

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

Área metropolitana de Lima y Callao

**Noviembre 2024**



## VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LIMA Y CALLAO (AMLC) – NOVIEMBRE 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 noviembre<sup>1,2</sup> y las salidas resultantes de la aplicación del modelo Weather Research and Forecasting (WRF)<sup>3</sup> 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 Traffic<sup>4</sup>. 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 5P<sup>5</sup>.

*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.*

<sup>1</sup> Informe de Vigilancia Sinóptica de Sudamérica – noviembre 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02214SENA-117.pdf>

<sup>2</sup> Boletín climatológico de Lima – noviembre 2024. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02232SENA-125.pdf>

<sup>3</sup> 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.).

<sup>4</sup> 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.

<sup>5</sup> 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.).



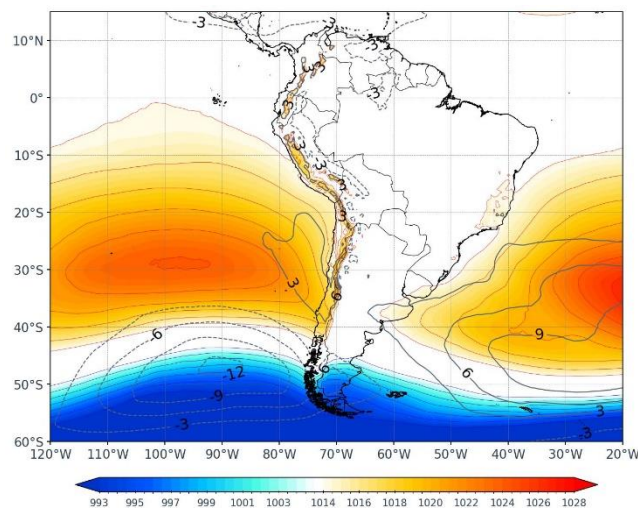
## 1. ANÁLISIS SINÓPTICO Y OCEÁNICO

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 noviembre 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 noviembre)

En la primera decadiaria, se tiene que el Anticiclón del Pacífico Sur (APS) presentó una configuración zonal con núcleo en los 29°S y 97°W con valores de presión alrededor de los 1024 hPa, ligeramente intensificado y desplazado hacia noreste respecto a lo climático<sup>6,1</sup> (Figura N°01a). Los vientos incidentes sobre la costa del AMLC a nivel de superficie presentaron una dirección predominante del sur con velocidades entre 1 y 3 m/s. Por otro lado, las Anomalías de Temperatura Superficial del Mar (ATSM) estuvieron cercanos a los 0.3°C frente a las costas del AMLC, lo cual repercutió en las anomalías de temperaturas máximas y mínimas del aire, encontrándose ligeramente por encima de lo normal, de 0.9°C y 0.1°C, respectivamente<sup>2</sup>.

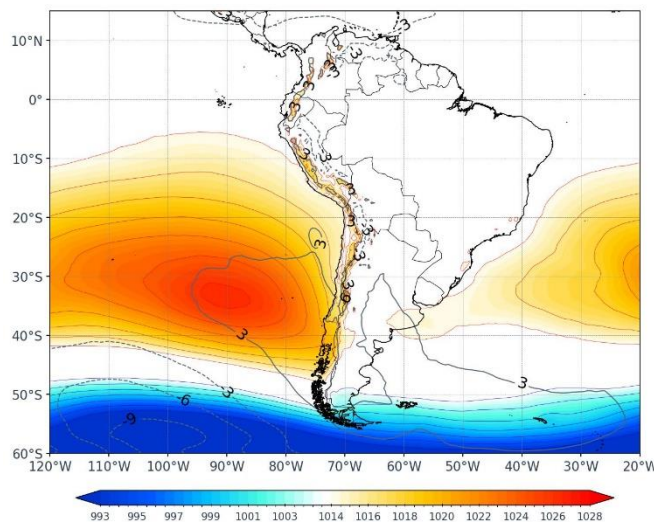
Figura N°01a. Variación del APS en la decadiaria 1.



### 1.2. SEGUNDA DECADIARIA (11 al 20 de noviembre)

En la segunda decadiaria, el APS presentó una configuración cuasi zonal y núcleo en los 35 ° S y 90 °W, con valores de presión alrededor de los 1026 hPa, más intenso respecto a lo climático y desplazado hacia el este<sup>6,1</sup> (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 5 m/s. Por otro lado, respecto a las ATSM<sup>7</sup>, estas se encontraron alrededor de los 0.3°C frente a las costas del AMLC, lo cual repercutió en las temperaturas máximas y mínimas del aire, ubicándolas por encima de su normal en 1.2°C y 0.3°C, respectivamente<sup>2</sup>.

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



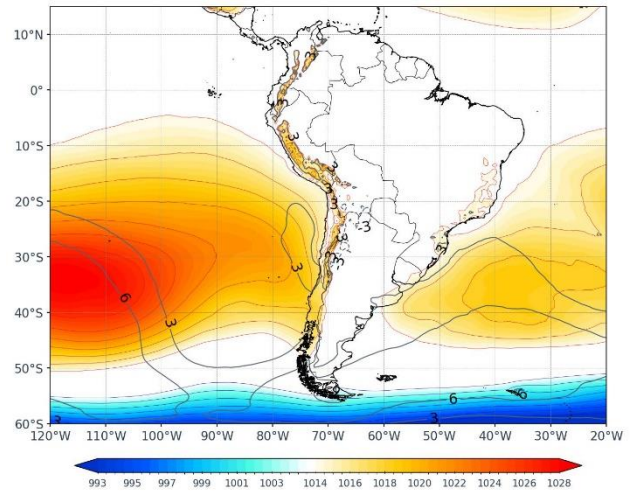
<sup>6</sup> ¿Cómo responderán los anticiclones subtropicales del hemisferio sur al calentamiento global? Mecanismos y estacionalidad en las proyecciones de los modelos CMIP5 y CMIP6 (Pág. 704). Obtenido de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-020-05290-7>

<sup>7</sup> Temperatura superficial del mar y anomalías térmicas en el litoral peruano. Obtenido de: [http://www.imarpe.gob.pe/imarpe/index2.php?id\\_seccion=1017803020000000000000](http://www.imarpe.gob.pe/imarpe/index2.php?id_seccion=1017803020000000000000)

### 1.3. TERCERA DECADIARIA (21 al 30 de noviembre)

Finalmente, en la tercera decadiaria, el APS presentó una configuración zonal y núcleo en los 35°S y 115°W con valores de presión alrededor de los 1028 hPa, notablemente más intenso respecto a lo climático y desplazado hacia el este<sup>6,1</sup> (Figura N° 01c). Asimismo, se presentaron vientos con una dirección predominante del sur y velocidad entre 2 y 5 m/s. Por otro lado, la ATSM fue de -0.2°C frente a las costas de AMLC, al ser cercana a cero, no repercutió en las temperaturas mínimas del aire, Durante esta decadiaria se presentaron anomalías de temperatura máxima de 1.4°C<sup>2</sup>.

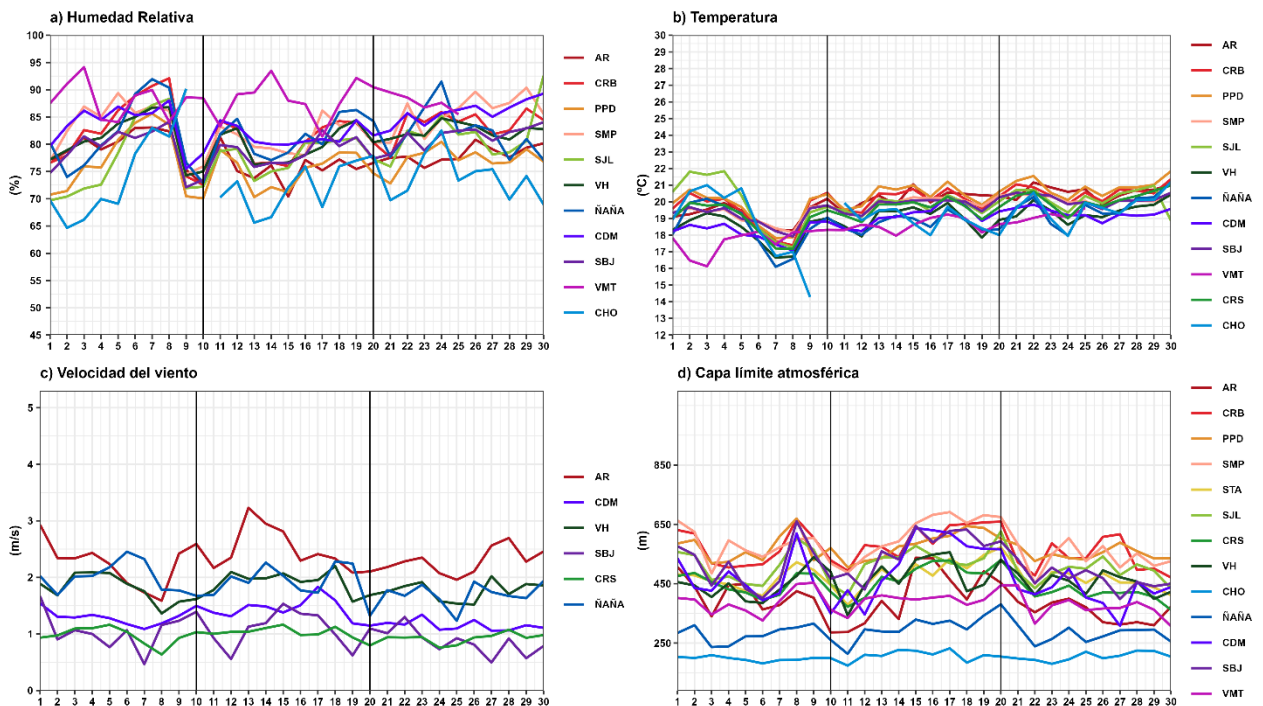
Figura N°01c. Variación del APS en la decadiaria 3.



## 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)<sup>8</sup> 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



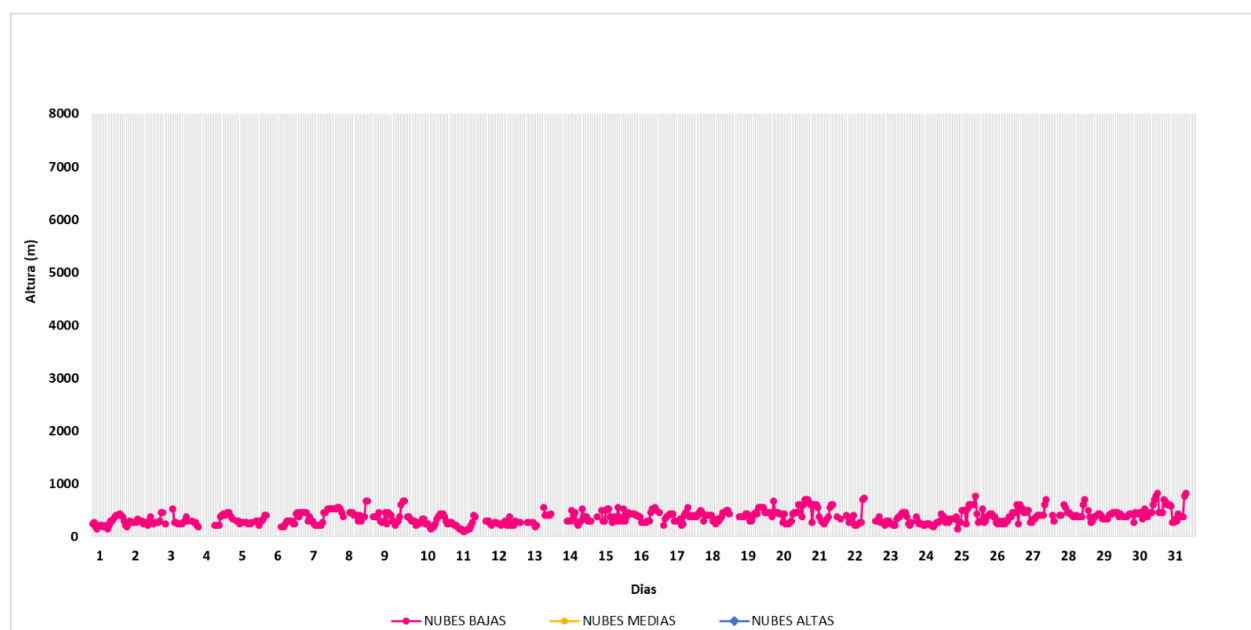
<sup>8</sup> CLA: parte de la tropósfera influenciada directamente por la superficie terrestre, donde se concentra la mayor cantidad de sustancias contaminantes.

Con respecto a la humedad relativa (Figura N° 02a), durante la primera decadiaria se presentaron valores entre 64.6% a 94.1%, para la segunda decadiaria entre 65.6% a 93.5% y para la tercera decadiaria entre 68.9% a 92.5%, siendo las estaciones CDM, SMP y VMT aquellas que mantuvieron los promedios de humedad más altos, de 86%, 86% y 87.5%, respectivamente. En relación con la temperatura (Figura N° 02b) durante la primera decadiaria se presentó valores entre 14.3 a 21.8°C, para la segunda decadiaria entre 17.8 a 21.1 °C, y en la tercera decadiaria entre 17.9 a 21.8 °C, siendo la estación de PPD la que alcanzó el valor promedio más alto de temperatura de 20.3°C. En cuanto a la velocidad del viento (Figura N° 02c), fue muy variable, lo que se refleja en sus valores, los mismos que oscilaron entre 0.4 a 3.2 m/s durante todo el mes, siendo la estación AR la que alcanzó los valores promedio más altos, con un promedio mensual de 2.3 m/s. En el caso de la altura de la CLA (Figura N° 02d), las estaciones SMP, CRB y PPD alcanzaron los valores promedio más altos, con una altura promedio de 579.2, 567.9 y 567.1m, respectivamente, mientras que, en las estaciones ÑAÑA y CHO se presentaron los valores promedio más bajos, con 203.3 y 288m, 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 ceilómetro<sup>9</sup> de la EMA Aeropuerto Internacional Jorge Chávez ubicada en el Callao (Figura N° 03), se observó que, durante el mes de noviembre, las nubes bajas (ABN menor a 2000 m) tuvieron mayor presencia, siendo el 77% de los casos. Con respecto a la presencia de nubes medias (ABN mayor a 2000 m y menor a 6000 m), el 1% nubes se encontraron dentro de esta capa. Respecto a las horas con condición de cielo despejado, estas fueron de apenas 21%. En noviembre predominaron las condiciones de nubes bajas, situación característica de primavera.

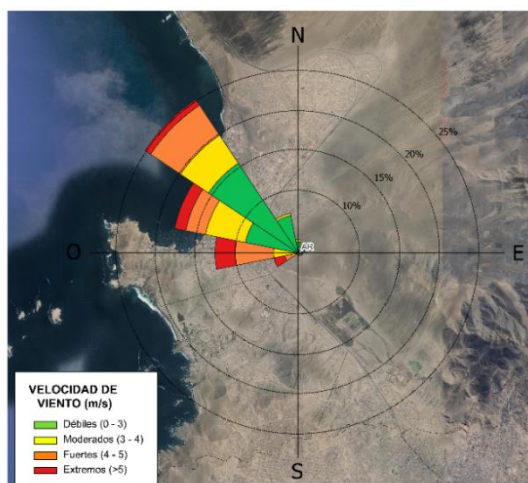
Figura N°03. Altura de base de la nube registrada en la estación Aeropuerto Internacional Jorge Chávez (JCH).



<sup>9</sup> 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 velocidad<sup>10</sup>.

A manera de ejemplo se muestra en la Figura N° 04 una rosa de vientos para la estación Antonio Raimondi, la cual presenta una dirección predominante (con una frecuencia de vientos del 25%) del noroeste (NO) y una intensidad máxima de extrema (>5m/s).

En la Figura N° 05 se muestra el comportamiento de la dirección y velocidad del viento en cada una de las EMA para los horarios diurnos (07:00 - 12:59 horas), vespertinos (13:00 -18:59 horas) y nocturnos (19:00 - 06:59 horas) con sus respectivas categorías de la intensidad del viento; débiles (0 – 3 m/s), moderados (3 – 4 m/s), fuertes (4 – 5 m/s) y extremos (>5m/s).

Es así como se observó, que en el horario diurno (Figura N° 05a), las estaciones CDM y ÑAÑA presentaron vientos con una dirección predominante de suroeste (SO) con intensidad máxima de débil y extrema. Para la estación de AR, se tuvo vientos con una dirección predominante del oeste suroeste (OSO) con intensidad máxima de extrema. En el caso de la estación CRS presentó vientos con una dirección predominante del sur suroeste (SSO) con intensidad máxima de débil. Finalmente, para la estación SBJ se presentó vientos con una dirección predominante del sur (S), con intensidad máxima de débil y en la estación VH se presentó vientos con una dirección predominante del oeste (O), con una intensidad máxima de fuerte.

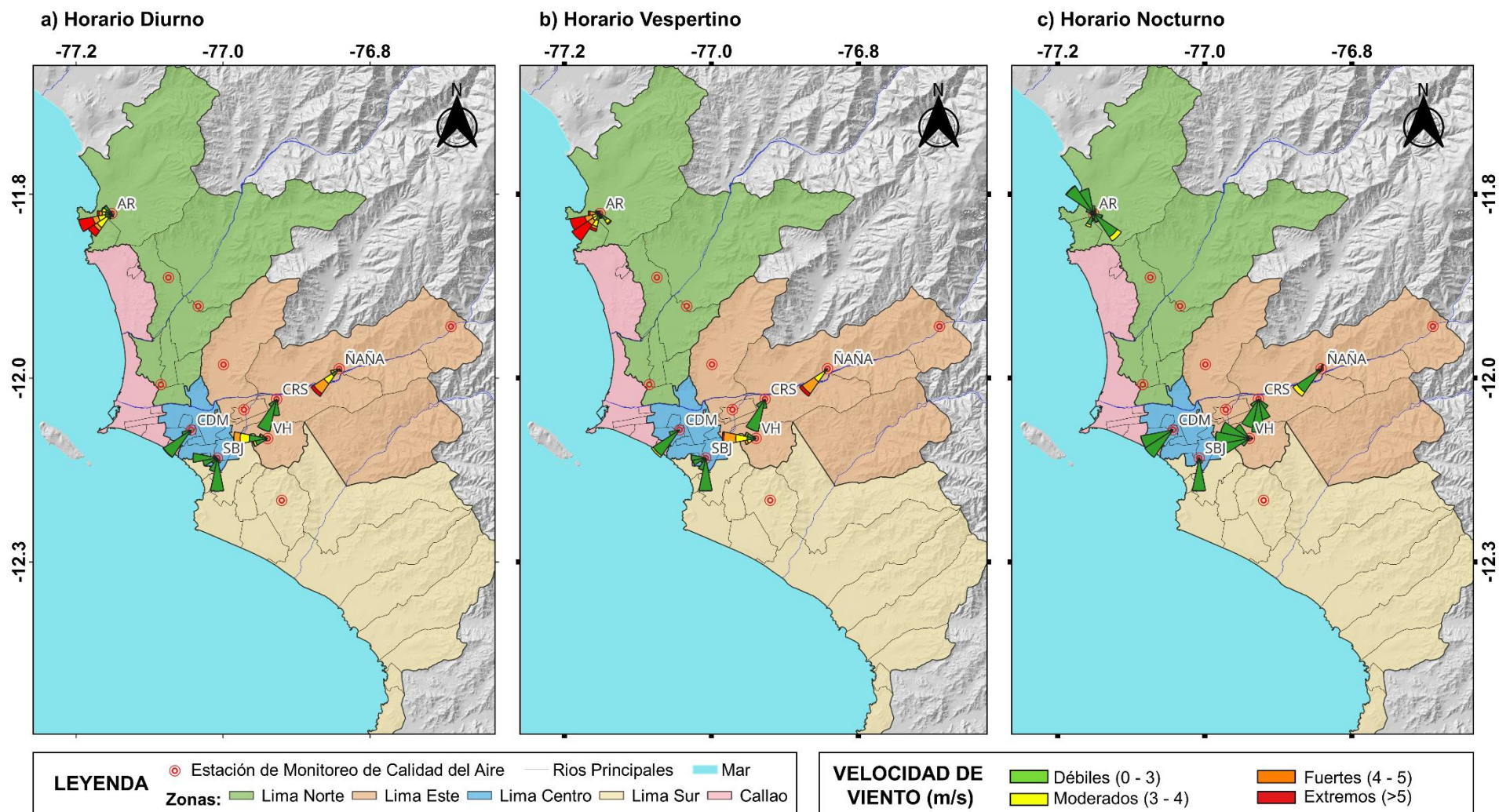
Para el horario vespertino (Figura N°05b), la estación CDM, ÑAÑA y AR presentó vientos con una dirección predominante de suroeste (SO) con una intensidad máxima de moderada para CDM y extrema para ÑAÑA y AR. Para las estaciones de CRS y SBJ se presentaron vientos con direcciones predominantes del sur suroeste (SSO) y del sur (S), con una intensidad máxima de débil. Finalmente, la estación de VH presentó vientos con una dirección predominante del oeste (O) y una intensidad máxima de extrema.

Para el horario nocturno (Figura N°05c), la estación CDM y ÑAÑA presentaron vientos con una dirección predominante de suroeste (SO) y una intensidad máxima de débil para CDM y moderada para ÑAÑA. Para las estaciones de CRS y SBJ se presentaron vientos con una dirección predominante del sur (S) y con una intensidad máxima de débil. Finalmente, las estaciones de VH y AR presentaron vientos con una dirección predominante del oeste (O) y sureste (SE) con una intensidad máxima de débil y moderada.

<sup>10</sup> 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](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).

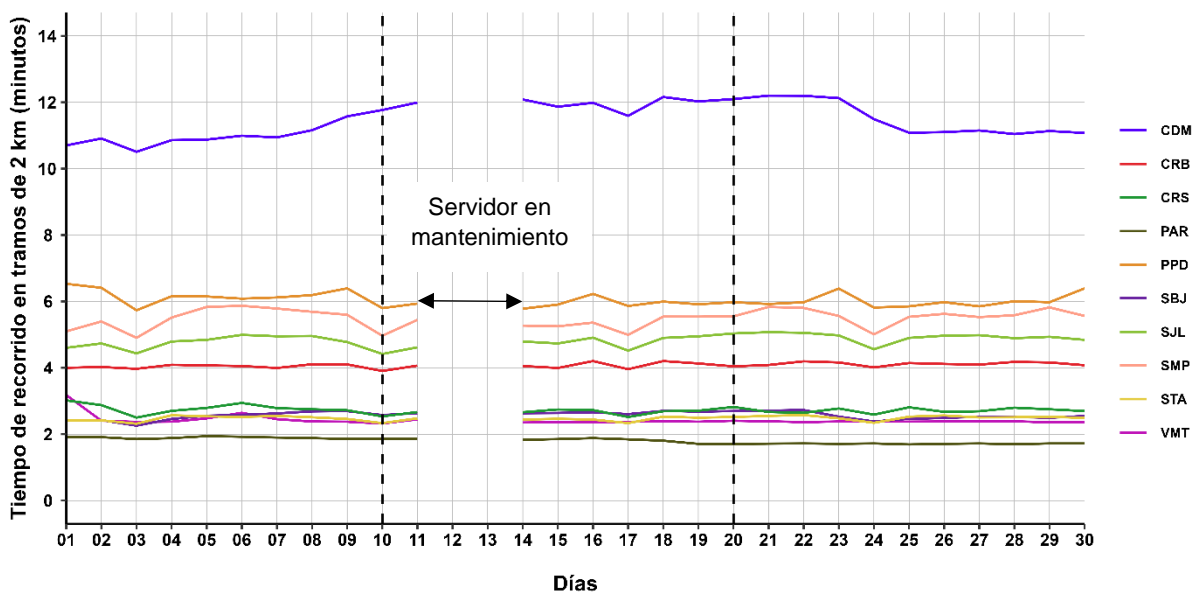
### 3. ACTIVIDAD VEHICULAR EN EL AMLC

La actividad vehicular tiene una contribución de más del 50% sobre la contaminación del aire en el AMLC<sup>11</sup>, 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 minutos<sup>12</sup>. 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<sup>13,14</sup>.

En relación con lo indicado, se ha desarrollado un algoritmo en Python que utiliza la técnica de web scraping<sup>15</sup> para extraer datos sobre el tiempo de recorrido en tramos de 2 km de las principales avenidas<sup>16</sup>, 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 la estación CDM, ubicada en la zona centro, el valor promedio diario más alto de 12.2 minutos se alcanzó durante inicios de la tercera decadiaria (el 21 de noviembre). Asimismo, en la zona norte, el valor promedio diario más alto de 6.5 minutos se alcanzó durante la primera decadiaria (el 1 de noviembre) en los alrededores de la estación PPD. En la zona este, el valor promedio diario más alto de 5.1 minutos se alcanzó durante inicios de la tercera decadiaria (el 21 de noviembre) en los alrededores de la estación SJL. Finalmente, en la zona sur, estación VMT, el valor promedio diario más alto de 3.2 minutos se alcanzó durante la primera decadiaria (el 1 de noviembre). En general, los valores promedios diarios se mantuvieron relativamente constantes a lo largo del mes en la mayoría de las estaciones, con excepción de la estación CDM, destacándose una variación en los tiempos de demora de sábado a domingo y de domingo a lunes, lo que refleja el cambio entre días laborables a no laborables; asimismo, en los alrededores de la estación CDM se observó un incremento en los tiempos de demora hacia la segunda decadiaria, atribuido a los trabajos de construcción vial en el centro de Lima.

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



<sup>11</sup> 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>

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

<sup>13</sup> 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>

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

<sup>15</sup> 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.

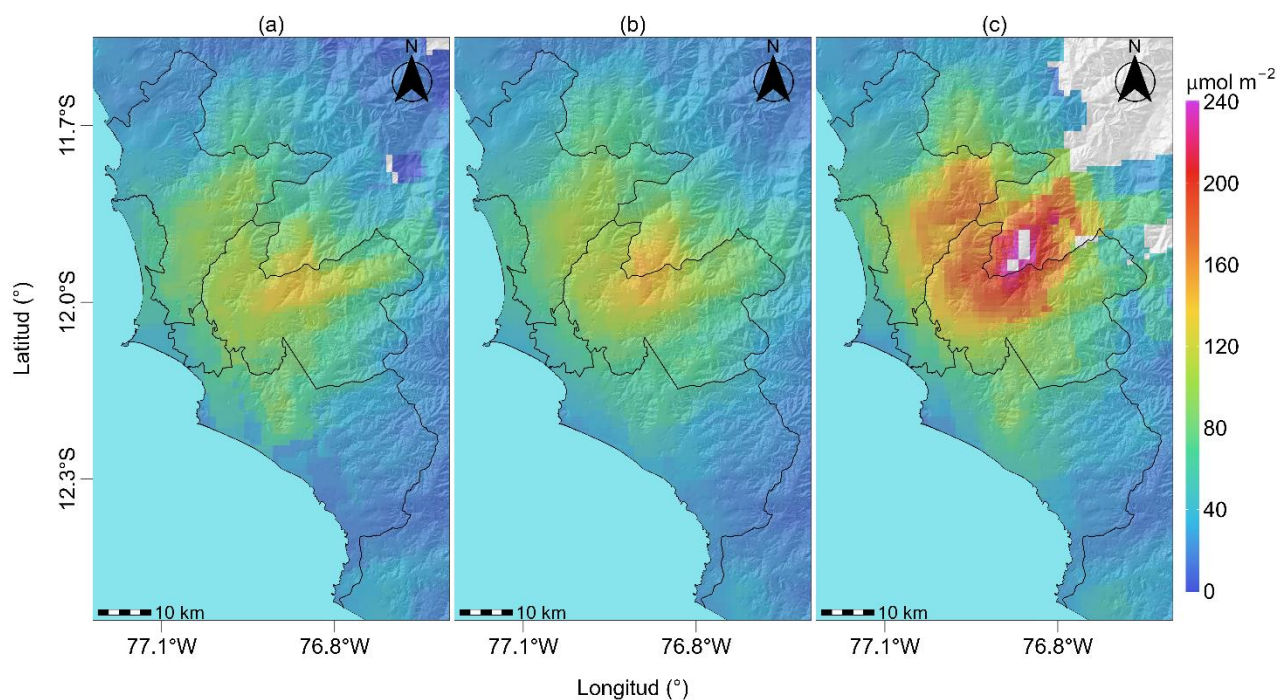
<sup>16</sup> Estudio: Extracción y Minería de Datos de Tráfico en Google Maps. Obtenido de: [https://www.irimets.com/uploadedfiles/paper/volume3/issue\\_4\\_april\\_2021/8350/1628083343.pdf](https://www.irimets.com/uploadedfiles/paper/volume3/issue_4_april_2021/8350/1628083343.pdf)



#### 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 NO<sub>2</sub> (μmol/m<sup>2</sup>), obtenidas del satélite Sentinel 5P (instrumento Tropomi) a una resolución aproximada de 5 km x 3.5 km durante el mes de noviembre. Es así como, la Figura N° 07a, muestra la distribución espacial promedio de NO<sub>2</sub> en la primera decadiaria (1 a 10 de noviembre), la Figura N° 07b, en la segunda decadiaria (11 al 20 de noviembre) y la Figura N° 07c en la tercera decadiaria (21 al 30 de noviembre).

Figura N° 07. Distribución espacial de la columna del NO<sub>2</sub> (μmol/m<sup>2</sup>) en la tropósfera del AMLC.



De manera general, la mayor densidad del NO<sub>2</sub> 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 138.5 μmol/m<sup>2</sup> en la zona este y de 102 μmol/m<sup>2</sup> en la zona norte. Asimismo, no se presentó una variación significativa de las densidades de NO<sub>2</sub> en la columna vertical troposférica entre la primera y la segunda decadiaria, salvo en el caso de la zona norte donde se dio un incremento de 11.1% respecto al promedio de la primera decadiaria; el valor máximo fue de 148 μmol/m<sup>2</sup> en la zona este. En la tercera decadiaria, se presentó de manera general un incremento de la densidad del NO<sub>2</sub> en la columna vertical troposférica en todas las zonas del AMLC, especialmente en la zona norte y este (36% y 31% mayor que en la segunda decadiaria, respectivamente); el valor máximo fue de 229.8 μmol/m<sup>2</sup> en la zona este.

Cabe precisar que el NO<sub>2</sub> se origina principalmente por la oxidación del nitrógeno atmosférico durante procesos de combustión, especialmente relacionados a la actividad vehicular.<sup>17,18</sup> Debido a la dirección de viento, el NO<sub>2</sub> tiende a dispersarse hacia las zonas norte y este del AMLC. Esta situación, combinada con la mayor circulación de vehículos de carga pesada o transporte de mercancía en dichas áreas, contribuye a que se registren los mayores valores de densidad de NO<sub>2</sub> en estas zonas.

<sup>17</sup> Monitoreando el Dióxido de Nitrógeno desde el Espacio. Obtenido de: [https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/Inside\\_Look\\_AQ\\_Spanish.pdf](https://appliedsciences.nasa.gov/sites/default/files/2020-11/Inside_Look_AQ_Spanish.pdf)

<sup>18</sup> 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>

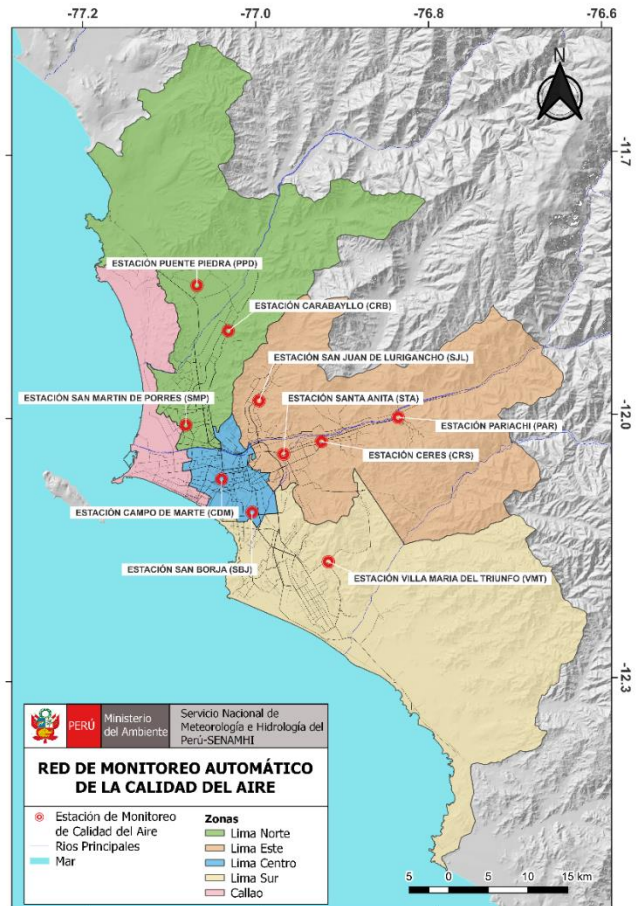
## 5. RED DE MONITOREO AUTOMÁTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL AMLC

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 PM<sub>10</sub> (Material Particulado con diámetro menor a 10 micras), PM<sub>2,5</sub> (Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras), NO<sub>2</sub> (Dióxido de Nitrógeno), O<sub>3</sub> (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

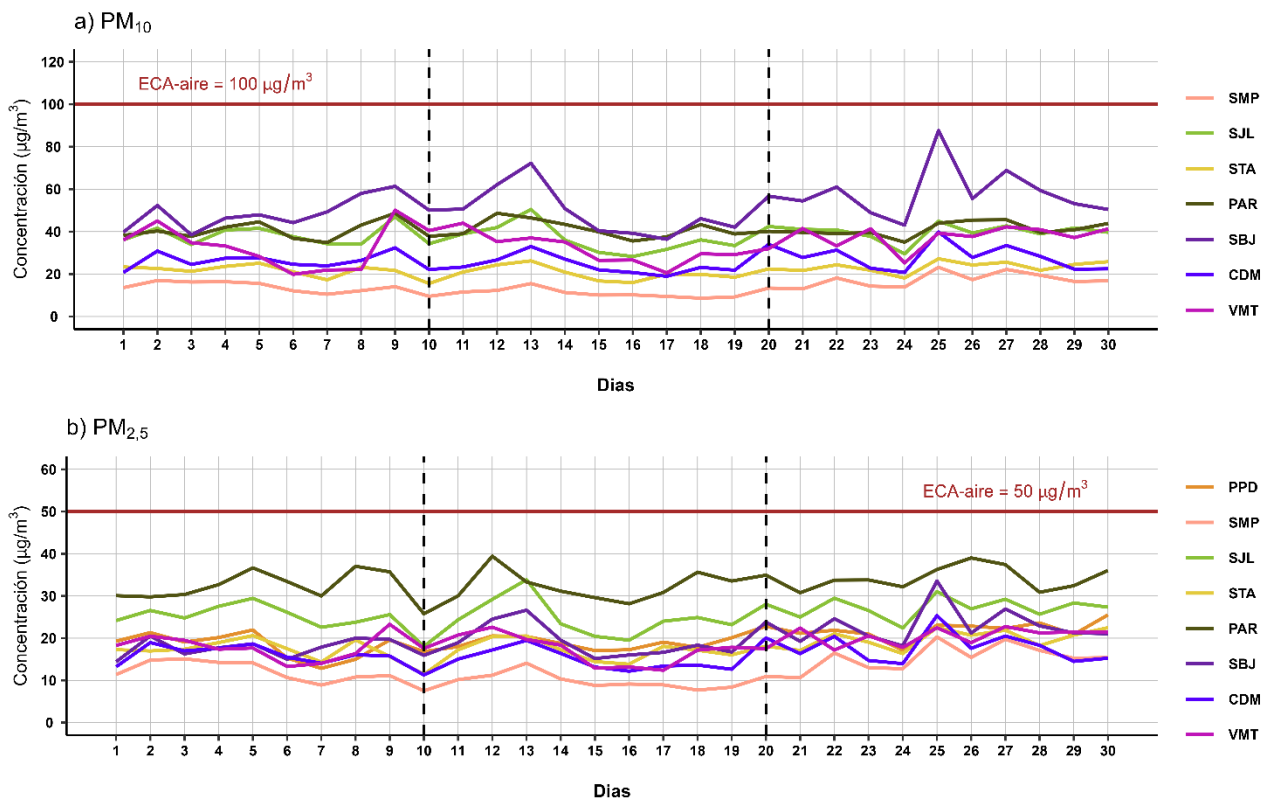
Con los datos de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire ubicadas en el AMLC, se analizó la variabilidad diaria de las concentraciones del material particulado y gases. Los datos provinieron de las estaciones: Puente Piedra (PPD), Carabayllo (CRB), San Martín de Porres (SMP), San Juan de Lurigancho (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<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub>)

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 µm<sup>19</sup>.

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)<sup>11</sup>. 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<sub>2,5</sub>, mientras que un incremento en la temperatura está relacionado con un incremento en las concentraciones de PM<sub>10</sub><sup>20</sup>.

Figura N°09. Variación diaria del PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> (µg/m<sup>3</sup>) en el AMLC.



<sup>19</sup> 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>

<sup>20</sup> 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, en ninguna de las estaciones se registraron concentraciones diarias de PM<sub>10</sub> superiores al ECA-aire de 100 µg/m<sup>3</sup> (como promedio diario). Presentándose el valor máximo de 87.6 µg/m<sup>3</sup>, en la estación SBJ, el lunes 25 de noviembre (las concentraciones más altas se registraron entre las 10:00 y 13:00 horas), lo cual estaría asociado a la resuspensión de polvo por actividad vehicular en la zona centro (durante días particulares), así como un incremento de la temperatura durante las horas de mayor concentración. Se identifica una tendencia general en la que las concentraciones promedio muestran poca variación entre la primera y la segunda decadiaria, mientras que hacia la tercera decadiaria se registra un incremento más significativo. El comportamiento presentado estaría asociado a la actividad vehicular, así como a factores meteorológicos como el incremento de la temperatura y la disminución de la altura de la CLA especialmente durante la última decadiaria. (ver Figura N° 02b y Figura N° 02d)<sup>20, 21, 22</sup>

En la Figura N° 09b, se evidencia que respecto a PM<sub>2,5</sub>, en la estación PAR no se registró concentraciones diarias de PM<sub>2,5</sub> superiores al ECA-aire de 50 µg/m<sup>3</sup> (como promedio diario), durante el periodo de monitoreo. El valor máximo de 39.4 µg/m<sup>3</sup> fue alcanzado en la estación PAR durante inicios de la segunda decadiaria, el martes 12 de noviembre (las concentraciones más altas se registraron entre las 08:00 y 10:00 horas), lo cual estaría principalmente asociado a la actividad vehicular en la zona este. De manera general, se observa poca variación entre la primera y la segunda decadiaria, con excepción de la estación SMP que tiene una tendencia a la reducción y la estación SBJ, que por su parte tiene una tendencia al incremento de las concentraciones. Por otro lado, hacia la tercera decadiaria se presentó una tendencia al incremento de las concentraciones en todas las estaciones, este comportamiento estaría asociado a un incremento en la humedad relativa y una disminución en la altura de la CLA. (ver Figura N° 02a y 02d)<sup>20,21,22</sup>.

### 5.1.2. GASES (CO, O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub>)

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 CO<sup>23</sup>.

El O<sub>3</sub> 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 + NO<sub>2</sub>), conocidos como precursores. Por lo tanto, suele existir una relación inversa entre las concentraciones de NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub><sup>24</sup>, siendo que, el pico del ciclo del O<sub>3</sub> aparece aproximadamente 6 horas después del pico del NO y 5 horas después del NO<sub>2</sub><sup>25</sup>. Por otro lado, se observa una estrecha relación entre los niveles elevados de O<sub>3</sub> 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 temperatura<sup>26</sup>.

<sup>21</sup> 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>

<sup>22</sup> 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

<sup>23</sup> 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>

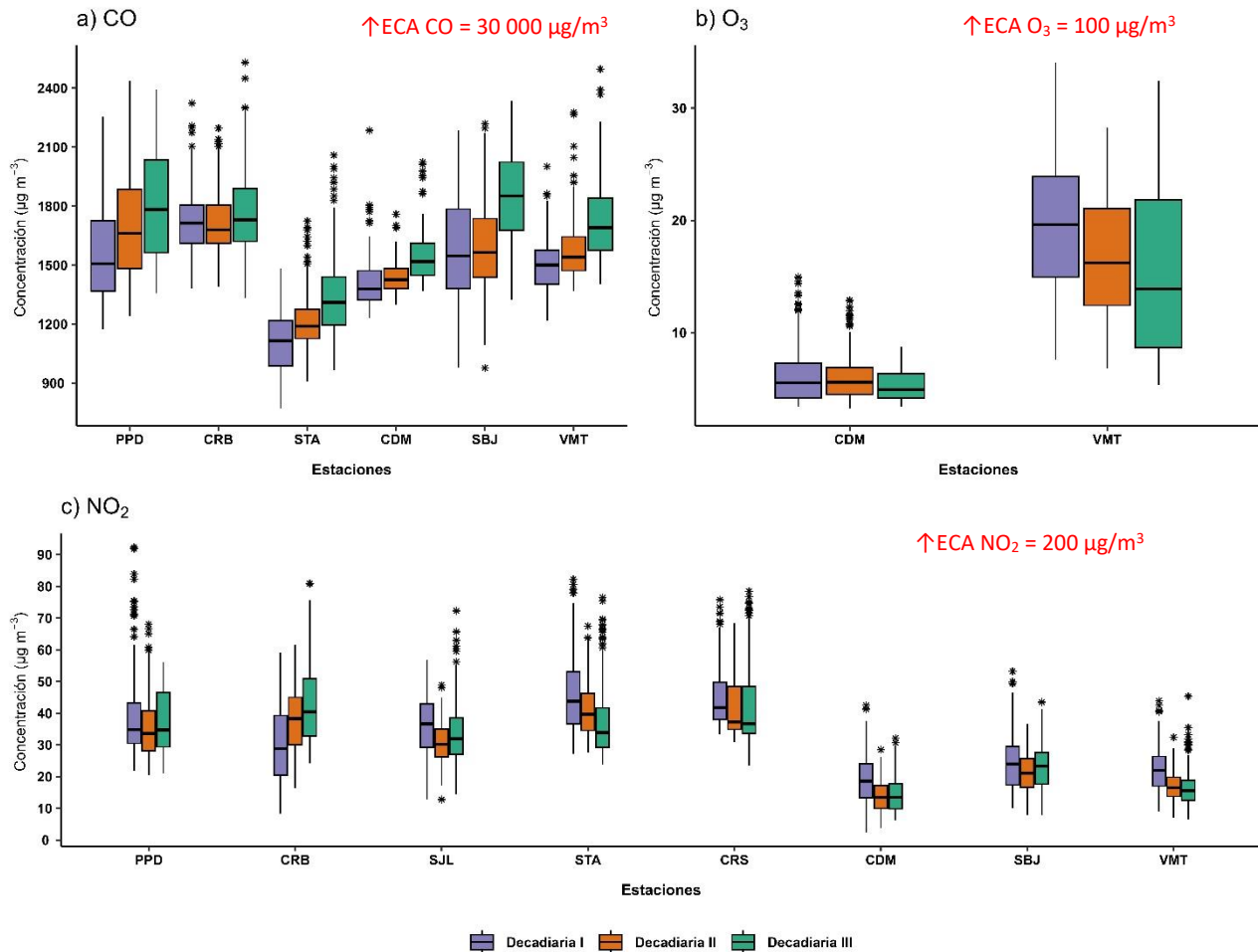
<sup>24</sup> Ozono y compuestos orgánicos volátiles en el área metropolitana de Lima-Callao, Perú. Obtenido de: <https://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/237>

<sup>25</sup> Análisis de la Relación entre O<sub>3</sub>, NO y NO<sub>2</sub> en Tianjin, China. Obtenido de: <https://aaqr.org/articles/aaqr-10-07-0a-0055>

<sup>26</sup> Análisis temporal de los contaminantes atmosféricos (NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 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](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162023000100017)

El NO<sub>2</sub> está considerado dentro del grupo de gases altamente reactivos conocidos como óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), siendo usado como un indicador de la presencia de este grupo más amplio<sup>27</sup>. El NO<sub>2</sub> 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 NO<sub>2</sub>, debido a que fomentan las reacciones que dan origen al O<sub>3</sub>, favoreciendo con ello el consumo de NO<sub>2</sub> como su precursor<sup>26</sup>.

Figura N°10. Variación de las concentraciones del CO, O<sub>3</sub> y NO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>) 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/m<sup>3</sup> (como promedio horario) durante todo el periodo de monitoreo. Asimismo, se puede apreciar que, el valor más alto se registró durante la tercera decadiaria en la zona norte, estación CRB, con una máxima de 2 530 µg/m<sup>3</sup> (viernes 29 de noviembre a las 23:00 horas), lo cual estaría relacionado con una reducción en la altura de la CLA, así como también una reducción en la temperatura y un incremento en la humedad relativa. Respecto al comportamiento decadiario, se observa que, los mayores valores de concentración se presentaron en la tercera decadiaria, situación que pudo haberse visto favorecida por incrementos en la humedad relativa, así como a una reducción en la altura de la CLA (ver Figura N° 02a y 02d), que favorecería la estabilidad y la acumulación de los contaminantes.

En relación con el O<sub>3</sub>, la Figura N° 10b muestra que las concentraciones promedio móvil de 8 horas no superaron el valor del ECA-aire de 100 µg/m<sup>3</sup> (como máxima media de 8 horas) durante los días monitoreados. Asimismo, se puede apreciar que el valor más alto se registró en la estación VMT, con una máxima de 34.1 µg/m<sup>3</sup> el sábado 9 de noviembre. Las mayores concentraciones se registraron en horarios

<sup>27</sup> United States Environmental Protection Agency. (25 de julio del 2023). *Basic Information about NO<sub>2</sub>*. <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2#What%20is%20NO2>

posteriores al periodo de máxima radiación solar<sup>28</sup> (comprendido entre las 16:00 horas y 19:00 horas). En cuanto al comportamiento decadiario, se observa que, en promedio, tanto en la estación VMT como en la estación CDM, se registró una reducción de concentraciones hacia la segunda decadiaria, la cual estaría favorecida por el incremento en la altura de la CLA (ver Figura N° 02d). Esta tendencia a la reducción continuó hacia la tercera decadiaria, posiblemente influenciada por el aumento en las concentraciones de material particulado, lo que favorece una mayor dispersión de la radiación solar y, por ende, una menor disponibilidad de radiación en la superficie terrestre para la formación de O<sub>3</sub><sup>29</sup> (Ver Figura N° 09).

En la Figura N° 10c, se observa que las concentraciones horarias de NO<sub>2</sub> registradas en las estaciones no superaron el valor de su ECA-aire de 200 µg/m<sup>3</sup> (como promedio horario) durante todo el período de monitoreo. La mayor concentración se reportó en la zona norte, en la estación PPD (el sábado 9 de noviembre a las 16:00 horas), alcanzando 92.3 µg/m<sup>3</sup>, lo cual estaría asociado a la actividad vehicular en la zona este (89% de las emisiones de NO<sub>x</sub> provienen de vehículos a diésel)<sup>10</sup>, así como también a la disminución de la altura de la CLA para este día (Ver Figura N° 02d). En relación con el comportamiento decadiario, se destaca la reducción de las concentraciones observada en la mayoría de las estaciones de la primera a la segunda decadiaria, especialmente en las estaciones CDM y VMT. Este descenso estaría relacionado con un incremento en la altura de la CLA (ver Figura N° 02d), condición que habría favorecido la dispersión del contaminante.

## 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<sup>30 31</sup>.

### 6.1. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM<sub>10</sub>

La Figura N° 11 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM<sub>10</sub> asociados a su respectivo estado de la calidad del aire. Se observó que, las estaciones SMP (en la zona norte), SJL, STA, PAR (en la zona este), CDM (en la zona centro) y VMT (en la zona sur) presentaron 30 días con calidad del aire “Buena”. Mientras que, la estación SBJ presentó 10 días con calidad del aire “Moderada” y 20 días con calidad del aire “Buena”.

### 6.2. ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA EL PM<sub>2,5</sub>

La Figura N° 12 muestra las concentraciones promedio de 24 horas para el PM<sub>2,5</sub> asociados a su respectivo estado de la calidad del aire. Se observó que, las estaciones PPD (en la zona norte), SJL, STA (en la zona este), CDM (en la zona centro) y VMT (en la zona sur) presentaron 30 días con calidad del aire “Moderada”. Mientras que, la estación SMP (en la zona norte) presentó 24 días con calidad del aire “Moderada” y 6 días con calidad del aire “Buena”; y la estación PAR (en la zona este) presentó 9 días con calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” y 21 días con calidad del aire “Moderada”.

<sup>28</sup> 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>

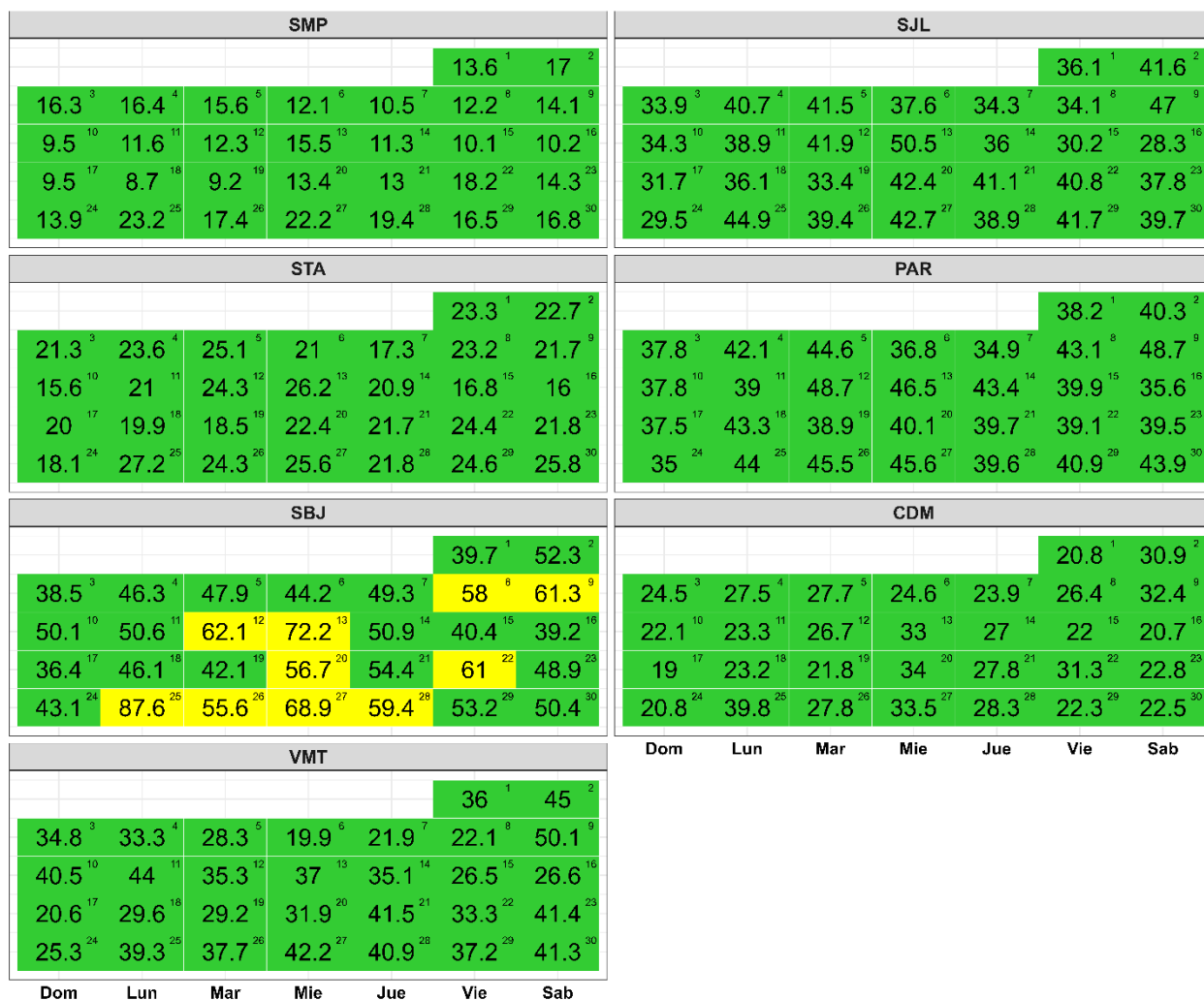
<sup>29</sup> Liu, T., Sun, J., Liu, B., Li, M., Deng, Y., Jing, W., & Yang, J. (2022). Factors influencing O<sub>3</sub> concentration in traffic and urban environments: A case study of Guangzhou city. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12961.

<sup>30</sup> Air Quality Index. A guide to Air Quality and Your Health. Obtenido de: [https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/airquality\\_brochure\\_02\\_14\\_0.pdf](https://www.airnow.gov/sites/default/files/2018-04/airquality_brochure_02_14_0.pdf)

<sup>31</sup> Final Updates to the Air Quality Index (AQI) for Particulate Matter. Obtenido de: <https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-02/pm-naaqs-airquality-index-fact-sheet.pdf>

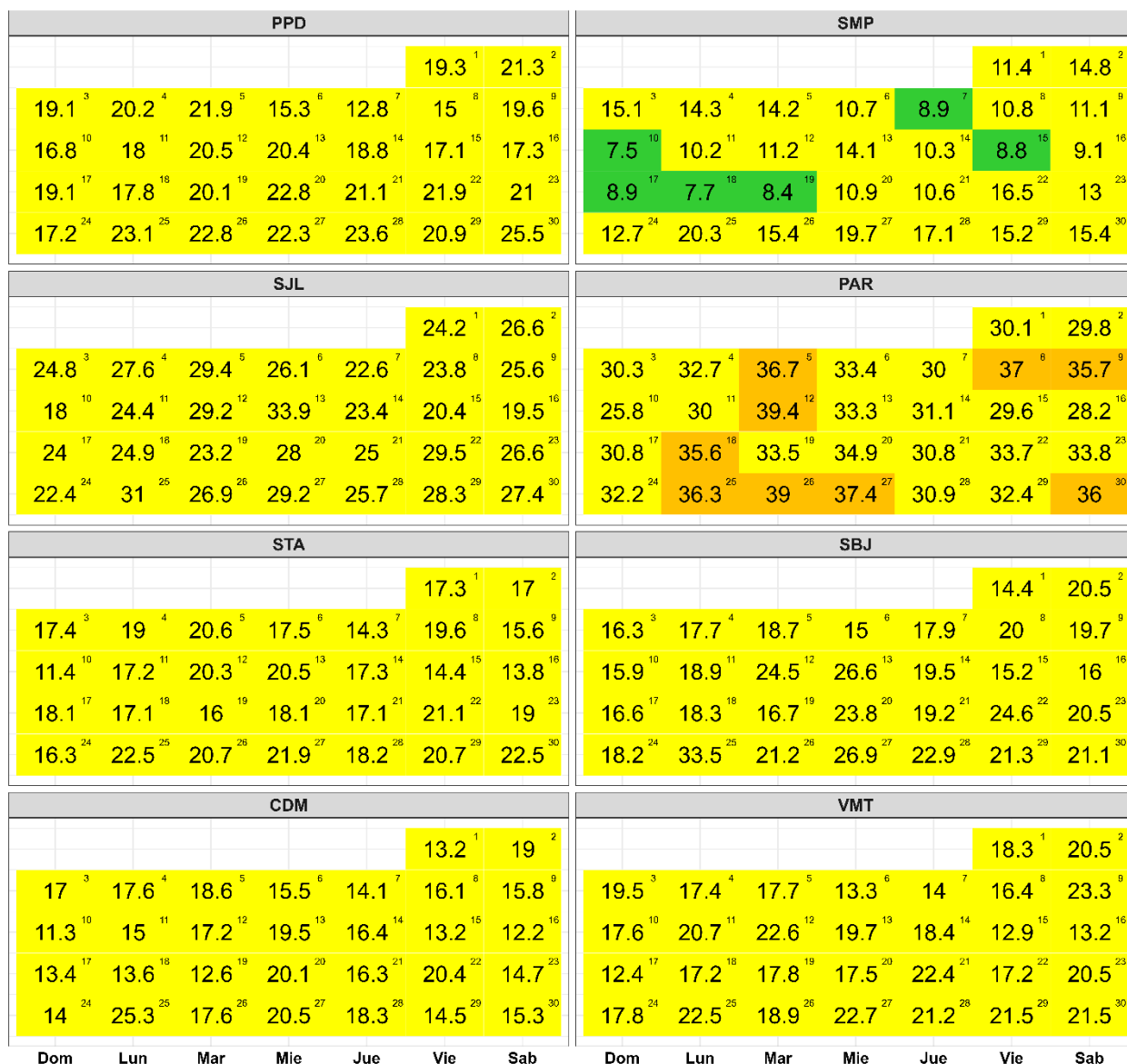


Figura N° 11. Índice de la Calidad del Aire para PM<sub>10</sub>



Concentración PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )		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<sub>2.5</sub>



Concentración PM <sub>2.5</sub> (µg/m³)		Estado	Índice de Calidad del Aire - EPA	
0	9		Buena	0
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 noviembre. Se ha presentado una ligera tendencia al incremento de las temperaturas comparado con lo presentado en el mes anterior lo cual favoreció la reducción del PM<sub>2,5</sub>.
- Durante el mes de noviembre, los mayores valores de tiempo de recorrido (mayor congestión vehicular), se presentaron en la zona centro, en los alrededores de la estación CDM, especialmente durante la segunda decadiaria.
- Se observa que no hubo una variación significativa de la densidad de NO<sub>2</sub> en la columna vertical troposférica, entre la primera y la segunda decadiaria, mientras que para la tercera decadiaria se observa un incremento generalizado, siendo mayor en la zona norte y este. En todas las decadiarias los mayores valores se presentaron en la zona este.
- No se superó el ECA – aire para PM<sub>10</sub> en ninguno de los días del periodo de monitoreo, alcanzando un valor máximo de 87.6 µg/m<sup>3</sup> en la estación SBJ. En el caso del PM<sub>2,5</sub>, tampoco fue superado el ECA – aire durante el periodo de monitoreo, alcanzando un valor máximo de 39.4 µg/m<sup>3</sup>. Estas concentraciones estarían asociadas a las condiciones de actividad vehicular y meteorológicas presentes.
- Durante el período de análisis, las concentraciones diarias de CO, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub> 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.
- Con respecto al ICA para el contaminante PM<sub>10</sub>, se pudo apreciar que la estación SBJ presentó mayor cantidad de días con calidad del aire “Moderada” (33% de los días monitoreados), el resto de los días presentó calidad del aire “Buena”. En cuanto al contaminante PM<sub>2,5</sub>, la estación PAR presentó una calidad del aire “Insalubre para grupos sensibles” en hasta un 30% de los días monitoreados, mientras que el resto de los días presentó una calidad del aire “Moderada”.

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

De acuerdo con el pronóstico climático<sup>32</sup> para el mes de diciembre del 2024, se espera que en el AMLC las temperaturas máximas se encuentren dentro de sus rangos normales a por encima de su normal; mientras que las temperaturas mínimas se mantengan dentro de su rango normal. Considerando el comportamiento estacional de estas variables meteorológicas, se esperaría que las concentraciones de PM<sub>2,5</sub>, se mantengan en un rango de similar a menor a lo registrado en el mes de noviembre.

<sup>32</sup> Documento: Boletín climático nacional – noviembre 2024 SENAMHI. Obtenido de: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02215SENA-137.pdf>



---

**Para más información sobre el presente informe, contactar con:**

Ing. Elvis Anthony Medina Dionicio  
[eamedina@senamhi.gob.pe](mailto:eamedina@senamhi.gob.pe)  
**Subdirector de Evaluación del Ambiente Atmosférico**

**Elaboración**

Ing. Lourdes María Isabel Urteaga Tirado ([lurteaga@senamhi.gob.pe](mailto:lurteaga@senamhi.gob.pe))  
Ing. Dayana Lucero Acuña Valverde  
Ing. José Hitoshi Inoue Velarde  
Bach. Hanns Kevin Gómez Muñoz

**Apoyo**

Tec. Rosalinda Aguirre Almeyda

---

Para estar informado permanentemente sobre la **EVOLUCIÓN HORARIA DE LOS CONTAMINANTES PRIORITARIOS DEL AIRE** en Lima Metropolitana visita este enlace:  
<http://www.senamhi.gob.pe/?p=calidad-de-aire>

---

Encuentra los últimos **6 BOLETINES MENSUALES DE LA VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE** de Lima Metropolitana en el siguiente enlace:  
<http://www.senamhi.gob.pe/?p=boletines>

Suscríbete al **BOLETÍN MENSUAL DE LA VIGILANCIA DE LA CALIDAD DEL AIRE** de Lima Metropolitana en el siguiente enlace:  
<https://forms.gle/a4hpxqSc8KLj47sQ6>

---

**Próxima actualización:** 15 de enero del 2024

