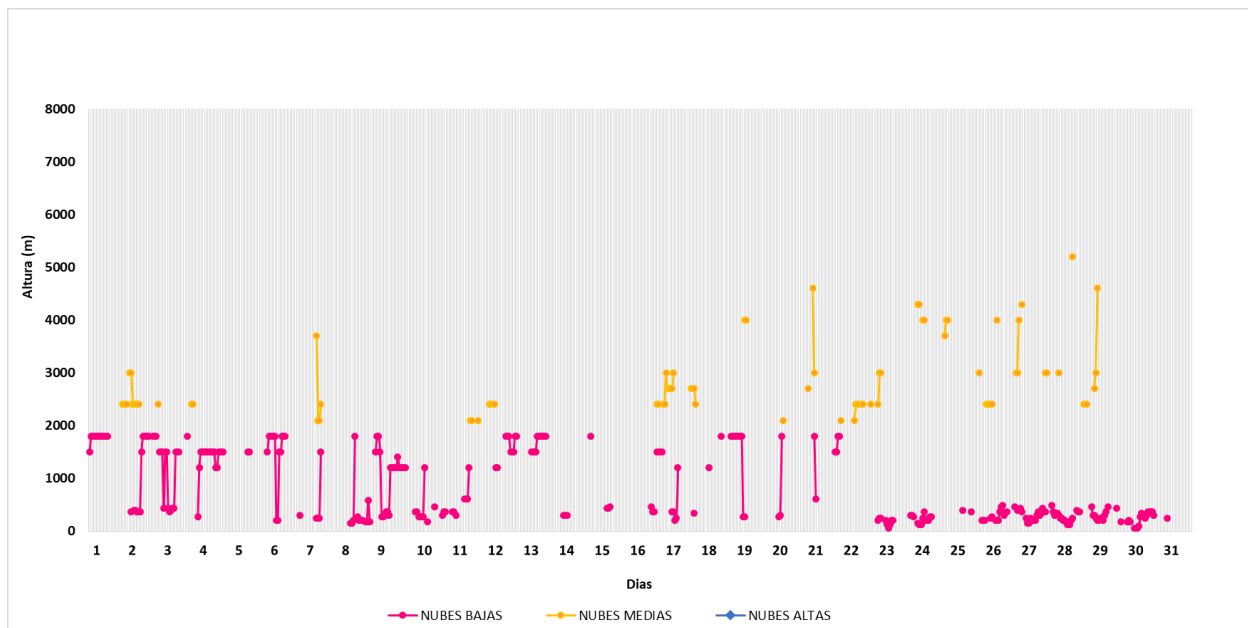
⁸ CLA: parte de la tropósfera influenciada directamente por la superficie terrestre, donde se concentra la mayor cantidad de sustancias contaminantes.

Con respecto a la humedad relativa (Figura N°02a), durante la primera decadiaria se presentaron valores entre 55.1% a 84.5%, para la segunda decadiaria valores entre 62.2% a 87.6% y en la tercera decadiaria valores entre 61.2% a 85.3%, de las cuales, la estación VMT mantuvo los valores más altos y registró un promedio mensual de 79.6%. Por otro lado, en relación con la temperatura (Figura N°02b) durante la primera decadiaria se presentó valores entre 20.6 a 27.4 °C, para la segunda decadiaria valores entre 21.1 a 26.2°C, y en la tercera decadiaria valores entre 21.6 a 25.5 °C, siendo las estaciones CRB y PPD las que alcanzaron los máximos valores de temperatura y registraron un promedio de 25.5 y 25.4°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 0.5 a 2.1 m/s durante todo el mes, siendo la estación VH la que alcanzó los mayores valores, con un promedio mensual de 1.8 m/s. En el caso de la altura de la CLA (Figura N°02d), las estaciones VH, CRB y PPD alcanzaron los valores más altos, con una altura promedio de 454.6, 387 y 521.2 m respectivamente, mientras que, en las estaciones CHO y AR se presentaron los valores más bajos, con 222.3 y 211.7 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 marzo las nubes bajas (ABN menor a 2000 m) tuvieron mayor presencia, alcanzando un 46.8%. En contraste, la presencia de nubes medias (ABN mayor a 2000 m y menor a 6000 m) fue considerablemente menor, representando un 11.2% y respecto a las horas con condición de despejado estas fueron del 42%. Durante el mes de marzo predominaron las condiciones de nubes bajas seguido por periodos despejados, situación característica de finales de verano.

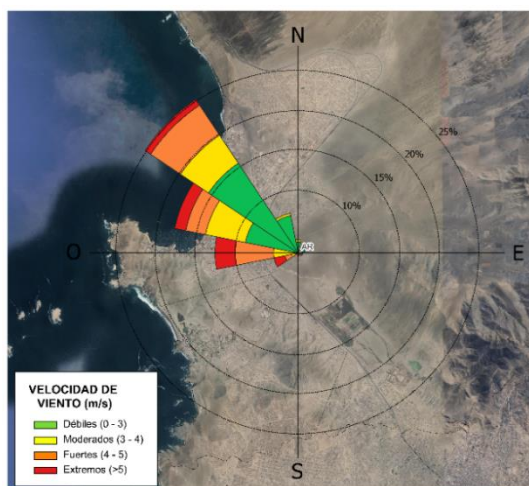
Figura N°03. Altura de base de la nube registrada en la estación Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (JCH).



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

2.2. ANALISIS DEL VIENTO EN SUPERFICIE POR HORARIOS

Figura N°04. Rosa de vientos.



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

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 con 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 extrema (>5m/s).

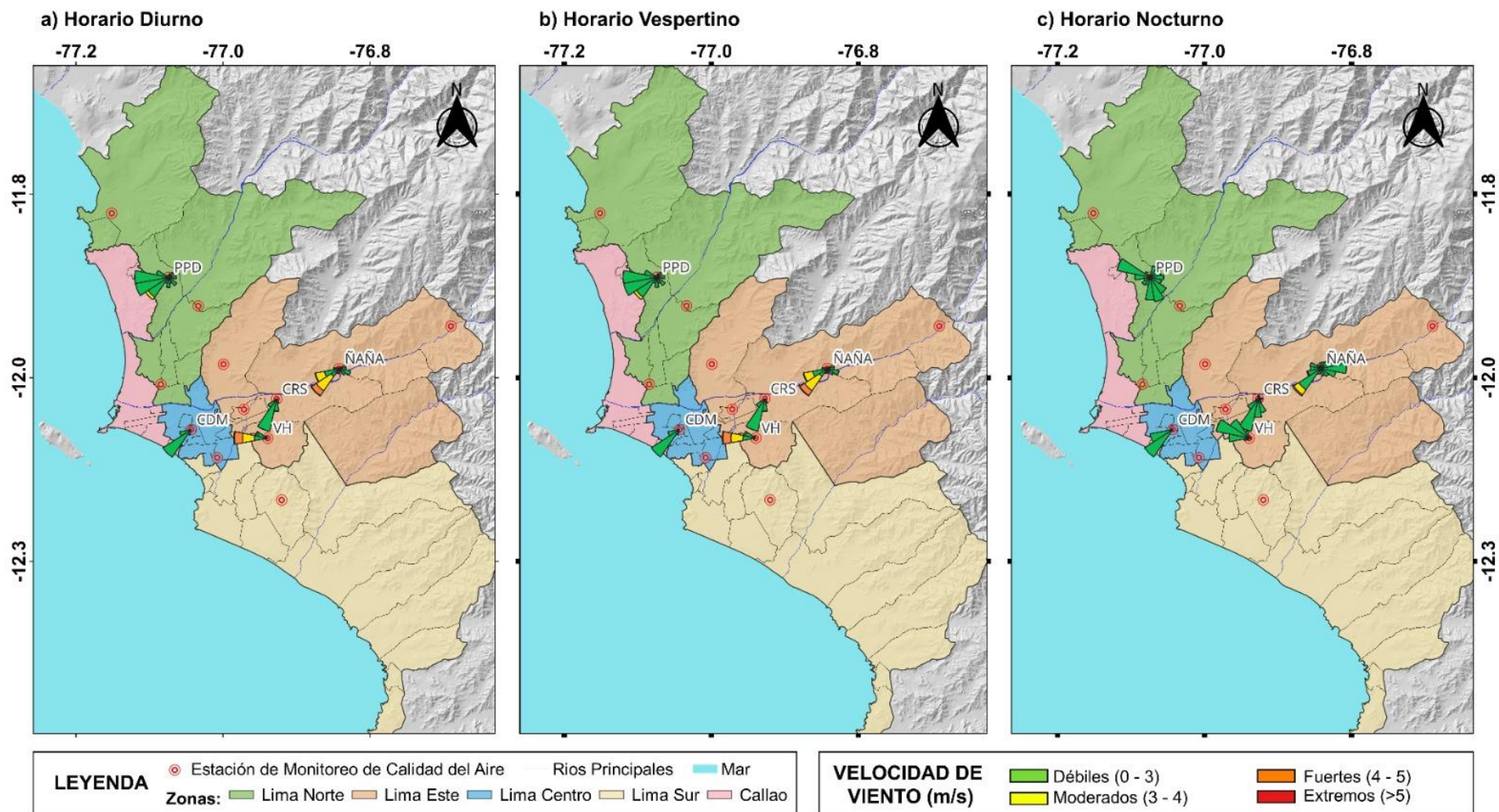
Es así que se observó, que en el horario diurno (Figura N°05a), las estaciones PPD y ÑAÑA presentaron vientos con una dirección predominante del oeste suroeste (OSO) y con una intensidad máxima de débil y extrema, respectivamente. Por otro lado, la estación CRS y CDM presentaron vientos con una dirección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

Para el horario vespertino (Figura N°05b), las estaciones CDM, CRS, PPD y ÑAÑA presentaron vientos con una dirección predominante del suroeste (SO) con intensidad máxima de débil, débil, moderada y extrema respectivamente, por otro lado, la estación VH esta presentó una dirección predominante, ambas del sur oeste (O) con una intensidad máxima de extrema.

Para el horario nocturno (Figura N°05c), se observó que las estaciones PPD y VH presentaron una dirección predominante de noroeste (NO) con una intensidad máxima de débil, mientras que, la estaciones CDM y ÑAÑA alcanzaron una dirección predominante del sur suroeste (SSO) intensidad máxima de fuerte. Finalmente la estación CRS presento una dirección predominante del suroeste (SO) y con una magnitud 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).

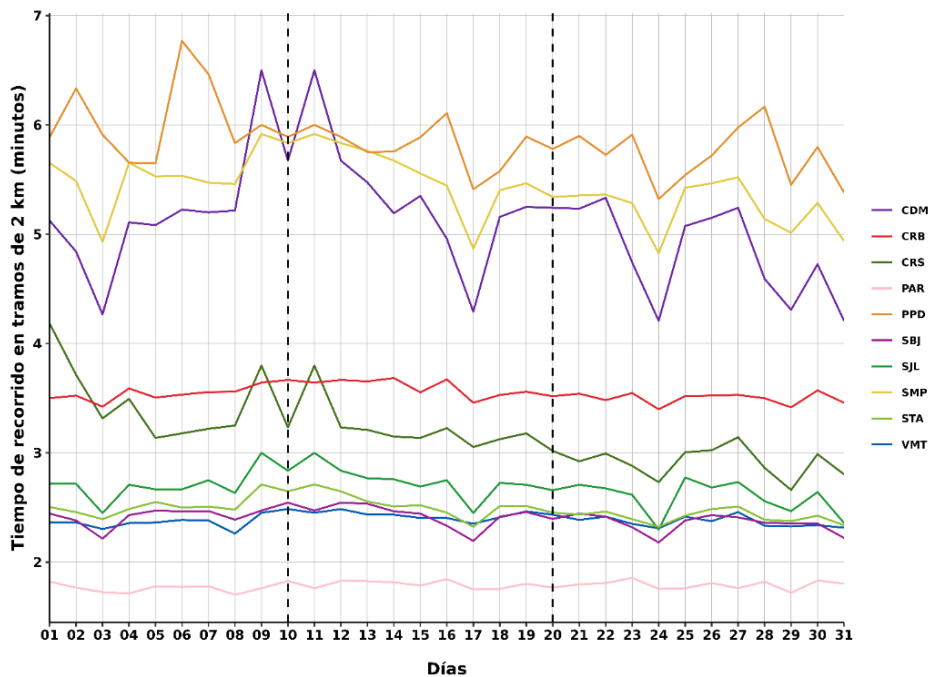
3. ACTIVIDAD VEHICULAR EN EL AMLC

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. Por otro lado, un menor tiempo de recorrido (menor congestión vehicular) se relaciona con una disminución 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 durante la primera decadiaria se registraron los tiempos de recorrido más altos en tramos de 2 km, destacando los valores promedios decadiarios más elevados en las estaciones CDM, SMP y PPD, con 5.1, 4.7 y 4.5 minutos, respectivamente. Durante la segunda decadiaria, se observa una reducción en el valor promedio decadiario de los tiempos de recorrido de las estaciones CDM, CRS, PPD, SBJ, SJL, SMP y STA, particularmente en la estación CRS, donde pasó de un promedio decadiario de 3.5 a 3.1 minutos, mientras que en las estaciones CRB, PAR y VMT se aprecia un ligero incremento. Por último, en la tercera decadiaria, se evidencia una reducción en el valor promedio decadiario de los tiempos de recorrido en todas las estaciones, siendo más notable en la estación CDM, donde pasó de un promedio decadiario de 4.9 a 4.5 minutos.

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



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

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

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

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

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

¹⁵ El web scraping es la práctica de recopilar datos de Internet de forma automatizada, mediante la escritura de programas que consultan servidores web y extraen información, 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.

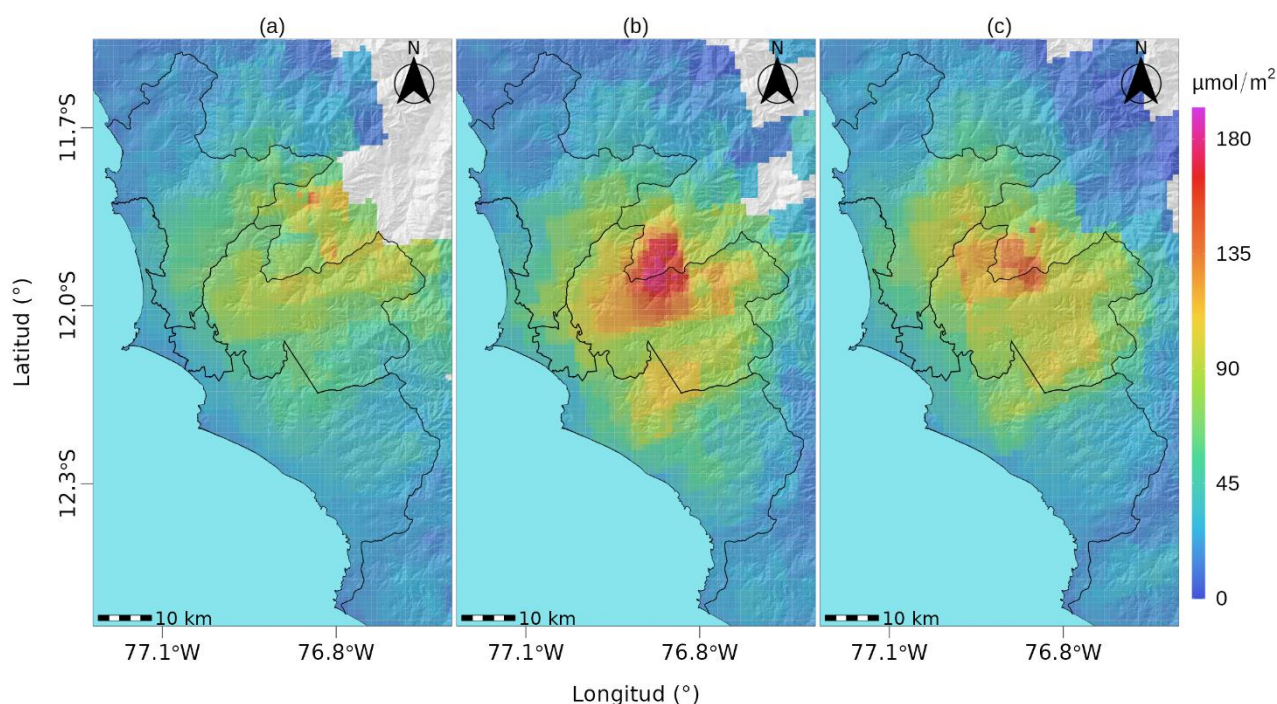
¹⁶ Estudio: Extracción y Minería de Datos de Tráfico en Google Maps. Obtenido de:

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

Figura N° 07. Distribución espacial de la columna del NO₂ (μmol/m²) en la tropósfera del AMLC.



Durante la primera decadiaria, la mayor densidad del NO₂ en la columna vertical troposférica se registró principalmente en la zona norte y este, alcanzando los valores máximos de 83 y 107 μmol/m², respectivamente. Durante la segunda decadiaria se presentó un incremento en promedio de la densidad del NO₂ con respecto a la primera decadiaria de hasta 39%, alcanzando sus mayores densidades principalmente en la zona este y sur con valores de 176 y 112 μmol/m², respectivamente. Finalmente, para la tercera decadiaria hubo una reducción en promedio de los valores con respecto a la segunda decadiaria de hasta 15%, siendo la zona este la que presentó una mayor reducción, alcanzando un valor máximo de 149 μmol/m². 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 decadiaria, ver Figura N° 07b y Figura N° 02d), o favorecer su reducción, como un incremento en la velocidad de viento (tercera decadiaria, ver Figura N° 07c y Figura N° 02c).

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>

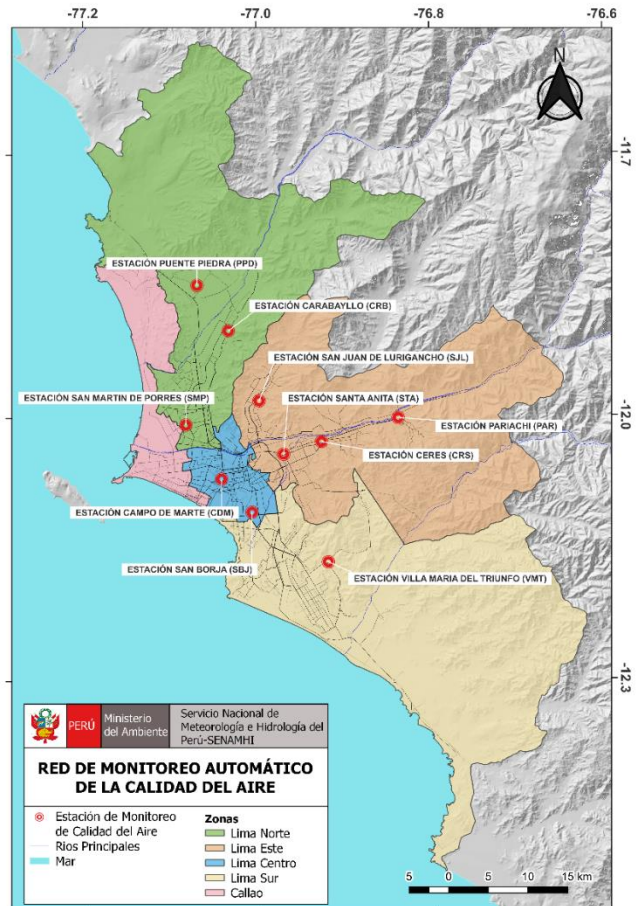
5. RED DE MONITOREO AUTOMÁTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL AMLC

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

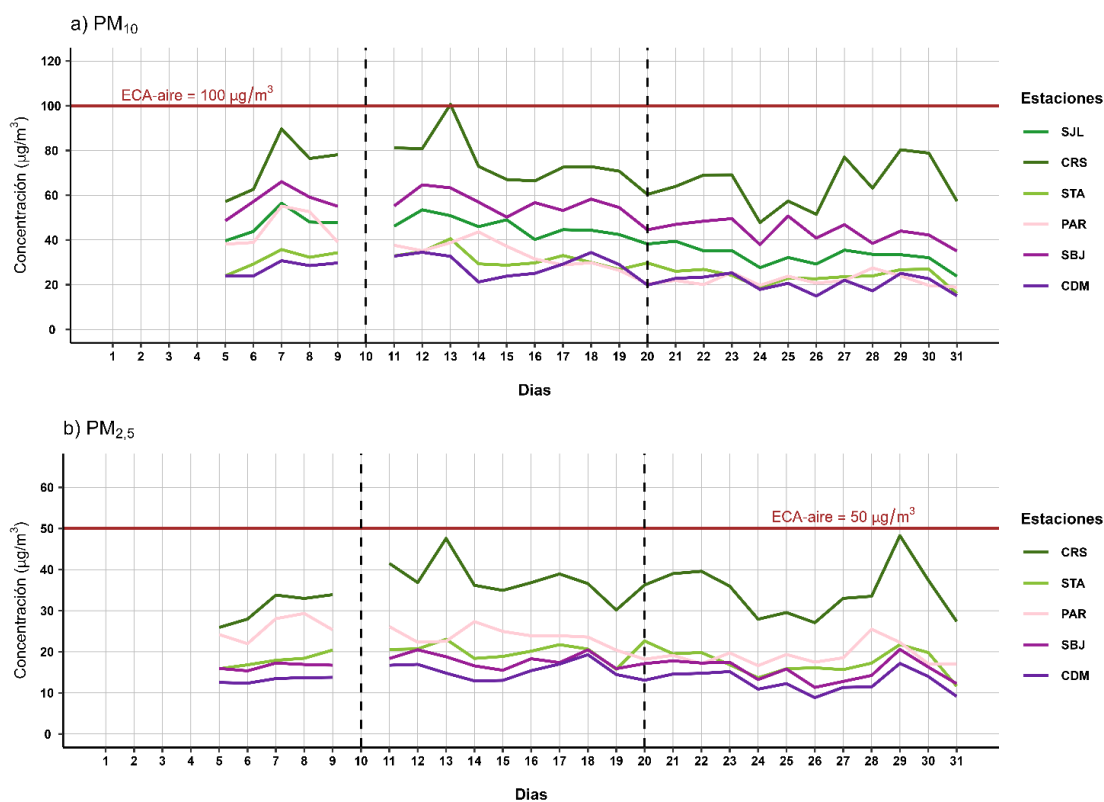
Con los datos de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire ubicadas en el AMLC, se analizó la variabilidad diaria de las concentraciones del material particulado y gases. Los datos provinieron de las estaciones: Puente Piedra (PPD), Carabaylo (CRB), San Martín de Porres (SMP), San Juan de Lurigancho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

El material particulado hace referencia a partículas sólidas o líquidas, cuyo tamaño es más grande que una molécula, pero suficientemente pequeño para mantenerse suspendido en el aire. Pueden contener en su estructura iones inorgánicos, compuestos metálicos, carbono elemental, compuestos orgánicos y compuestos provenientes de la corteza terrestre. Usualmente se evalúan dos tipos de material particulado, las denominadas partículas finas, que incluyen a las partículas con diámetro menor a $2,5 \mu m$ y las denominadas partículas gruesas que incluyen a las partículas con diámetro menor a $10 \mu m$ ¹⁹.

En el AMLC, la principal fuente de material particulado está relacionada a las emisiones provenientes del parque automotor; sin embargo, existen otras fuentes, como las puntuales (industria del cemento, harina de pescado o la refinación de cobre y zinc) o las de área (entre las que se encuentran las pollerías)¹¹. Asimismo, las concentraciones de material particulado pueden variar en función de las condiciones meteorológicas, es así como, en estudios realizados en el AMLC, se ha visto que un incremento en la humedad relativa está relacionado con un incremento de las concentraciones de $PM_{2,5}$, mientras que un incremento en la temperatura está relacionado con un incremento en las concentraciones de PM_{10} ²⁰.

Figura N°09. Variación diaria del PM_{10} y $PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$) en el AMLC.



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

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

En la Figura N° 09a, se observa que durante el periodo de monitoreo, la única estación que registró concentraciones diarias de PM₁₀ superiores al ECA-aire de 100 µg/m³ (como promedio diario) fue la estación CRS durante la segunda decadiaria, alcanzando el valor de 100.6 µg/m³ el miércoles 13 (las concentraciones más altas se registraron entre las 6 y 8 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 baja velocidad del viento y temperatura (para las horas de mayor concentración). Por otro lado, en general se puede observar una tendencia a la reducción de las concentraciones del PM₁₀ causado por una ligera disminución de los tiempos de recorrido (ver Figura N° 06), así como, un incremento en la humedad relativa y disminución en la temperatura (ver Figura N° 02a y 02b), esto acorde con las investigaciones realizadas por el SENAMHI ^{20, 21, 22} .

En la Figura N° 09b, se evidencia que las concentraciones diarias de PM_{2.5} registradas en las estaciones no superaron el ECA-aire de 50 µg/m³ (como promedio diario) durante el periodo monitoreado. Se destaca que, en general, las concentraciones tuvieron una tendencia al incremento, causado por un incremento en promedio de la humedad relativa y una disminución en promedio de la temperatura ^{20, 21, 22} . La mayor concentración, promedio diario, se alcanzó en la tercera decadiaria, específicamente en la estación CRS alcanzándose el valor de 48.3 µg/m³ (viernes 29), lo cual estaría asociado a un incremento en los viajes en transporte público e interprovincial debido al fin de semana largo en la ciudad de Lima y quema de residuos, así como, condiciones meteorológicas explicadas previamente.

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

5.1.2. GASES (CO, O₃ y NO₂)

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

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

El NO₂ está considerado dentro del grupo de gases altamente reactivos conocidos como óxidos de nitrógeno (NO_x), siendo usado como un indicador de la presencia de este grupo más amplio²⁷. El NO₂ se origina durante los procesos de combustión en los vehículos, por lo cual los valores máximos se pueden relacionar con las horas de máxima congestión vehicular. Asimismo, la temperatura y la radiación solar suelen mantener una relación inversa con las concentraciones de NO₂, debido a que fomentan las reacciones que dan origen al O₃, favoreciendo con ello el consumo de NO₂ como su precursor²⁸.

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

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

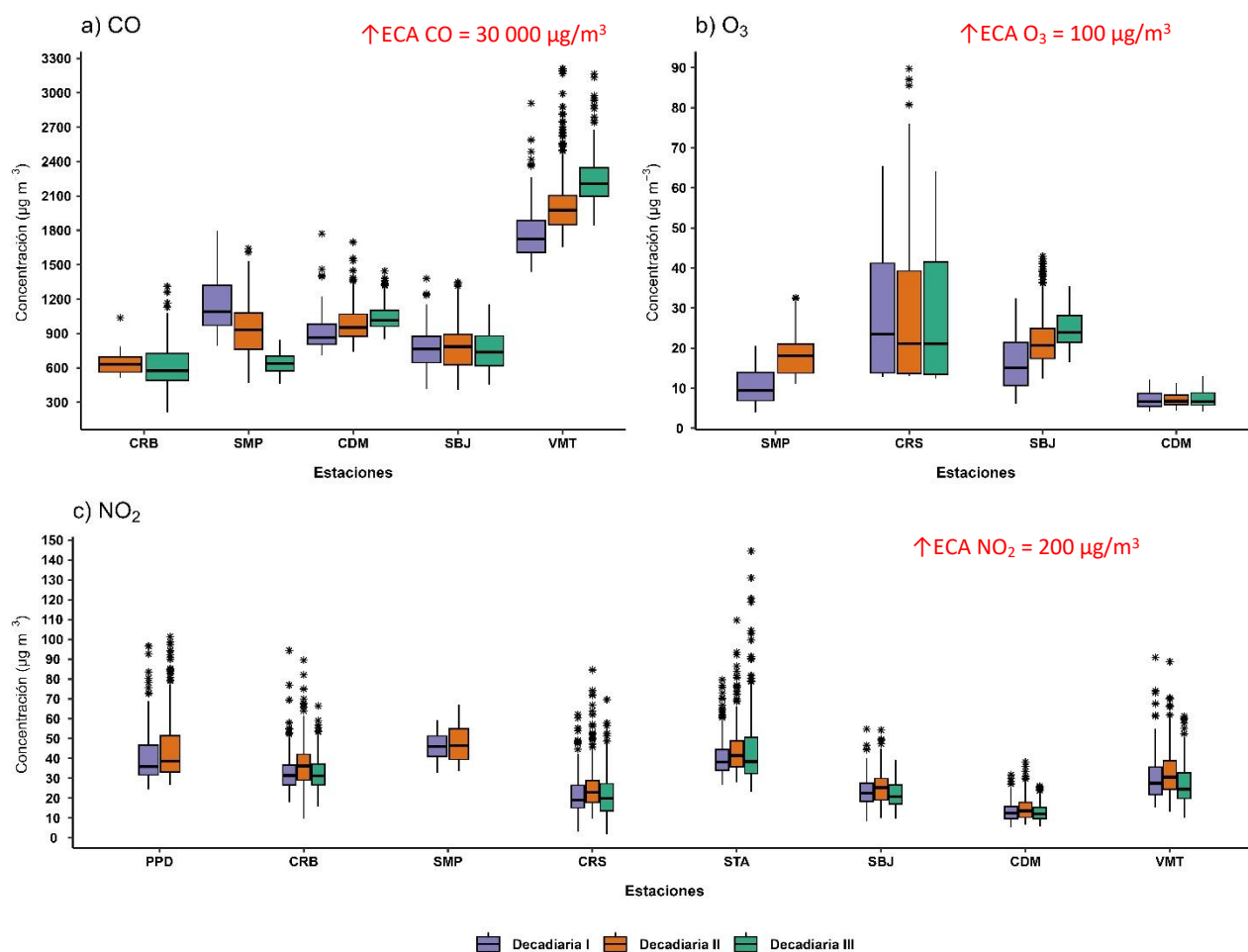
²⁵ Análisis de la Relación entre O₃, NO y NO₂ en Tianjin, China. Obtenido de: <https://aaqr.org/articles/aaqr-10-07-0a-0055>

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

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

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

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, el promedio decadiario muestra una reducción de las concentraciones, causada por una ligera disminución de los tiempos de recorrido (ver Figura N° 06). Mientras que en la zona sur se aprecia un incremento de las concentraciones (como promedio decadiario), causada por un ligero incremento en 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 tuvieron una tendencia al incremento (especialmente entre la primera y segunda decadiaria), lo cual estaría asociado al incremento de las concentraciones del NO₂ 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 solar²⁴ (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 (entre la primera y segunda 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). La mayor concentración se reportó en la estación STA durante la tercera decadiaria, alcanzando el valor de 144.5 µg/m³ el martes 26 de marzo a las 19:00 horas (las concentraciones más altas se registraron entre las 17 y 19 horas), lo cual estaría asociado a la actividad vehicular en la zona este (durante días particulares, ver Figura N° 06).

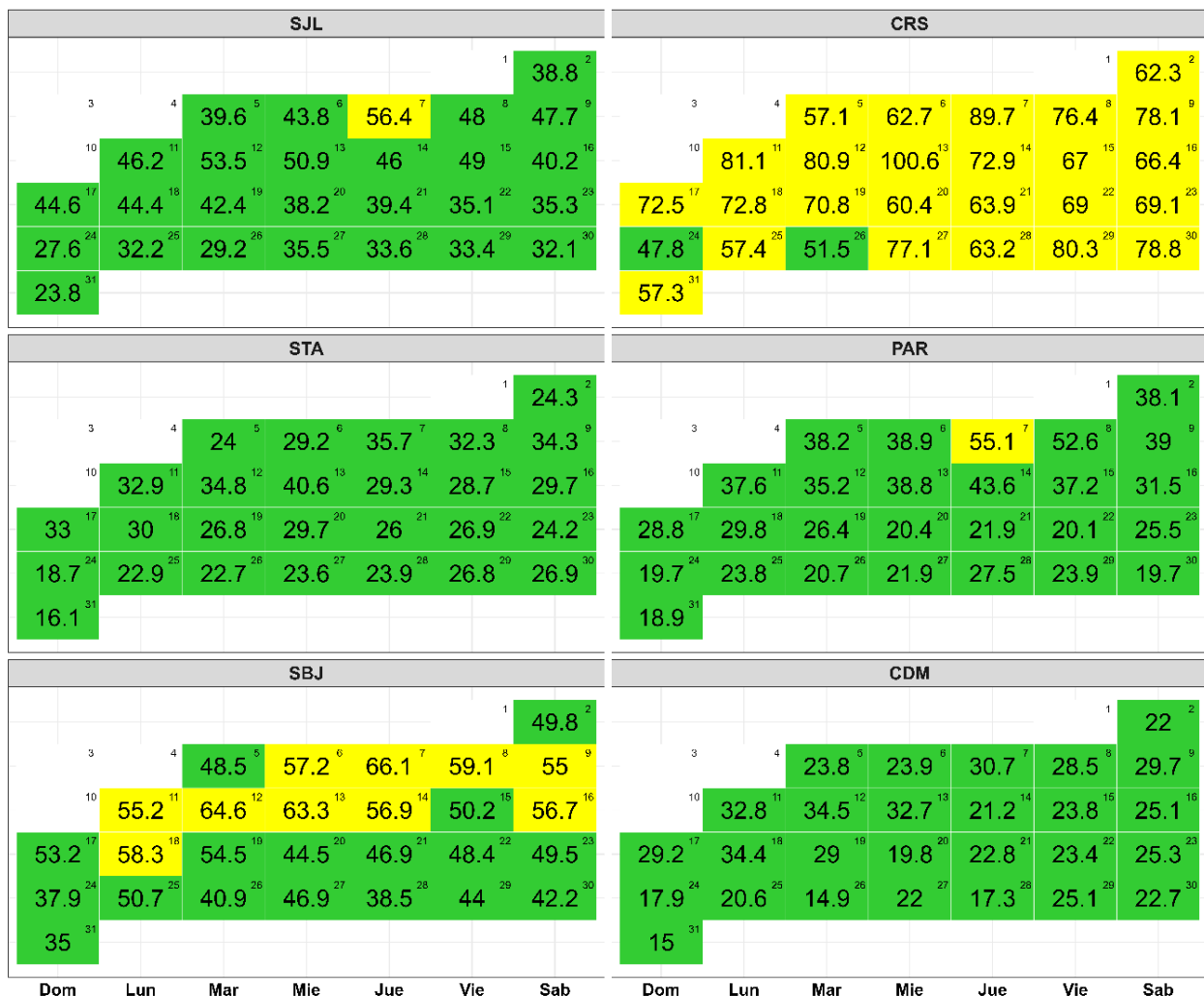
6. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL AMLC

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 salud²⁹.

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 las estaciones STA y CDM presentaron 27 días con calidad del aire “Buena”. Las estaciones SJL y PAR presentaron 1 día con calidad del aire “Moderada” y 26 días con calidad del aire “Buena”. La estación SBJ presentó 10 días con calidad del aire “Moderada” y 17 días con calidad del aire “Buena”. La estación CRS presentó 25 días con calidad del aire “Moderada” y 2 días con calidad del aire “Buena”.

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



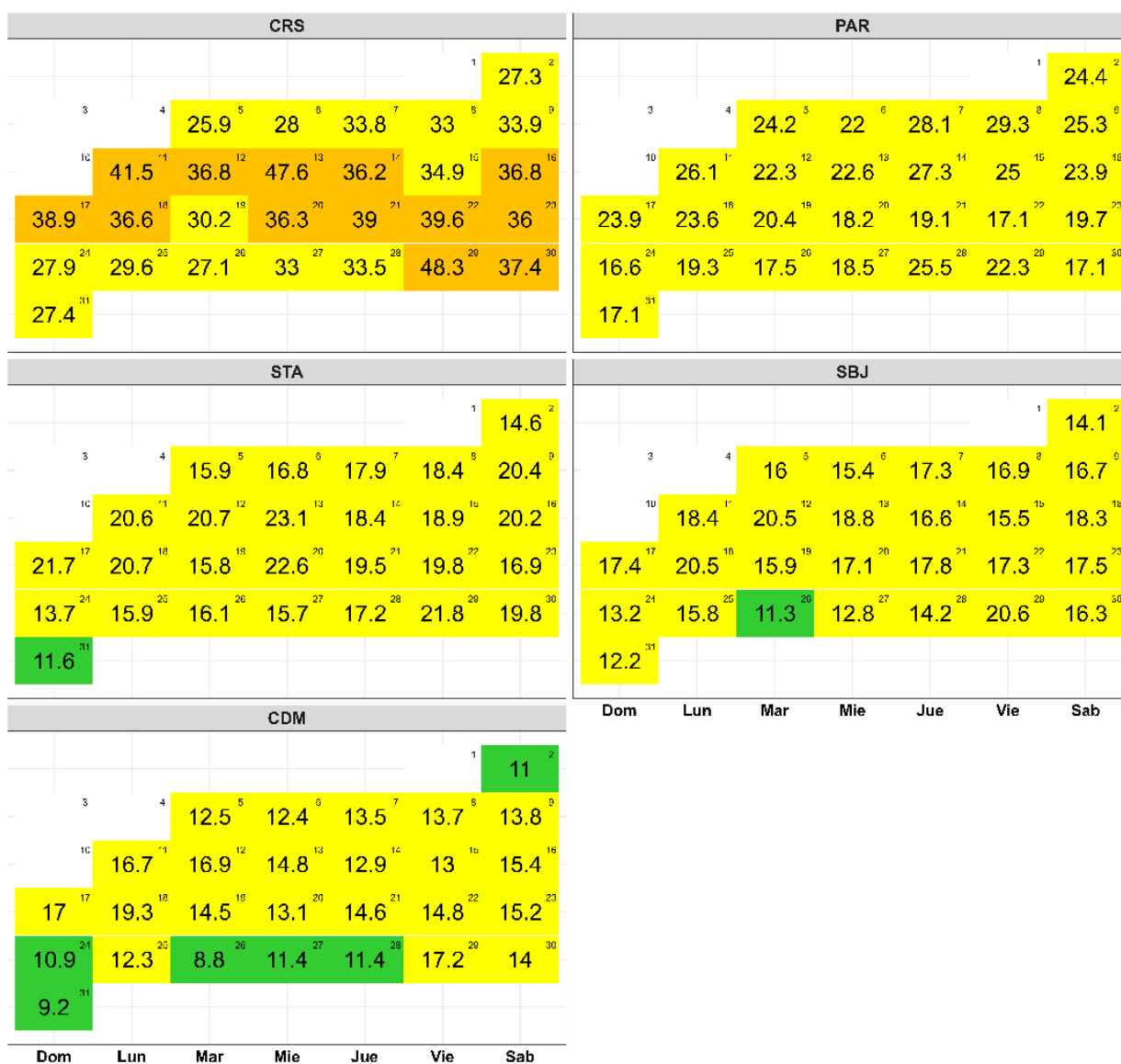
Concentración PM ₁₀ (µg/m ³)		Estado	Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	54	Buena	0	50
55	154	Moderada	51	100
155	254	Insalubre para grupos sensibles	101	150
255	354	Insalubre	151	200

²⁹ 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 CRS presentó 13 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 14 días con calidad del aire “Moderada”. La estación PAR presentó 27 días con calidad del aire “Moderada”. La estación STA presentó 26 días con calidad del aire “Moderada” y 1 día con calidad del aire “Buena”. La estación SBJ presentó 26 días con calidad del aire “Moderada” y 1 día con calidad del aire “Buena”. La estación CDM presentó 21 días con calidad del aire “Moderada” y 6 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	12		0	50
12.1	35.4	Buena	51	100
35.5	55.4	Moderada	101	150
55.5	150.4	Insalubre para grupos sensibles	151	200
		Insalubre		

7. CONCLUSIONES

- Las condiciones meteorológicas influyeron en el comportamiento diario de los contaminantes atmosféricos en el AMLC durante el mes de marzo. 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 marzo, 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.
- La densidad de NO₂ en la columna vertical troposférica mostró sus mayores valores durante la segunda decadiaria, especialmente en las zonas este y sur. Estos valores se vieron reflejados en los valores de las concentraciones en superficie registradas por las estaciones de la REMCA.
- Durante el periodo de análisis, se superó el ECA – aire para PM₁₀ únicamente en la estación CRS el 13 de marzo, alcanzando un valor de 100.6 µg/m³. Mientras que, en el caso del PM_{2,5} no se presentó ninguna superación al ECA – aire, siendo el mayor valor registrado en la zona este, durante la tercera decadiaria, específicamente en la estación CRS. 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 las estaciones SJL, STA, PAR, SBJ y CDM presentaron más del 60% de los días monitoreados una calidad del aire “Buena”, no siendo así para la estación CRS que presentó más del 90% de los días monitoreados una calidad del aire “Moderada”. Por otro lado, para el contaminante PM_{2,5}, la estación CRS presentó más del 40% de los días monitoreados una calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles”.

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

De acuerdo al pronóstico climático³⁰ para el mes de abril del 2024, se espera que en el AMLC las temperaturas máximas y mínimas se ubiquen dentro de su valor 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 otoño.

³⁰ Documento: Boletín climático nacional – marzo 2024 SENAMHI. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02215SENA-129.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 mayo del 2024

industrias

parque
automotor

