

SIMAC

SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO AMBIENTAL DE CALDAS



BOLETÍN CALIDAD DEL AIRE MANIZALES AÑO 2024

*Angel David Gálvez Serna,
*Caren Xiomara Guzmán España,
*Carlos Mario González Duque,
**Mauricio Velasco García



Muestras de PM₁₀ (derecha) y PM_{2.5} (Izquierda)
Equipo Low-Vol Manual / Estación Gobernación
Centro / Manizales, Caldas

TABLA DE CONTENIDO

1. EL SISTEMA DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE (SVCA) DE MANIZALES... 2	2
2. ANÁLISIS METEOROLÓGICO	7
3. RESULTADOS DE MONITOREO PARA PM ₁₀ Y PM _{2.5}	13
3.1. Equipos manuales: Análisis de promedios diarios y mensuales	13
3.2. Equipos manuales: Comparación con la norma anual	18
3.3. Equipos automáticos: Análisis de promedios diarios y mensuales.....	19
3.4. Índice de calidad del aire (ICA) para PM ₁₀ y PM _{2.5} en el SVCA de Manizales	22
4. RESULTADOS DE MONITOREO PARA GASES.....	28
4.1. Monitoreo de monóxido de carbono (CO)	28
4.2. Monitoreo de dióxido de azufre (SO ₂)	30
4.3. Monitoreo de ozono troposférico (O ₃)	32
4.4. Índices de calidad del aire (ICA) para O ₃ , SO ₂ y CO en el SVCA de Manizales	36
5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS	37
5.1. Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz.....	37
6. REFERENCIAS	38

1. EL SISTEMA DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE (SVCA) DE MANIZALES

Para el 2019 la contaminación atmosférica se constituyó como tercer factor de riesgo para la salud humana, después de la hipertensión y fumar (Our World in data, 2021). Durante la última década, el crecimiento poblacional y las actividades industriales han incrementado considerablemente las emisiones de contaminantes y sus niveles en aire ambiente. Entre los contaminantes de interés en zonas urbanas se destacan el material particulado (PM, por sus siglas en inglés), el cual puede ser clasificado de acuerdo con el diámetro de las partículas. Las fracciones más comunes monitoreadas en sistemas de vigilancia actualmente son: partículas con diámetro menor o igual a 10 micrómetros (PM_{10}) y partículas con diámetro menor o igual a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$); conocidas también como fracción fina respirable. Además, contaminantes gaseosos como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2) y ozono troposférico (O_3) generan impactos negativos sobre el recurso aire en ecosistemas naturales y centros urbanos (OMS, 2018).

El seguimiento a los fenómenos de contaminación del aire en Manizales y la información entregada por el Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), es un sustento para tomar acciones que permitan mitigar la contaminación en zonas donde se superen las normas de calidad del aire. Además, es un insumo para establecer medidas de prevención donde la calidad del aire pueda generar posibles riesgos para la salud. Los datos obtenidos por el SVCA de Manizales alimentan las bases de datos del CDIAC (Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas) y el subsistema de Información sobre la Calidad del Aire (SISAIRE) del IDEAM. El CDIAC, por medio de la página web <http://cdiac.manizales.unal.edu.co/indicadores/public/searchAirMenu>, pone a disposición de la comunidad información meteorológica, de calidad del aire, sismos y aguas subterráneas de la ciudad de Manizales y el departamento de Caldas.

Para el 2024 en la ciudad de Manizales se contó con un SVCA conformado por nueve (9) equipos para el monitoreo de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$: Seis (6) equipos manuales de PM_{10} , un (1) equipo manual de $PM_{2.5}$ (el equipo está fuera de operación desde junio de 2024 por fallas técnicas) y dos (2) equipos automáticos (nefelómetros) que miden simultáneamente PM_{10} y $PM_{2.5}$. Además, el SVCA de Manizales cuenta con una (1) estación automática para el monitoreo de los gases ozono troposférico (O_3), dióxido de azufre (SO_2) y monóxido de carbono (CO).

El seguimiento de PM_{10} y $PM_{2.5}$ se realiza mediante técnicas de monitoreo activas. En el caso de los equipos manuales se obtienen registros promedio diario de la concentración en aire ambiente de dichos contaminantes (muestras de 24 horas cada tres días). Por otra parte, se cuenta con equipos automáticos para el seguimiento de PM_{10} y $PM_{2.5}$, así como los gases (O_3 , SO_2 y CO), monitoreo que permite la obtención de registros cincominutales, a partir de los cuales se obtienen valores promedio horario (media aritmética) y registros promedio octohorario (media móvil a partir de registros horarios). Todos los registros obtenidos de partículas y gases en aire ambiente son útiles, entre otros, para comparar los límites máximos permisibles definidos en la normativa colombiana: *Resolución 2254 de 2017* (MADS, 2017).

La Tabla 1 presenta las características principales de cada estación perteneciente al SVCA de Manizales y la Figura 1 muestra la ubicación espacial de las estaciones de monitoreo sobre el área urbana de la ciudad.

Tabla 1. Características de las estaciones de calidad del aire de Manizales

Estación (Abreviatura)	Características y fuentes de contaminantes*	Equipos	Propietario	Año de inicio operación óptima	Estado actual y operación durante 2024	Latitud / Longitud	Altitud msnm
Gobernación (Gob)	CU, SC – MTV, MAI	PM ₁₀ – Manual ^a	Corpocaldas	2009	Operación detenida en toda la estación, a partir del 22 de noviembre de 2024, por motivos de impermeabilización del suelo. Para el caso de PM _{2.5} – Manual se presentaron fallas adicionales durante el año	N 5° 4' 6.53" W 75° 31' 1.54"	2155
		PM _{2.5} - Manual ^a	Corpocaldas	2009			
		SO ₂ - Automático	UN	2019			
		O ₃ - Automático	UN	2018			
		CO - Automático	Corpocaldas	2018			
		PM ₁₀ y PM _{2.5} - Automático ^b	Corpocaldas	2019			
Palogrande (Pal)	ZC, SE – MTV, SAI	PM ₁₀ - Manual ^c	UN	2009	Operación óptima.	N 5° 3' 22.4" W 75° 29' 31.3"	2154
Nubia (Nub)	ZSE, SE – BTV, SAI	PM ₁₀ - Manual ^c	UN	2017	Operación óptima.	N 5° 1' 47.0" W 75° 28' 18"	2091
Liceo (Lic)	CU, SC – ATV, SAI	PM ₁₀ - Manual ^c	Corpocaldas	2010	Operación detenida en toda la estación, a partir del 23 de diciembre de 2024, por motivos de arreglo del suelo.	N 5° 4' 5.01" W 75° 30' 37.58"	2156
		PM ₁₀ y PM _{2.5} - Automático ^b	Corpocaldas	2019			
Milán (Mil)	ZC, ZI, SR – MTV, AZI	PM ₁₀ - Manual ^c	Corpocaldas	2012	Operación óptima.	N 5° 2' 48.5" W 75° 28' 48.68"	2188
Católica (UCM)	SC, SR, SE – ATV, SAI	PM ₁₀ - Manual ^c	Corpocaldas - UCM	2021	Operación óptima.	N 5° 3'34.13" W 75°29'13.63"	2091

a - Equipo de bajo volumen (Low-Vol)

b - Equipo automático – nefelómetro (Técnica fotométrica)

c - Equipo de alto volumen (Hi-Vol).

*Características:

SR: Sector residencial

SC: Sector comercial

SE: Sector educativo

ZSE: Zona sureste

CU: Centro urbano

ZC: Zona central

ZI: Zona industrial

*Fuentes de contaminación:

ATV: Alto tráfico vehicular

MTV: Moderado tráfico vehicular

BTV: Bajo tráfico vehicular

MAI: Moderada actividad industrial

AZI: Adyacente a zona industrial

SAI: Sin actividad industrial.

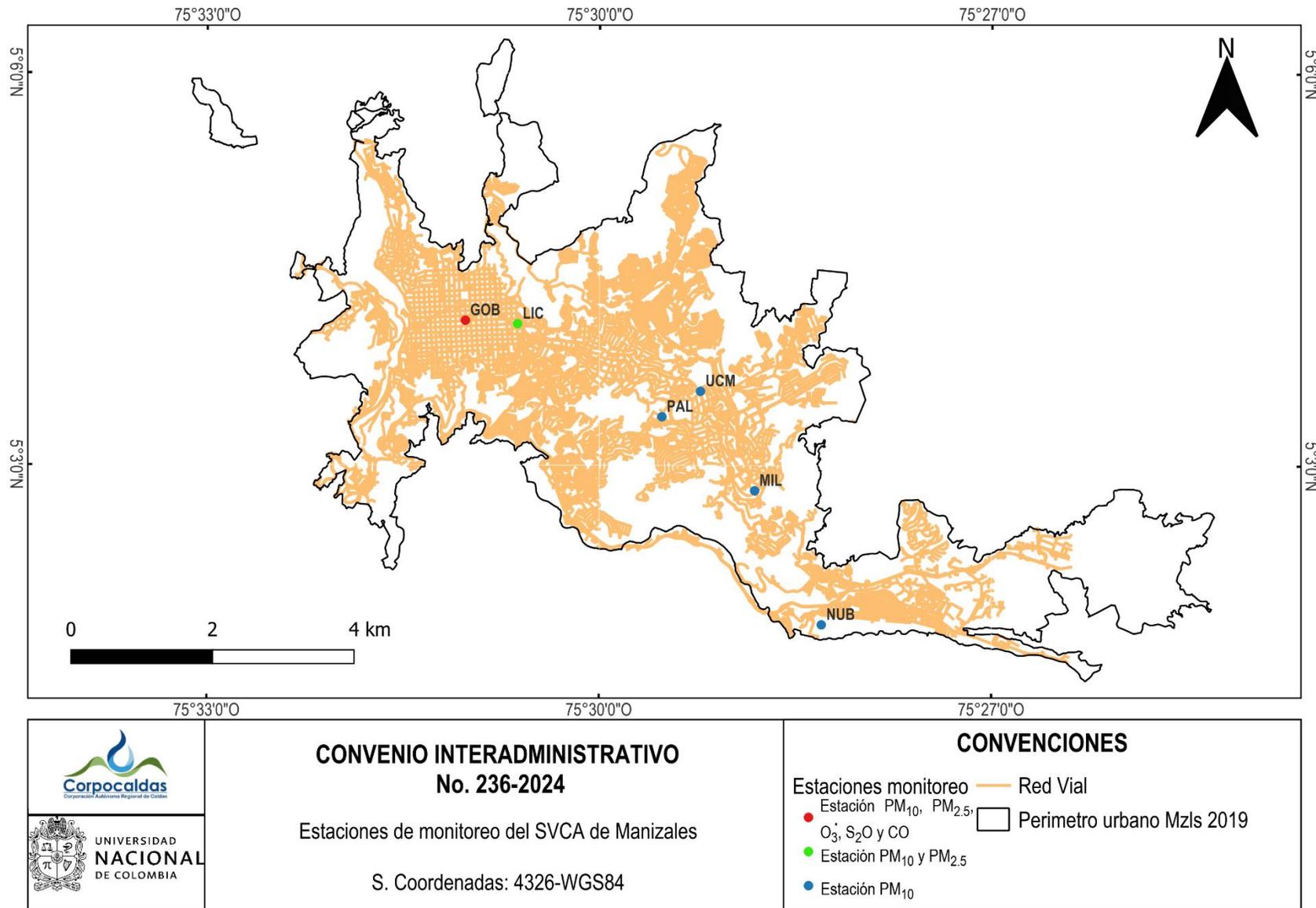


Figura 1. Mapa con ubicación de las estaciones de calidad del aire pertenecientes al SVCA de Manizales

Actualmente el SVCA de Manizales es operado por el Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental (GTAIHA) de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, en convenio con la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS). No obstante, cabe destacar que en mayo de 2024 se presentó la finalización del convenio 176 de 2020 que contaba con una duración de 3 años de ejecución. A partir de junio de 2024 el seguimiento del SVCA estuvo a cargo de los funcionarios de Corpocaldas quienes realizaron la operación del sistema, sin embargo, debido a que el personal de recurso aire es reducido y son múltiples las actividades que se deben atender en la entidad, se tuvo la pérdida de algunas muestras en algunas de las estaciones de la red.

Adicionalmente, es importante resaltar las condiciones de operación de las estaciones Gobernación y Liceo, que tuvieron que ser detenidas en noviembre de 2024 por arreglos locativos en cada una de las estaciones, situación ajena a los protocolos de operación del sistema. Las siguientes imágenes muestran el registro fotográfico de las adecuaciones realizadas a finales de 2024 en Liceo y Gobernación.

Registro fotográfico 1. Adecuaciones en la estación Gobernación. Noviembre 2024



(A) Durante el arreglo la operación fue detenida el 22 de noviembre de 2024



(B) Posterior al arreglo no se puede continuar operación hasta gestionar adecuadamente las nuevas adecuaciones.



Registro fotográfico 2. Adecuaciones de la estación Liceo. Diciembre 2024

2. ANÁLISIS METEOROLÓGICO

Las condiciones climáticas juegan un papel importante en el transporte, acumulación y transformación de contaminantes en el aire. Algunos ejemplos de variables meteorológicas como los vientos y la radiación solar afectan los niveles y el destino de contaminantes atmosféricos primarios y secundarios. El ozono troposférico (O_3) es un claro caso de un contaminante que depende de las reacciones en presencia de radiación solar para formarse en el aire, a partir de contaminantes primarios (COV y NO_x) emitidos directamente por fuentes antropogénicas y naturales. De otra parte, la humedad relativa, propicia un incremento en la humedad de las partículas, por lo tanto, el aumento de su peso, lo cual influye en la velocidad de caída de las partículas suspendidas y en la disminución de fenómenos de resuspensión (Loosmore y Cederwall, 2004).

Otro ejemplo se da en variables como la precipitación, la cual propicia fenómenos de lavado atmosférico, arrastrando hacia el suelo el material particulado del aire, en un fenómeno que se conoce como *scavenging* (Akyüz y Cabuk, 2009). Finalmente, la influencia de los vientos en la dispersión de contaminantes (a escala local, regional y sinóptica), que influye en la concentración de contaminantes de forma inversa, puesto que a mayor velocidad del viento la dispersión de los contaminantes en dirección horizontal será mayor y su concentración en la atmósfera en cercanías de la fuente disminuirá. A partir de las consideraciones descritas, se destaca la importancia de estudiar la calidad del aire teniendo en cuenta el comportamiento meteorológico.

La Tabla 2 presenta los consolidados mensuales de las variables meteorológicas en las estaciones próximas a las estaciones de calidad del aire durante el 2024. Las estaciones meteorológicas corresponden a Gobernación, Liceo, Posgrados, Milán Planta Niza, La Nubia y Hospital de Caldas. Esta última incluida por su influencia regional o mesoescala, lo cual permite comprender los fenómenos meteorológicos en toda el área urbana de la ciudad. Con la información obtenida en estas estaciones, se estiman las concentraciones a condiciones estándar ($25^{\circ}C$ y 1 atm) obtenidas por los equipos del SVCA de Manizales.

De manera alternativa la Figura 2 y la Figura 3 presentan el comportamiento promedio mensual de algunas variables meteorológicas de las estaciones mencionadas. Durante el 2024, se observa que el comportamiento de las variables a lo largo de la ciudad es estable. Se evidencia el patrón bimodal de lluvias característico en la ciudad, donde abril – junio y octubre – noviembre se caracterizan por ser temporadas de altas precipitaciones, mientras que diciembre y julio marcan el comienzo de la temporada de bajas precipitaciones, no obstante, es importante resaltar la ocurrencia del fenómeno del niño en el país. Para el 2024 se registraron temperaturas máximas diarias que superaron los $30^{\circ}C$ durante los meses más secos y se presentaron periodos más largos entre las lluvias, notándose este efecto mayoritariamente en diciembre, un mes que históricamente suele ser más lluvioso. La estación Liceo registró la mayor precipitación mensual con un acumulado de 301 mm en noviembre, mientras que La Nubia registró el menor registro mensual con 12 mm en diciembre. Para la radiación solar se identifica un comportamiento inverso a la precipitación con promedios mensuales por encima de $213 W/m^2$ en toda la ciudad, y máximos mensuales de hasta $392 W/m^2$ como en Gobernación durante enero.

Para el caso de la temperatura ambiente, se observa un comportamiento homogéneo en la ciudad obteniéndose registros entre 16.2 en Liceo durante noviembre y $21.7^{\circ}C$ en Milán Planta Niza durante

agosto; además, se observa el aumento de las temperaturas promedio en la ciudad ocasionado por el fenómeno del niño. Por su parte la humedad relativa se relacionó de forma directa con las precipitaciones y de manera inversa con la temperatura y radiación solar, obteniéndose la mayor humedad relativa promedio mensual durante marzo con un valor de 91.3 % en La Nubia y mínimos mensuales de 64% en Liceo.

Se destaca además que la ciudad cuenta con patrones de viento estables, identificados por el fenómeno orográfico de valle-montaña y montaña-valle, con velocidades del viento bajas que limitan la dispersión horizontal de los contaminantes. La Figura 4 presenta las rosas de viento promedio observadas a lo largo de la ciudad para el período de análisis.

Tabla 2. Estadísticos promedio mensuales para las variables meteorológicas de estaciones próximas a las estaciones de calidad del aire durante 2024

Mes	Temperatura del Aire [°C]	Velocidad de Viento [m/s]	Dirección Viento [°]	Presión Atmosférica [mm Hg]	Humedad Relativa [%]	Precipitación Acumulada [mm]	Radiación Solar [W/m ²]
Gobernación							
Enero	19.2	1.17	254.7	586.9	75.3	49.8	392.4
Febrero	18.9	0.99	263.8	587.1	79.0	101.2	353.5
Marzo	19.6	1.30	265.1	587.1	79.2	54.4	343.1
Abril	18.4	1.14	267.6	587.0	84.5	107.8	287.7
Mayo	18.5	1.11	280.9	574.6	86.4	127.4	266.0
Junio	17.9	1.08	272.2	574.9	86.1	114.4	259.9
Julio	19.0	1.21	279.8	574.7	79.2	49.0	316.3
Agosto	18.9	1.16	277.2	574.9	77.7	43.4	343.3
Septiembre	19.4	1.27	283.8	574.2	75.4	28.4	322.1
Octubre	18.2	1.06	268.5	574.6	82.5	132.4	307.8
Noviembre	16.8	1.0	261.7	574.4	86.6	147.2	240.4
Diciembre	17.9	1.2	271.5	574.1	84.9	56.4	267.3
Liceo							
Enero	19.9	0.81	244.7	588.5	58.5	---*	353.8
Febrero	19.0	0.66	270.5	589.1	66.7	56.8	307.9
Marzo	18.9	0.56	271.6	589.0	69.9	114.2	262.9
Abril	17.9	0.44	256.3	589.5	74.6	244.8	236.7
Mayo	17.8	0.41	265.3	589.5	79.4	221.4	209.9
Junio	17.3	0.36	255.6	590.2	78.8	185.0	217.9
Julio	18.2	0.52	293.3	589.7	68.7	94.4	266.1
Agosto	17.9	0.56	276.9	590.2	67.9	84.0	288.9
Septiembre	18.5	0.70	321.6	589.0	64.2	65.2	273.9
Octubre	17.5	0.55	228.6	589.8	73.1	171.6	257.9
Noviembre	16.2	0.46	225.8	590.1	77.4	301	203.5
Diciembre	17.7	0.44	287.9	588.6	71.9	42.8	244.9
Espacio en blanco							
Posgrados							
Enero	18.8	0.01	337.6	593.3	78.1	14.6	383.3

Mes	Temperatura del Aire [°C]	Velocidad de Viento [m/s]	Dirección Viento [°]	Presión Atmosférica [mm Hg]	Humedad Relativa [%]	Precipitación Acumulada [mm]	Radiación Solar [W/m ²]
Febrero	18.8	0.01	340.6	593.5	80.9	43.4	326.6
Marzo	18.7	0.01	346.2	593.5	83.3	111.0	285.7
Abril	17.8	0.02	338.5	594.0	86.9	228.6	266.7
Mayo	17.8	0.09	331.0	594.1	89.5	181.4	230.8
Junio	17.3	0.12	322.4	594.8	89.3	145.2	237.9
Julio	18.0	0.12	331.4	594.1	83.3	87.8	280.0
Agosto	17.8	0.03	336.3	594.6	82.2	82.8	300.9
Septiembre	18.3	0.04	1.3	593.4	79.9	56.6	306.8
Octubre	17.3	0.10	24.0	594.2	86.1	140.8	283.7
Noviembre	16.2	0.03	344.9	594.5	89.3	213.8	235.4
Diciembre	17.6	0.02	304.5	593.1	85.2	31.4	305.1
Milán planta Niza							
Enero	20.5	---	---	582.7	75.0	25.0	375.3
Febrero	20.1	0.05	324.3	583.1	73.8	64.0	305.6
Marzo	20.1	0.28	14.2	583.0	74.5	91.0	265.9
Abril	18.8	0.32	40.8	583.7	75.6	216.4	252.2
Mayo	18.8	0.29	43.3	583.9	70.1	199.6	212.7
Junio	18.3	0.28	41.1	584.6	68.1	137.2	227.3
Julio	19.6	0.41	42.2	583.4	73.8	105.4	235.0
Agosto	21.7	0.57	292.2	583.1	70.9	37.2	255.8
Septiembre	22.5	0.59	304.5	581.8	72.2	13.0	276.4
Octubre	21.0	0.55	306.6	582.9	72.8	91.4	263.7
Noviembre	17.2	0.31	48.7	584.4	69.3	293.4	228.2
Diciembre	19.0	0.38	35.24	582.7	73.7	24.0	297.7
La Nubia							
Enero	19.3	1.37	135.2	595.7	80.8	28.4	---
Febrero	19.4	1.07	176.7	595.7	83.0	60.6	---
Marzo	19.4	1.02	195.0	595.6	84.8	53.2	---
Abril	18.5	0.79	180.1	596.1	88.6	142.6	---
Mayo	18.6	0.67	184.2	596.2	90.9	180.8	---
Junio	18.1	0.64	241.9	596.8	90.6	82.4	---
Julio	18.7	0.88	158.1	596.3	85.5	71.6	---
Agosto	18.3	0.90	166.6	596.8	85.2	77.2	---
Septiembre	---	---	---	---	---	---	---
Octubre	20.2	0.70	265.1	594.8	88.6	4.6	---
Noviembre	18.5	0.7	203.8	595.8	91.3	210.2	---
Diciembre	19.8	1.0	197.9	594.4	86.7	12.2	---
Espacio en blanco							
Hospital de Caldas							
Enero	19.3	1.31	190.4	594.5	79.3	23.4	361.8

Mes	Temperatura del Aire [°C]	Velocidad de Viento [m/s]	Dirección Viento [°]	Presión Atmosférica [mm Hg]	Humedad Relativa [%]	Precipitación Acumulada [mm]	Radiación Solar [W/m ²]
Febrero	19.1	1.16	208.8	594.6	82.1	53.0	308.1
Marzo	19.0	1.16	215.9	594.6	84.4	108.8	267.2
Abril	18.1	1.02	161.4	595.2	87.8	247.4	240.2
Mayo	18.1	0.88	174.9	595.2	90.4	177.4	220.6
Junio	17.4	0.84	182.9	596.0	90.3	159.4	230.3
Julio	20.1	1.10	166.9	594.3	84.3	87.0	276.7
Agosto	20.7	1.12	175.5	594.3	83.1	74.8	301.4
Septiembre	21.3	1.21	167.8	592.9	80.8	60.2	294.7
Octubre	20.3	1.2	137.3	593.9	86.5	159.2	276.0
Noviembre	19.1	0.9	181.9	594.3	90.1	242.0	233.2
Diciembre	20.5	1.1	212.3	592.7	86.5	30.4	302.7

* ---: Indica ausencia de datos, para algunos casos se cuenta con un número bajo de datos para estimación de promedios adecuadamente o la estación presentó fallas técnicas para la recolección de datos.

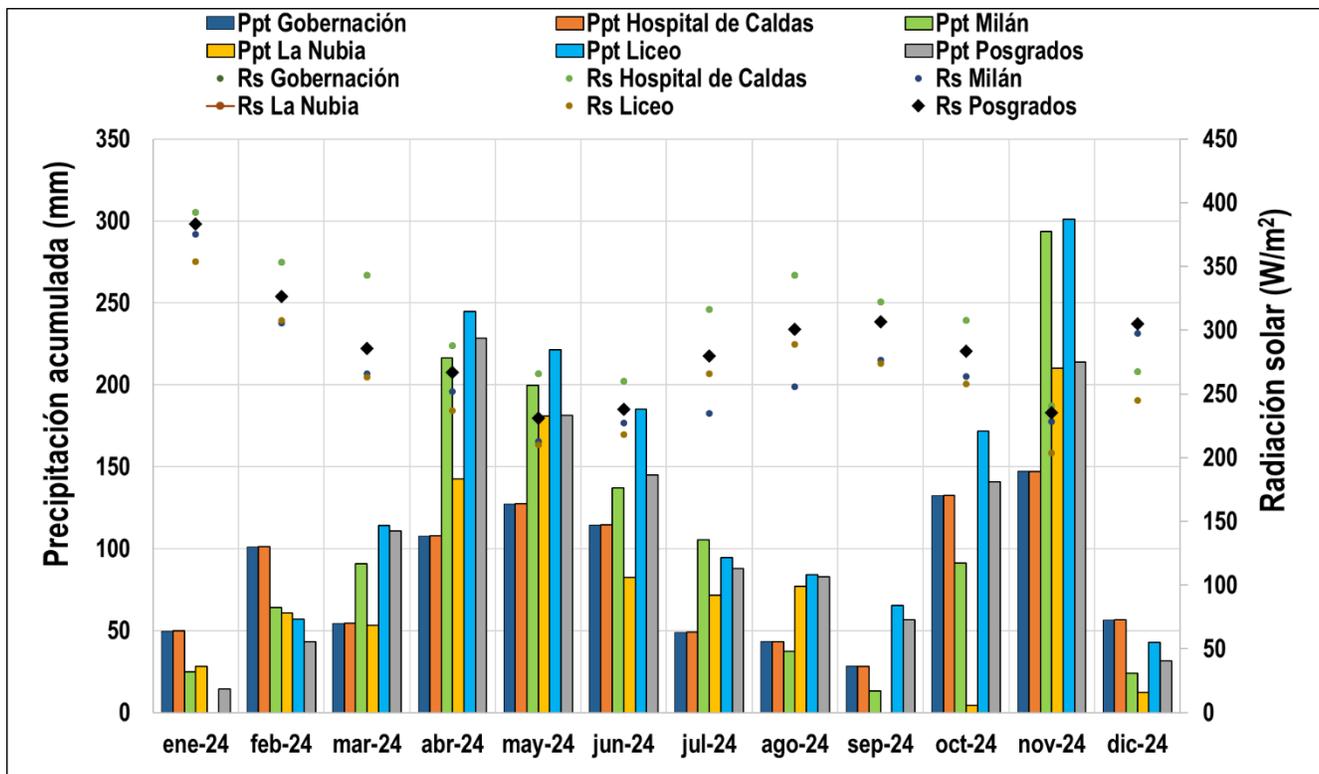


Figura 2. Precipitación mensual acumulada (Ppt) y promedio mensual de radiación solar (Rs) durante 2024

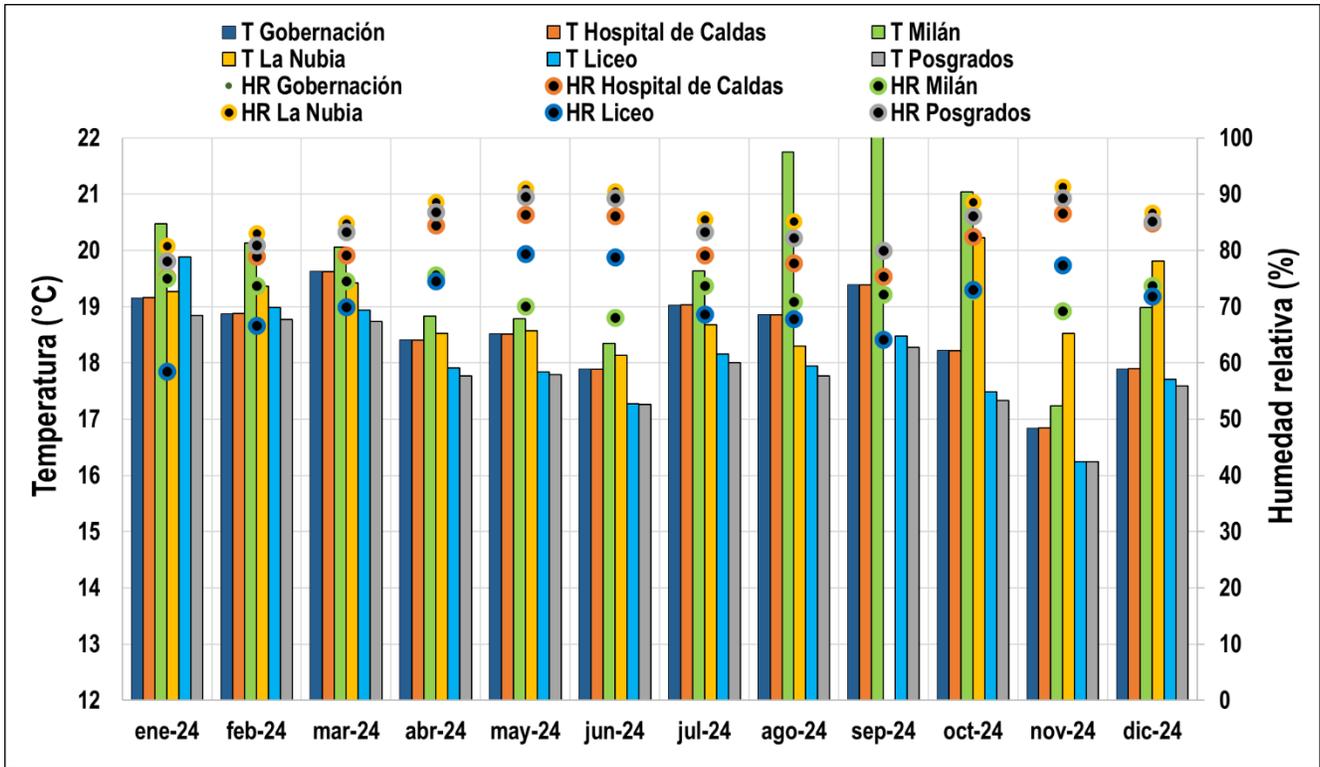


Figura 3. Promedios mensuales de temperatura del aire (T) y humedad relativa (HR) durante 2024

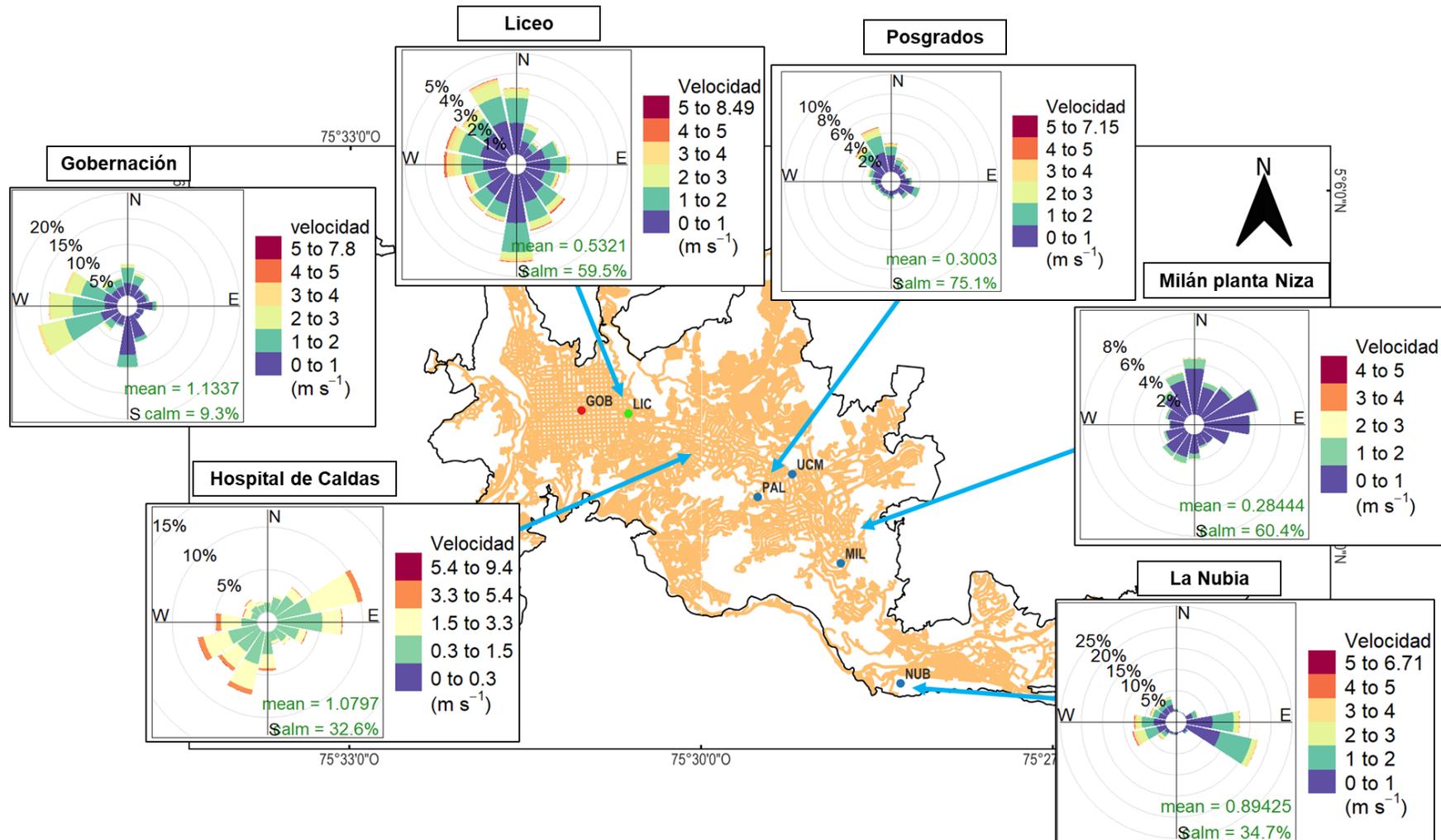


Figura 4. Rosas de viento en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante 2024

3. RESULTADOS DE MONITOREO PARA PM₁₀ y PM_{2.5}

3.1. Equipos manuales: Análisis de promedios diarios y mensuales

La Tabla 3 presenta los estadísticos descriptivos mensuales para las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales obtenidos durante 2024. Se presenta el promedio aritmético con su respectiva incertidumbre asociada, mediana, desviación estándar, concentración mínima, concentración máxima, el percentil 95, el número de datos obtenidos mensualmente y su porcentaje de datos válidos. Los cálculos y gráficos fueron realizados con el software R y su librería de análisis para datos de calidad del aire “Openair” (Carslaw y Ropkins, 2015).

Los resultados indican que, para el 2024, las estaciones de Milán y Liceo registraron las concentraciones promedio anuales más altas de PM₁₀ con valores de $33 \pm 7.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $29 \pm 1.99 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente; seguidos por, Gobernación con $21 \pm 1.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Palogrande con $21 \pm 3.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Nubia con $21 \pm 3.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por último, Católica con $20 \pm 2.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se destaca que este patrón en los niveles de concentración se ha mantenido relativamente constante de acuerdo con los registros del SVCA en los años 2018 al 2023, registrando los valores más altos de PM₁₀ en Milán y Liceo con promedios mensuales por encima de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Cabe resaltar que en las estaciones Liceo y Católica el 75% y 83% respectivamente de los meses monitoreados cumplieron con el porcentaje de datos válidos establecido en 75%, según el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica (MAVDT, 2010). En las demás estaciones se cumplió con este criterio en menos del 67% de los meses monitoreados, ocasionado por la interrupción en la operación de SVCA teniendo en cuenta las consideraciones expuestas previamente.

Se identificó que Milán presentó los mayores niveles de concentración de PM₁₀ con el mayor promedio aritmético mensual reportado en septiembre con $41 \pm 7.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), y un máximo diario de $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el martes 9 de abril. Se recalca además que esta estación es categorizada en el tipo de estación “Industrial” y con influencia de tráfico vehicular pesado. De otra parte, la estación Católica presentó los menores niveles de concentración con un promedio mensual mínimo en noviembre con un valor de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 2.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), valores que se pueden relacionar con fenómenos meteorológicos como la precipitación en la ciudad y los patrones de viento que se perciben en esta zona de la ciudad, influenciados por vientos provenientes de la cuenca de Río Blanco.

En lo referente al monitoreo de PM_{2.5} manual en la estación Gobernación, solo se monitorearon los meses de febrero a mayo debido a que el equipo presentó fallas de operación imposibilitando obtener información de este contaminante durante los meses posteriores. Además, solo durante los meses de marzo y abril se logró obtener más del 75% de muestras, registrando valores promedio de $18 \pm 2.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y $17 \pm 2.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) respectivamente.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de las concentraciones promedio mensuales de PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales (µg/m³) durante el 2024

Estadístico*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar)													
Promedio	16	15	22	25	25	22	18	22	31	---	---	---	21
Mediana	17	14	23	26	26	20	18	22	32	---	---	---	22
Incertidumbre**	1.42	1.80	1.20	1.77	1.73***	1.73***	1.73***	1.73***	1.73***	---	---	---	1.65
Desviación Estándar	5	4	5	7	5	8	8	3	4	---	---	---	7
Mínimo	9	9	10	13	18	12	5	19	26	---	---	---	5
Máximo	23	24	28	34	34	34	26	26	35	---	---	---	35
Percentil 95%	23	22	28	34	32	32	26	26	35	---	---	---	34
N° Datos - %DV****	11 - 100	90 - 100	11 - 100	10 - 100	8 - 80	11 - 100	6 - 60	5 - 50	4 - 40	---	---	---	75 - 60
Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar)													
Promedio	33	24	29	34	28	25	26	32	29	29	29	24	29
Mediana	35	24	29	35	30	27	26	33	30	30	28	23	29
Incertidumbre	1.99	1.99	2.00	1.99	1.99***	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99	1.99***	1.99	1.99
Desviación Estándar	8	5	7	9	8	7	5	6	6	6	7	11	8
Mínimo	21	16	18	14	18	15	17	22	20	18	19	9	9
Máximo	46	30	38	45	39	34	33	39	36	38	42	44	46
Percentil 95%	43	30	37	45	38	33	32	38	35	37	40	39	40
N° Datos - %DV	11 - 100	8 - 89	8 - 80	10 - 100	9 - 90	8 - 80	8 - 80	6 - 60	7 - 70	8 - 80	8 - 80	7 - 70	98 - 79
Palogrande PM₁₀ (µg/m³ estándar)													
Promedio	29	21	25	25	14	---	23	20	24	20	16	15	21
Mediana	25	23	25	24	14	---	23	22	24	22	14	16	21
Incertidumbre	3.02	3.02	3.02	3.02***	3.02***	---	3.02***	3.02	3.02***	3.02	3.02***	3.02	3.02
Desviación Estándar	21	5	5	6	1	---	2	5	5	4	3	3	10
Mínimo	11	12	16	17	13	---	21	13	18	14	12	10	10
Máximo	88	26	34	37	15	---	25	23	30	24	20	18	88
Percentil 95%	62	26	33	34	15	---	25	23	30	24	20	18	31
N° Datos - %DV	11 - 100	9 - 100	10 - 10	8 - 80	3 - 30	---	3 - 30	4 - 40	7 - 70	8 - 80	9 - 90	10 - 100	82 - 66
Milán PM₁₀ (µg/m³ estándar)													
Promedio	37	29	35	37	31	28	32	32	41	38	27	27	33
Mediana	43	30	36	36	33	27	33	35	40	39	26	28	35
Incertidumbre	7.48	7.48	7.48	7.48***	7.48***	7.48	7.48	7.48	7.48***	7.48	7.48***	7.48***	7.48
Desviación Estándar	11	10	3	9	5	7	8	7	5	2	7	7	8
Mínimo	21	16	29	23	26	17	15	17	35	35	16	18	15
Máximo	49	41	37	52	37	37	42	37	48	41	36	36	52
Percentil 95%	48	40	37	48	36	36	41	37	47	41	35	35	46
N° Datos - %DV	9 - 90	7 - 78	5 - 50	7 - 70	7 - 70	8 - 80	8 - 80	6 - 60	6 - 60	6 - 60	7 - 70	6 - 60	82 - 66
Espacio en blanco													

Estadístico*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Nubia PM₁₀ (µg/m³ estándar)													
Promedio	28	17	26	21	16	18	18	17	23	21	17	17	21
Mediana	29	16	25	22	17	18	18	18	24	22	17	17	20
Incertidumbre	3.68	3.68	3.68	3.68***	3.68***	3.68***	3.68***	3.68***	3.68***	3.68***	3.68***	3.68***	3.68
Desviación Estándar	6	5	6	8	5	5	3	2	3	3	2	2	6
Mínimo	19	10	18	9	7	11	13	14	19	14	14	15	7
Máximo	39	26	37	32	24	27	22	19	27	23	19	20	39
Percentil 95%	37	24	35	31	23	25	22	19	27	23	19	20	32
N° Datos - %DV	10 - 100	9 - 100	10 - 100	10 - 100	8 - 80	8 - 80	7 - 70	6 - 60	7 - 70	8 - 80	6 - 60	5 - 50	94 - 76
Católica PM₁₀ (µg/m³ estándar)													
Promedio	22	18	27	24	18	18	19	19	22	22	15	18	20
Mediana	21	18	28	23	17	17	18	20	24	23	15	19	19
Incertidumbre	2.01	2.01	2.01	2.01***	2.01***	2.01	2.01	2.01	2.01***	2.01	2.01***	2.01	2.01
Desviación Estándar	7	3	6	7	5	5	7	5	5	8	3	3	6
Mínimo	9	11	18	11	13	12	12	12	13	12	12	14	9
Máximo	30	22	36	36	30	28	35	27	28	36	20	23	36
Percentil 95%	30	22	36	34	27	26	29	25	28	32	19	22	32
N° Datos - %DV	11 - 100	9 - 100	10 - 100	9 - 90	9 - 90	8 - 80	8 - 80	6 - 60	7 - 70	8 - 80	9 - 90	9 - 90	103 - 83
Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar)													
Promedio	---	11	18	17	18	12	---	---	---	---	---	---	17
Mediana	---	11	19	16	19	12	---	---	---	---	---	---	18
Incertidumbre	---	2.77***	2.77***	2.77	2.77***	2.77***	---	---	---	---	---	---	2.77
Desviación Estándar	---	3	4	6	3	3	---	---	---	---	---	---	5
Mínimo	---	9	11	9	13	12	---	---	---	---	---	---	9
Máximo	---	13	24	26	21	12	---	---	---	---	---	---	26
Percentil 95%	---	13	23	26	21	12	---	---	---	---	---	---	25
N° Datos - %DV	---	2 - 22	11 - 100	10 - 100	6 - 60	1 - 10	---	---	---	---	---	---	30 - 24

* Estadísticos calculados a partir de los registros de concentración promedio diarios.

** Fuentes de incertidumbre: Procedimientos de determinación del peso del filtro y medición del flujo de la bomba. Se incluyen además incertidumbres asociadas a la determinación de temperatura ambiente y presión atmosférica, variables necesarias para estimar el flujo volumétrico durante el día de monitoreo y para reportar las concentraciones de contaminantes a condiciones estándar.

*** La estimación de la incertidumbre se realizó sin incluir la incertidumbre asociada a las desviaciones del flujo de la bomba.

**** %DV = Porcentaje de datos válidos.

***** ---: Indica ausencia de datos. Para el caso del equipo de PM_{2.5} – Manual, se presentan fallas que impiden la verificación metrológica adecuada

Adicionalmente, se presentan las figuras de evolución temporal de concentraciones diarias obtenidas para PM₁₀ (Figura 5) y PM_{2.5} (Figura 6). Se destaca que en ninguna de las estaciones de monitoreo se superó el límite máximo diario para material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) establecido en la Resolución 2254 de 2017 de 75 µg/m³ para PM₁₀ y 37 µg/m³ para PM_{2.5} (MADS, 2017).

Por último, la Figura 7 presenta la variación promedio de concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Manuales por días de la semana en las estaciones de la ciudad. Se puede observar que, en general, las mayores disminuciones en las concentraciones se obtienen los días domingo, principalmente en estaciones con influencia de tráfico vehicular en cercanías de las zonas de monitoreo. Este fenómeno fue más evidente en las estaciones Gobernación, Liceo y Milán. En el caso de las estaciones Palogrande, Católica y Nubia ubicadas en campus universitarios, se observan mayores niveles de concentración los miércoles y viernes.

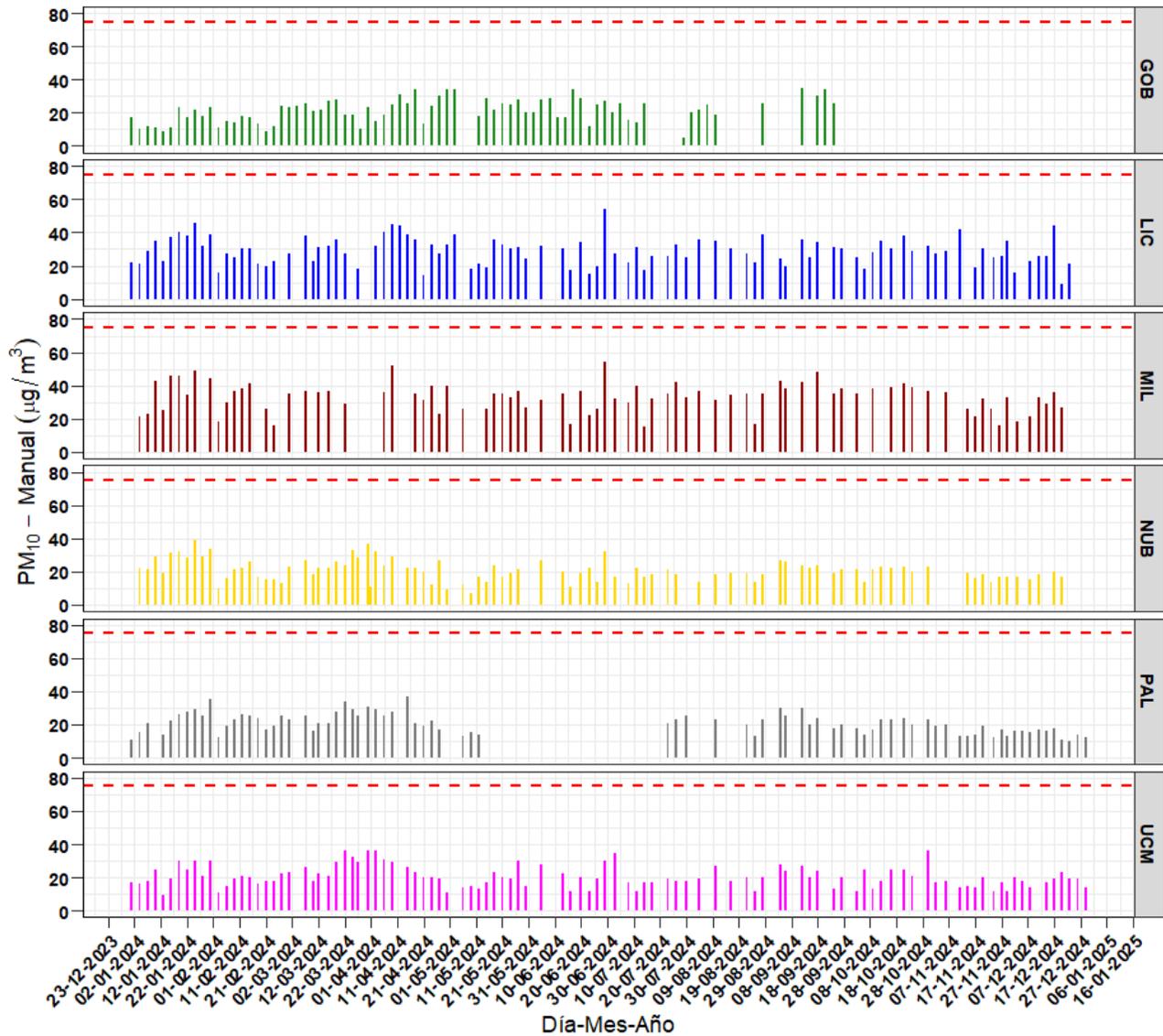


Figura 5. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM_{10} – Manuales durante 2024

La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM_{10} establecido en la Resolución 2254 de 2017: $75 \mu g/m^3$

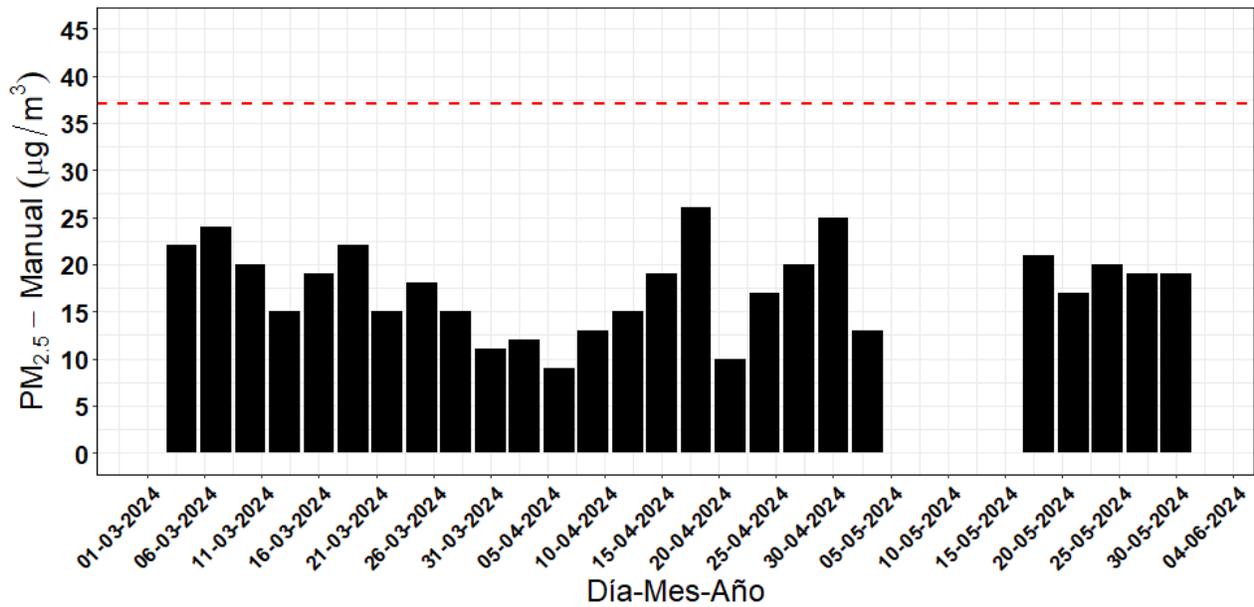


Figura 6. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM_{2.5} – Manual durante 2024

La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM_{2.5} establecido en la Resolución 2254 de 2017: 37 µg/m³

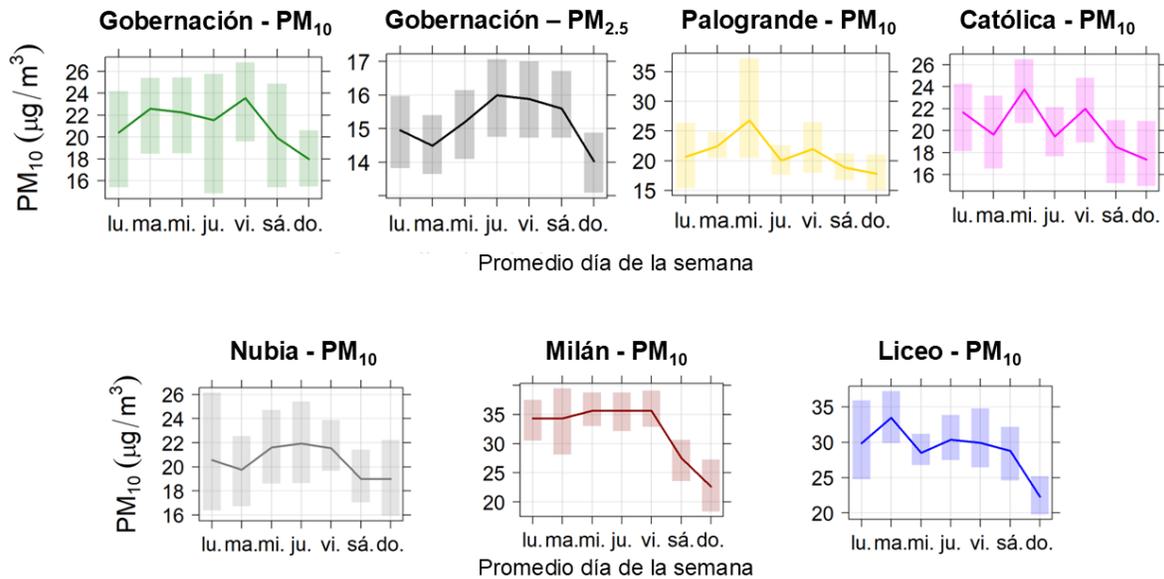


Figura 7. Variación promedio de concentraciones por días de la semana para PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales durante 2024

La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%

3.2. Equipos manuales: Comparación con la norma anual

En la Figura 8 se presenta la comparación del promedio aritmético obtenido para las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ con el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 para PM_{10} ($50 \mu g/m^3$) y $PM_{2.5}$ ($25 \mu g/m^3$). Se destaca que ninguna de las estaciones superó la normativa anual colombiana. Es importante resaltar que los promedios obtenidos en Manizales para PM_{10} y $PM_{2.5}$ en todas las estaciones, estuvieron por encima de las recomendaciones recientes en términos de promedio anual propuestas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de $15 \mu g/m^3$ para PM_{10} y $5 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$ (OMS, 2022).

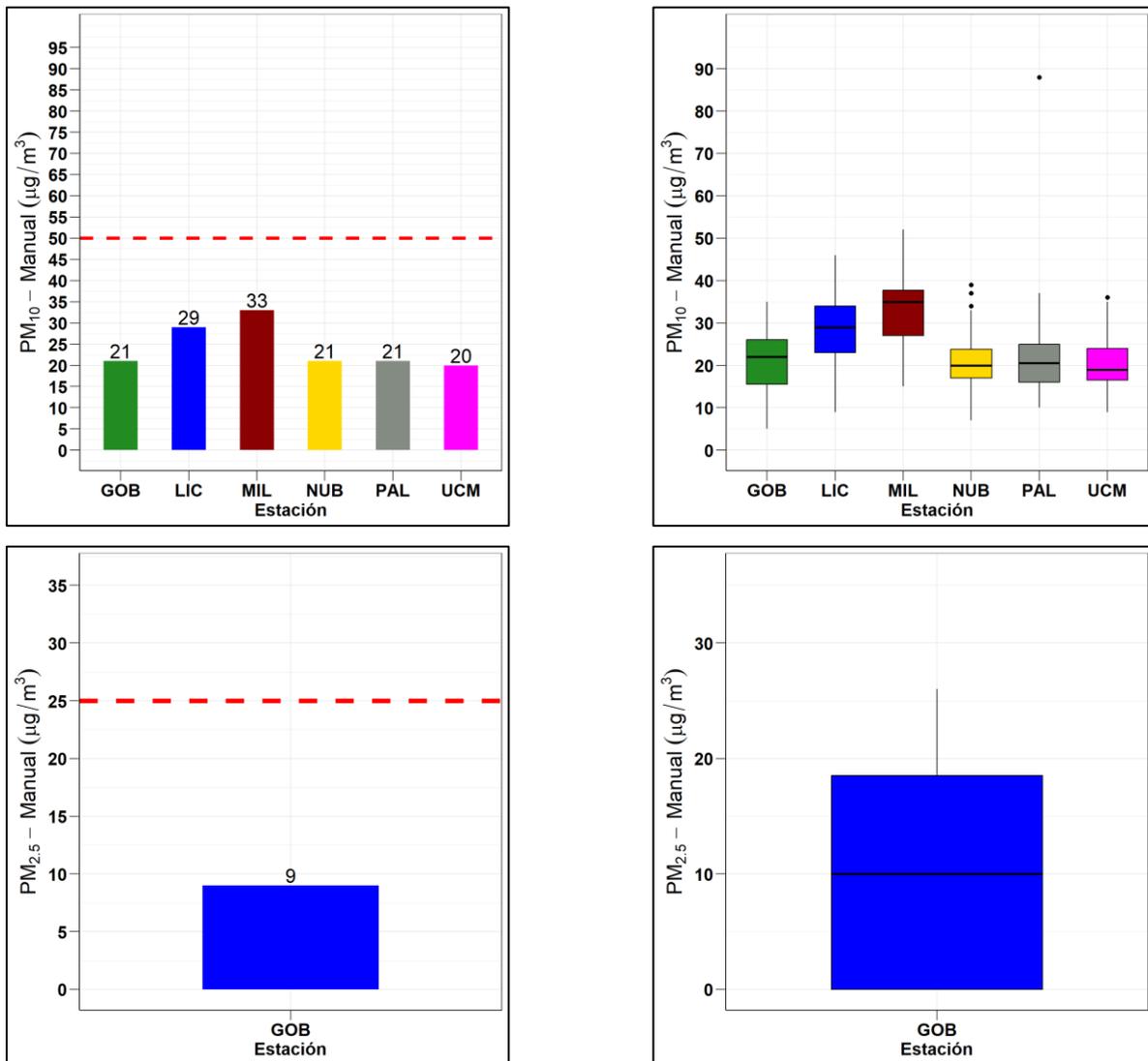


Figura 8. Concentración promedio (izquierda) y diagrama de cajas (derecha) de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Manuales durante 2024

La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 del MADS: $50 \mu g/m^3$ (PM_{10}) y $25 \mu g/m^3$ ($PM_{2.5}$)

3.3. Equipos automáticos: Análisis de promedios diarios y mensuales

La Tabla 4 presenta los estadísticos descriptivos de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos en las estaciones Gobernación y Liceo durante 2024. Se observó que las concentraciones promedio (medianas¹) de Gobernación para PM₁₀ y PM_{2.5} se encontraron alrededor de los 17.7 µg/m³ (desv. std = 8.6 µg/m³) y 12.4 µg/m³ (desv. std = 4.3 µg/m³) respectivamente. De otra parte, las concentraciones promedio medianas de Liceo para PM₁₀ y PM_{2.5} se encontraron alrededor de los 23.1 µg/m³ (desv. std = 7.5 µg/m³) y 14.3 µg/m³ (desv. std = 4.2 µg/m³) respectivamente. Se destaca que, pese al sesgo estadístico de los datos, los promedios son cercanos a la mediana, indicando la variabilidad proporcional de las concentraciones en ambos contaminantes y ambas estaciones.

Con respecto al comportamiento mensual, los máximos registros obtenidos en la estación Gobernación para PM₁₀ y PM_{2.5} fueron de 46.4 µg/m³ y 27.0 µg/m³ respectivamente, obtenidos en febrero y marzo. En el caso de Liceo para PM₁₀ y PM_{2.5} se obtuvieron máximos en el mes de mayo y enero con concentraciones de 48.7 µg/m³ y 28.6 µg/m³ respectivamente. Estos resultados se relacionan a las temporadas de bajas precipitaciones de Manizales.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio mensuales de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automático (µg/m³) durante el 2024

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar)													
Promedio	34.6	24.1	23.3	21.8	14.9	14.9	14.9	16.1	22.0	15.3	9.6	--**	20.1
Mediana	33.8	22.7	23.6	20.4	14.9	14.7	14.1	16.5	22.3	16.1	9.1	--	17.7
Desv. Est.	6.2	6.6	6.3	8.0	4.0	3.0	3.7	2.9	2.5	2.3	2.1	--	8.6
Min.	17.6	12.4	9.9	9.9	7.6	9.9	9.7	8.6	18.8	12.0	7.2	--	7.2
Max.	46.4	37.6	37.2	36.8	23.9	20.4	24.1	21.1	24.4	17.7	15.6	--	46.4
Percentil 95	37.2	28.0	25.6	27.7	16.9	17.1	16.8	17.9	23.8	16.8	10.2	--	36.2
N° Datos	31.0	29.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	22.0	--	327.0
Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar)													
Promedio	29.6	27.7	22.2	20.6	24.7	20.1	16.9	18.7	26.8	27.6	22.9	33.3	23.9
Mediana	29.4	27.8	21.4	19.4	24.0	18.0	16.4	19.1	27.9	27.6	22.8	31.5	23.1
Desv. Est.	5.2	6.7	7.0	8.8	7.3	4.7	3.3	3.2	3.5	4.4	4.6	7.4	7.5
Min.	15.8	14.0	8.2	7.6	14.2	13.5	12.2	10.8	21.8	20.5	14.0	20.3	7.6
Max.	40.6	42.2	38.3	42.4	48.7	30.5	25.8	24.4	29.6	35.8	33.2	51.2	51.2
Percentil 95	37.3	38.2	36.6	37.7	37.6	27.2	22.9	23.5	29.5	34.4	29.9	45.3	36.5
N° Datos	31.0	29.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	23.0	358.0
<i>Espacio en blanco</i>													

¹ Debido a que la serie de datos no posee una distribución normal, se deciden utilizar pruebas estadísticas no paramétricas que permitan evidenciar los cambios en las concentraciones, sin incluir el sesgo estadístico de los datos.

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar)													
Promedio	15.8	13.9	17.2	15.2	10.7	10.7	10.5	11.4	16.8	12.5	7.2		12.9
Mediana	15.8	13.1	17.3	15.0	10.3	10.8	10.1	11.7	16.6	12.8	6.6		12.4
Desv. Est.	3.2	4.0	4.4	5.0	2.7	2.0	2.1	2.0	1.6	1.6	1.6		4.3
Min.	9.3	7.3	7.2	7.5	5.4	7.4	6.7	6.1	15.2	10.4	5.6		5.4
Max.	24.2	22.9	27.0	23.3	16.4	14.1	15.6	15.0	18.8	14.4	11.6		27.0
Percentil 95	21.3	21.4	25.1	22.5	15.3	13.4	14.3	14.1	18.6	14.2	9.6		21.1
N° Datos	31.0	29.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	22.0		327.0
Liceo PM_{2.5} (µg/m³ estándar)													
Promedio	20.4	17.2	13.7	12.7	13.9	13.0	12.3	13.9	21.0	14.9	12.5	17.0	14.8
Mediana	19.7	16.0	13.9	12.4	14.3	12.3	12.5	14.1	21.5	15.0	11.9	17.0	14.3
Desv. Est.	3.6	5.1	3.9	4.1	3.3	2.8	2.2	2.6	2.3	2.4	3.1	2.4	4.2
Min.	11.4	8.8	4.9	5.5	9.4	8.9	8.9	7.3	17.9	10.1	6.6	12.1	4.9
Max.	28.6	28.3	22.6	19.9	21.4	18.4	18.0	19.1	23.3	19.6	19.2	21.3	28.6
Percentil 95	25.7	27.3	21.1	19.4	19.4	17.7	16.1	17.5	23.1	18.2	17.0	20.4	22.7
N° Datos	31.0	29.0	31.0	30.0	31.0	30.0	31.0	31.0	30.0	31.0	30.0	23.0	358.0

* A partir de datos promedio diarios del equipo

** -- Indica ausencia de datos

La Figura 9 presenta el comportamiento temporal de las concentraciones de los equipos PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos (promedio diario) durante 2024 en las estaciones Gobernación y Liceo. Se puede observar un comportamiento estable y correlacionado con las temporadas de bajas y altas precipitaciones de la ciudad. Además, se observa que el límite máximo permisible de la normativa colombiana para PM₁₀ y PM_{2.5}, no fue superado ningún día del año.

Adicionalmente, la Figura 10 presenta la evolución promedio horaria, por día de la semana y mensual de las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticas en las estaciones Gobernación y Liceo. Se evidencia como los máximos de concentración horaria se presentan en las horas de alto flujo vehicular de la ciudad (entre las 6 am a 8 am y las 6 pm a 8:00 pm aproximadamente). Lo anterior coincide con lo determinado en el último Plan de Movilidad de Manizales del año 2017 (Steer Davies Gleave, 2017); el cual indicó que en la ciudad se presentan tres horas pico de flujo vehicular, la hora pico de inicio de la mañana (entre las 6:30 am y 7:30 am); la hora pico del medio día (11:45 am a 12:45 pm y 01:30 pm a 02:30 pm) y una hora pico al final de la tarde (05:30 pm a 06:30 pm).

Los máximos de concentración horaria en ambas estaciones registraron valores superiores a los 25 µg/m³ para PM₁₀ y 15 µg/m³ para PM_{2.5}. Para el caso particular del medio día, no se observan estos picos de concentración debido a las dinámicas de las masas de aire en la ciudad, que, al calentarse por acción de la radiación solar, cuyo valor máximo supera los 950 W/m² entre las 11 am y 1 pm; ganan flotabilidad y ascienden en la atmósfera. Este comportamiento es favorecido por el aumento en la altura de la capa de mezcla, dando lugar a una mayor dispersión de los contaminantes emitidos (Cuesta y colaboradores, 2020).

En cuanto al perfil promedio para los días de la semana, se observa un patrón similar a los datos de los equipos manuales, en donde se presenta una disminución del promedio diario para ambas estaciones durante el domingo, con una reducción aproximada del 25% respecto al promedio semanal para ambas estaciones y contaminantes. Los promedios mensuales muestran máximos de concentraciones en ambas estaciones y contaminantes para el mes de febrero como se ha mencionado anteriormente, se destaca además un mínimo de concentración promedio mensual de PM_{10} en Gobernación obtenido en el mes de mayo, debido a la primera temporada de altas precipitaciones de marzo a mayo de la ciudad (ver Tabla 2).



Figura 9. Evolución temporal de concentraciones diarias de los equipos PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Automáticos durante 2024: (a) PM_{10} (b) $PM_{2.5}$

La línea punteada roja hace referencia a los límites máximos diarios permisibles definidos en la Res, 2254 de 2017 del MADS: $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10}) y $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($PM_{2.5}$)

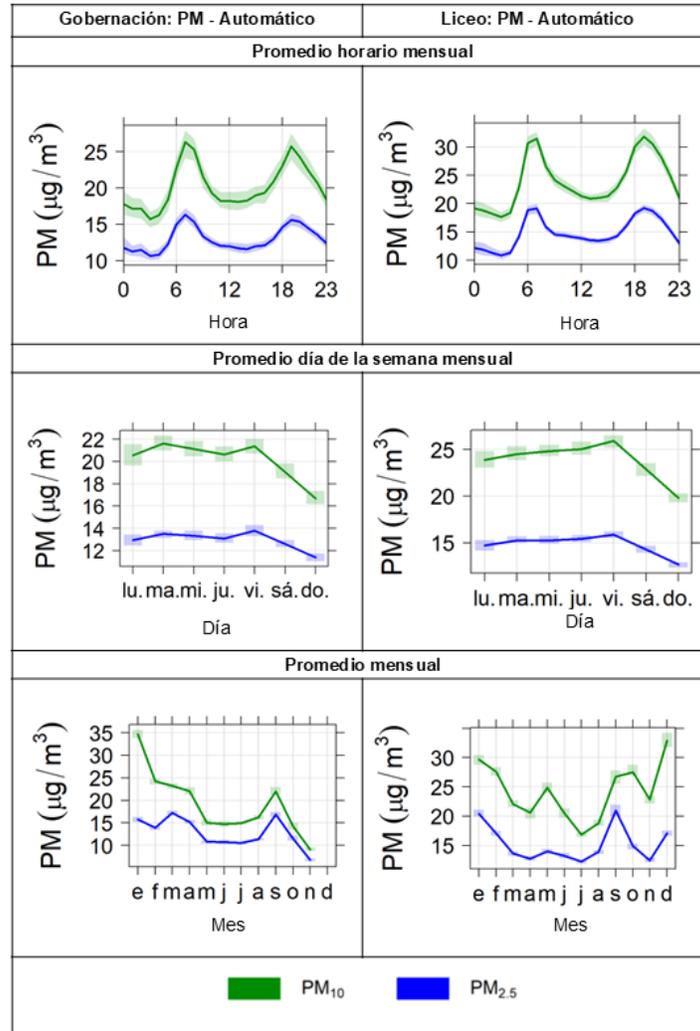


Figura 10. Promedio horario, semanal y mensual de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos durante el 2024. Gobernación (izquierda) y Liceo (derecha)

La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%

3.4. Índice de calidad del aire (ICA) para PM₁₀ y PM_{2.5} en el SVCA de Manizales

De la Figura 12 a la Figura 15 se presentan los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de PM – Manuales y Automáticos. El ICA representa mediante un indicador de color, el estado de la calidad del aire de acuerdo con la concentración de material particulado y su posible afectación a la salud. Para el cálculo de este indicador se utiliza la metodología propuesta por la Resolución 2254 de 2017 (capítulo IV artículos 18 al 21) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS 2017).

En lo que respecta a la concentración de PM₁₀– Manual, se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena en las seis estaciones de monitoreo para todos los días analizados, solo en Palogrande se presentó un ICA en estado moderado, el 10 de enero de 2024, día atípico que contó con los juegos pirotécnicos de

las ferias de Manizales. Mientras que en el caso de PM_{2.5} – Manual en la estación Gobernación, un 80% de los días analizados presentaron ICA en estado moderado.

Por otro lado, las concentraciones de PM₁₀ – Automático presentaron calidad del aire en estado bueno en el total de días. Para el caso de PM_{2.5} – Automático, se obtuvo un porcentaje de 49% y 66% de los días con ICA en estado moderado en la estación Gobernación y Liceo respectivamente. Adicionalmente, las bajas precipitaciones acumuladas para la temporada de enero a marzo potencian el efecto de contaminación por material particulado en la ciudad.

El PM_{2.5} al ser una fracción del PM más pequeña, posee mayor afectación en la salud humana, por lo tanto, se destaca la importancia de continuar con medidas que permitan identificar escenarios de riesgo para la ciudadanía e implementar estrategias de mitigación de emisiones de este contaminante en la ciudad.

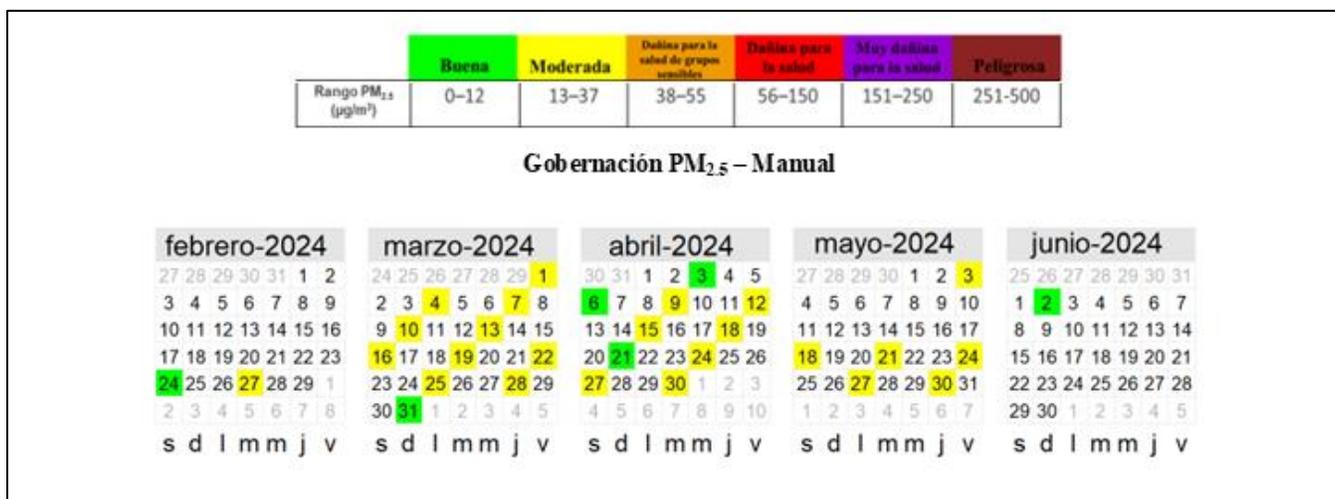
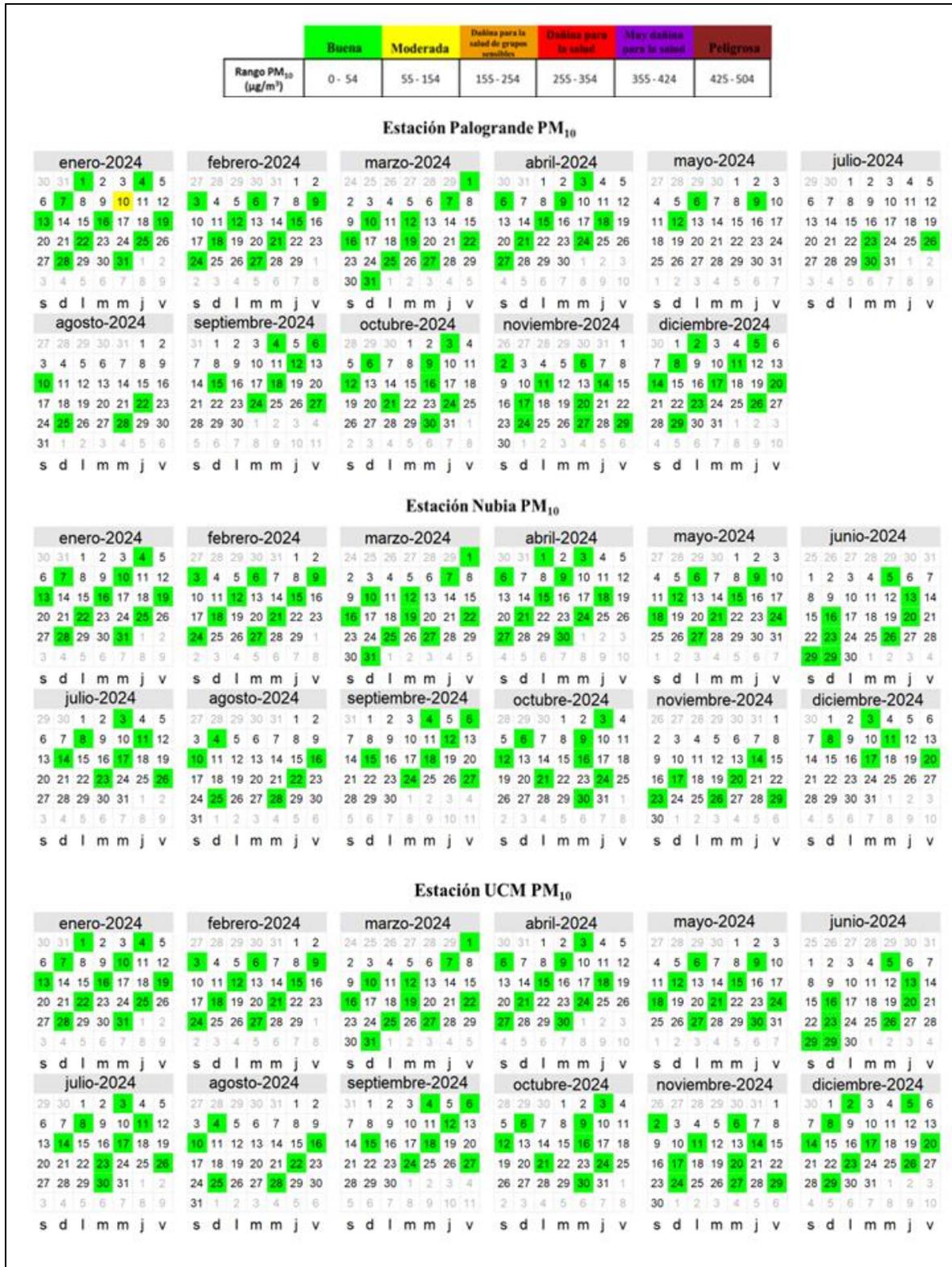


Figura 11. Índice de Calidad del Aire (ICA) para Gobernación PM_{2.5} – Manual del SVCA de Manizales durante 2024

Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS



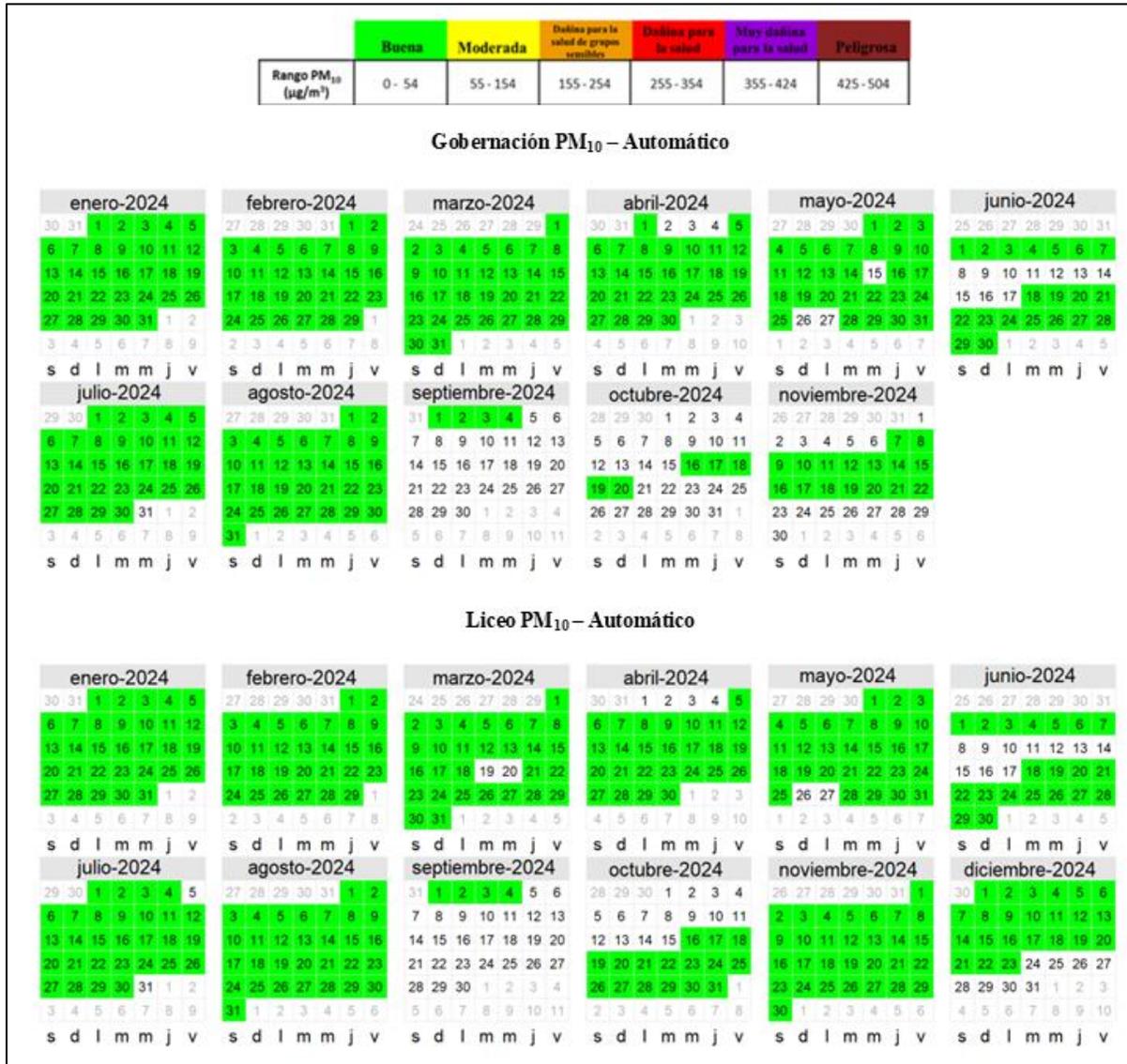


Figura 14. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ – Automático en las estaciones: Gobernación y Liceo durante 2024
Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

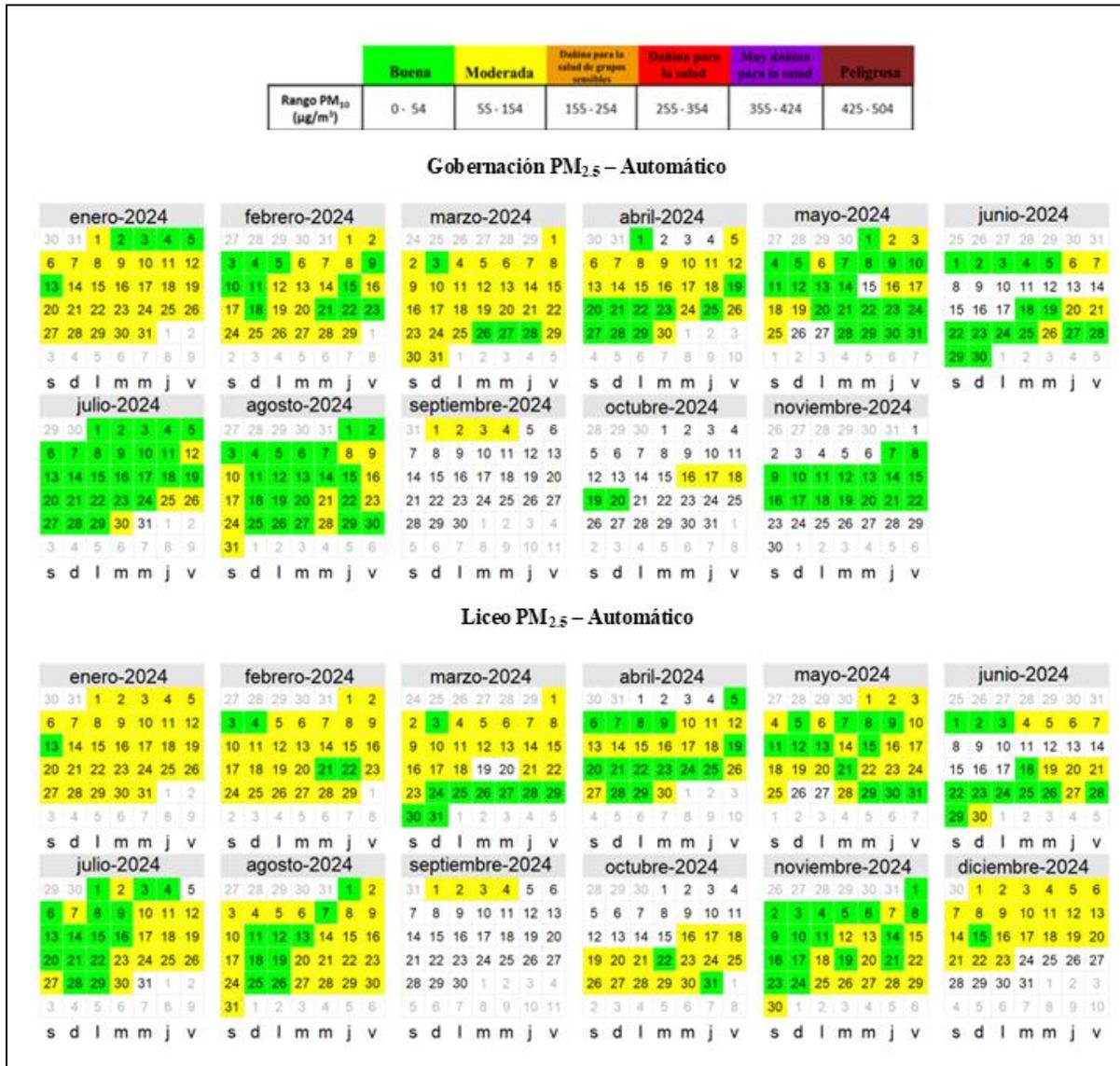


Figura 15. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{2.5} – Automático en las estaciones: Gobernación y Liceo durante 2024
Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

4. RESULTADOS DE MONITOREO PARA GASES

4.1. Monitoreo de monóxido de carbono (CO)

La Tabla 5 presenta los estadísticos descriptivos para las concentraciones promedio horarias de CO, para el año 2024 las concentraciones promedio medianas² se encontraron alrededor de 966.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std. = 394.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Al comparar los registros de la mediana del 2024 con respecto al 2022 (853.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2023 (726.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), se observó un aumento del 13% y 33% respectivamente, valores que se relacionan a posibles cambios en las dinámicas de fuentes antrópicas en la ciudad y la influencia de las precipitaciones en años previos, donde se presentó mayoritariamente el fenómeno de la niña. El CO es mayoritariamente dominado por la combustión de gasolina proveniente de motocicletas y vehículos particulares, categorías vehiculares que aportan cerca del 45% (29104 ton/año) y 33% (21287 ton/año) respectivamente a la emisión de este contaminante por fuentes móviles, según la última actualización del inventario de emisiones atmosféricas de la ciudad al año 2017 (Unal – Corpocaldas, 2024).

Se destaca que los datos presentan sesgo estadístico hacia la derecha y la mediana es menor que los promedios aritméticos, indicando la variabilidad de las concentraciones de este contaminante en la ciudad. Con respecto a los promedios mensuales, se puede observar que marzo presentó el mayor registro con un valor de 1319.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 5. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante el 2024

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Promedio	961.3	1143.9	1319.5	907.1	931.9	935.4	935.6	1001	1068.5	1167	1225.7	--***	1050.8
Mediana	851.7	1032.7	1212.2	769.5	814.1	837.9	827.9	890.6	962.4	1041.7	1141.9	--	966.1
Incertidumbre**	1.3	1.3	1.3	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	1.27	--	1.28
Desv. Est.	357.4	369.6	348.1	419.3	408.5	343.3	350.2	370.8	342.6	395.7	368.7	--	394.8
Min.	471.2	664	811.3	342	399	459.8	488.3	522.5	626	649.8	704.9	--	342
Max.	2351.2	2784.4	2883.2	2890.8	1125	2440.6	2984.9	2911.8	2609.7	3034.3	2871.8	--	3243
Percentil 95	1718.5	1869	2011	1705	1760.8	1621.7	1642.9	1759.8	1784.4	1931.1	1961.9	--	1816.9
N° Datos	744	695	742	692	742	720	744	554	663	744	505	--	6651

* Estadísticos estimados a partir de datos promedios horarios del equipo.

** Unidades: ppm. Las fuentes de incertidumbre están relacionadas principalmente con los procedimientos de calibración multipunto realizados con empresa externa: Comparación con patrones de referencia, desempeño por repetibilidad y resolución del instrumento.

*** --: Indica ausencia de datos.

De manera complementaria, la Figura 16 presenta la evolución de concentraciones octohorarias de CO durante el 2024. El promedio aritmético es estimado a partir de los datos cincominutales del equipo según lo estipulado por el “Manual de operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire” del MADVT (MAVDT, 2010).

² Debido a que la serie de datos no posee una distribución normal, se deciden utilizar pruebas estadísticas no paramétricas que permitan evidenciar los cambios en las concentraciones, sin incluir el sesgo estadístico de los datos.

Se resalta que la concentración de CO, tanto horaria como octohoraria, no ha superado el límite máximo establecido en la Resolución 2254 de 2017 (5000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedio octohorario y 35000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedio horario).

Adicionalmente, la Figura 17 presenta la variación promedio horaria mensual y por día de la semana. Se observa que los máximos horarios de concentración ocurren en las horas pico de tráfico vehicular (al inicio y final de la jornada laboral) alrededor de las 7 am y las 7 pm, con promedios horarios entre 1500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 1600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. De otra parte, se observan mínimos alrededor de los 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en horas de la madrugada (entre la 3 y 5 am, hora de menor actividad vehicular). Estos resultados son congruentes con el último plan de movilidad de Manizales, donde se indica que en la ciudad se presentan tres horas pico de flujo vehicular: la hora pico de inicio de la mañana (entre las 6:30 am y 7:30 am), la hora pico del medio día (11:45 am a 12:45 pm y 01:30 pm a 02:30 pm) y una hora pico al final de la tarde (05:30 pm a 06:30 pm) (Steer Davies Gleave, 2017).

Al comparar el promedio entre los días de semana, se observa un patrón estable con valores promedio entre 1050 y 1100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y, una concentración mínima los domingos (día con la menor actividad vehicular de la ciudad) con un valor promedio cercano a los 930 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta disminución de alrededor del 11% en comparación con el promedio semanal, indica la contribución de las fuentes móviles en las concentraciones de CO observadas.

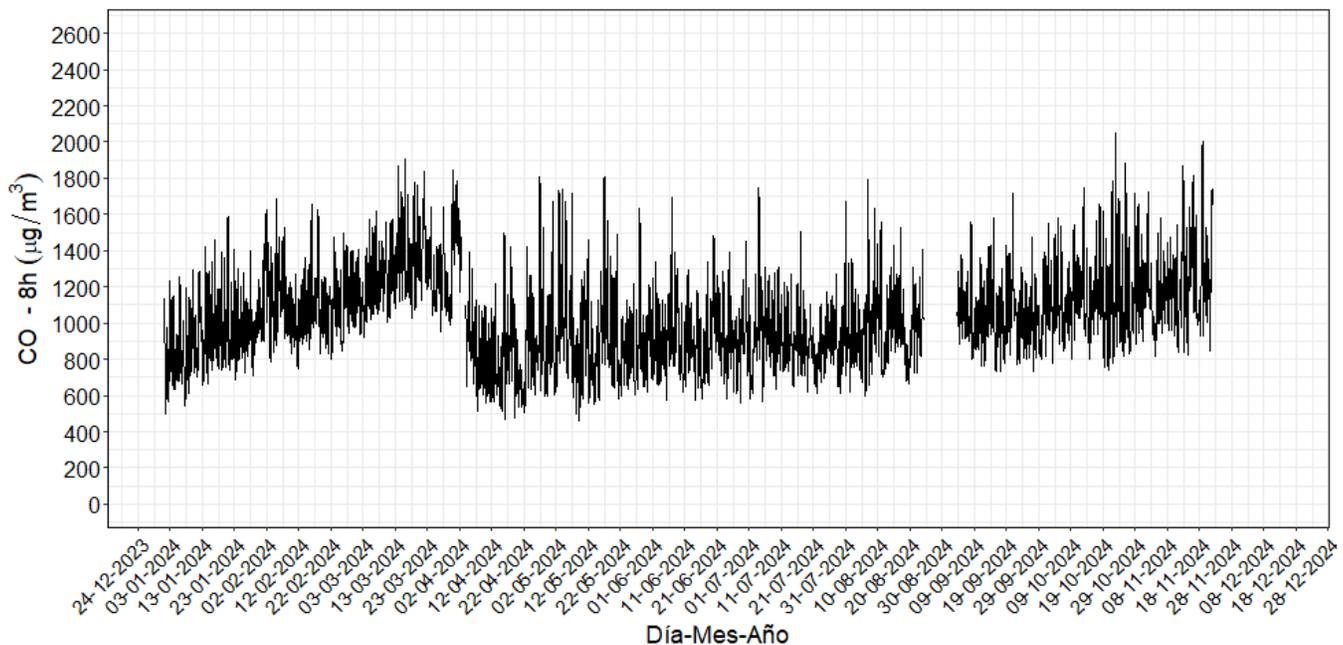


Figura 16. Evolución temporal de concentraciones promedio octohoraria de CO durante 2024

El nivel máximo permisible octohorario de la Resolución 2254 de 2017 equivalente a 5000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no fue superado en ningún día

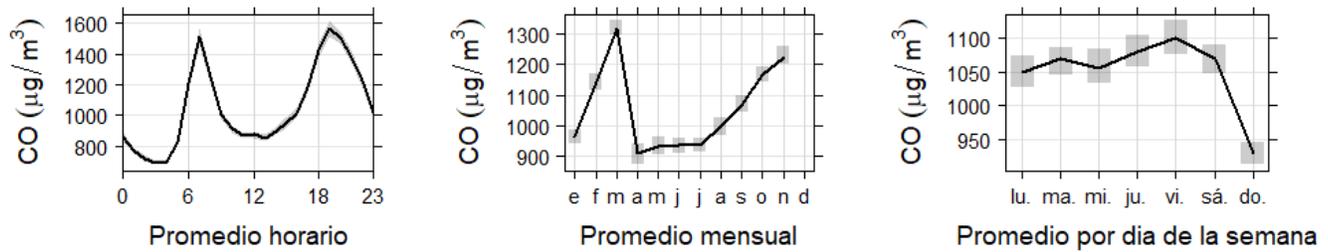


Figura 17. Variación promedio de CO horario (izquierda), mensual (centro) y por día de la semana (derecha) durante 2024

La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%

4.2. Monitoreo de dióxido de azufre (SO₂)

La Tabla 6 presenta los estadísticos descriptivos para el SO₂ durante el 2024. Se observa que, durante el año 2024, las concentraciones promedio medianas³ se encontraron alrededor de 2.9 µg/m³ (desv. std. = 2.5 µg/m³), con un mínimo y máximo valor horario registrado de 0.1 y 59.3 µg/m³ este último obtenido en septiembre. Por su parte, al comparar el registro de la mediana en mención con respecto al año 2022 (5.4 µg/m³) y con respecto al año 2023 (4.0 µg/m³), se observó una disminución del 46% y 27% respectivamente, valores probablemente relacionados a cambios en las dinámicas de las fuentes antrópicas en la ciudad, así como la disminución del contenido de azufre en la gasolina a nivel nacional. Se destaca que los datos presentan sesgo estadístico hacia la derecha y la mediana tiende a ser menor que el promedio, indicando la variabilidad de las concentraciones de este contaminante en la ciudad.

Se destaca que a pesar de los múltiples reportes de actividad volcánica relacionada a emisión de ceniza y gases del Nevado del Ruiz que superaban altura de columna de gases de 1500 m y patrones de viento predominantes hacia la ciudad de Manizales (Noroccidente), no se identificaron aumentos representativos en las concentraciones de SO₂. Las mediciones de concentración en aire ambiente se pueden ver influenciadas mayoritariamente por consideraciones de tipo local, como la dinámica de fuentes de emisión antrópicas (vehículos, industrias, entre otros), mientras que fuentes naturales (por ejemplo, las emisiones del volcán Nevado del Ruiz) tienen un efecto regional que, según los monitoreos realizados, no tiene un efecto inmediato en los picos de concentración del equipo; lo anterior sumado a otros factores de tipo meteorológico que dominan la dispersión del contaminante en la atmósfera (como, por ejemplo, velocidad y dirección del viento).

De manera complementaria, la Figura 18 presenta la evolución de concentraciones horarias de SO₂ durante el 2024. El promedio aritmético es estimado a partir de los datos cincominutales del equipo según lo estipulado por el “Manual de operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire” del MADVT (MAVDT,

³ Debido a que la serie de datos no posee una distribución normal, se deciden utilizar pruebas estadísticas no paramétricas que permitan evidenciar los cambios en las concentraciones, sin incluir el sesgo estadístico de los datos.

2010). Se destaca que todos los registros están dentro de los límites máximos permitidos por la normatividad vigente ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 1 hora).

Tabla 6. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante 2024

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Promedio	4.3	4.5	4.6	3.4	2.4	1.8	2.2	2.1	4.2	3.5	2.5	--***	3.3
Mediana	3.8	3.8	3.9	2.8	1.6	1.2	1.4	1.3	2.8	2.7	2.1	--	2.9
Incertidumbre**	1.97	1.97	1.97	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	1.90	--	1.93
Desv. Est.	1.7	1.8	1.9	2.8	2.4	2.1	2.1	2.1	4.5	2.3	1.7	--	2.5
Min.	1.3	1.7	2.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.6	0.5	0.4	--	0.1
Max.	11.5	14.5	14.5	23.6	19.6	17.9	15.2	12.5	59.3	12.7	15.9	--	59.3
Percentil 95	7.6	8.3	8.8	9.2	6.8	5.9	6.3	6.3	9.5	8.4	6.1	--	7.9
N° Datos	744	696	744	691	728	396	734	238	431	744	505	--	6651

* Estadísticos estimados a partir de datos promedios horarios del equipo.

** Unidades: ppb. Las fuentes de incertidumbre están relacionadas principalmente con los procedimientos de calibración multipunto realizados con empresa externa: Comparación con patrones de referencia, desempeño por repetibilidad y resolución del instrumento.

*** --: Indica ausencia de datos.

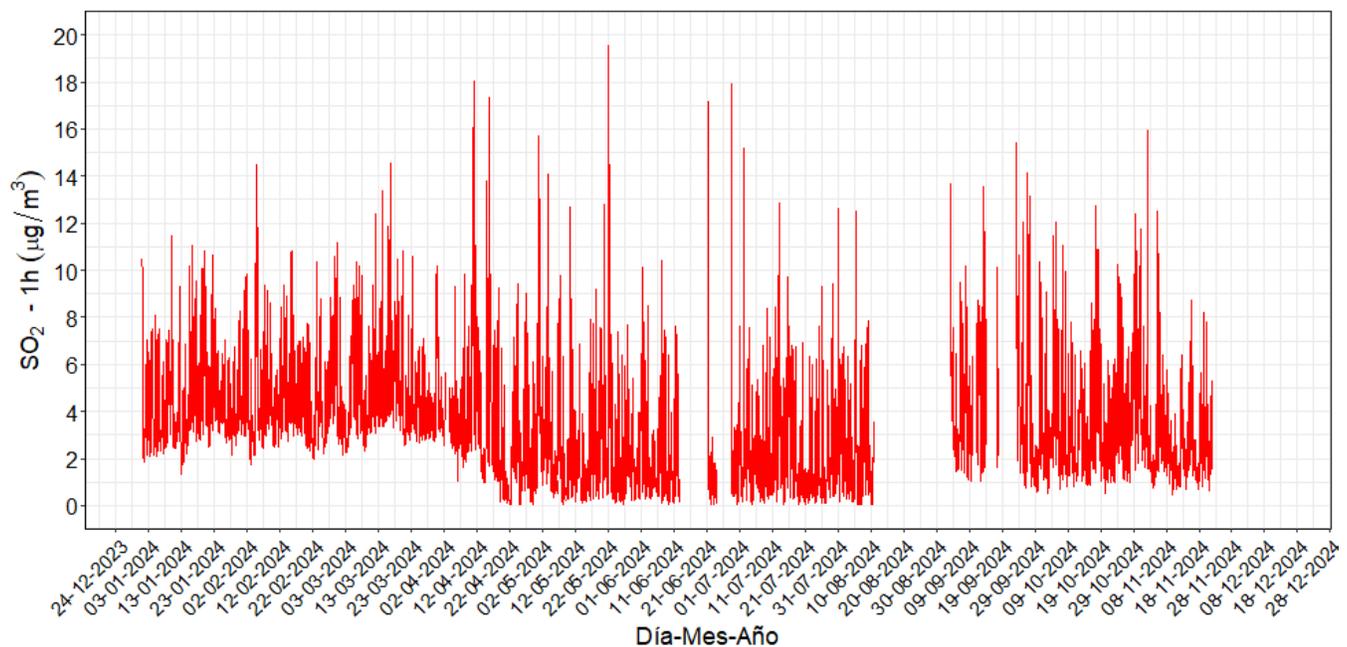


Figura 18. Evolución temporal de concentraciones promedio horario de SO_2 durante 2024

El nivel máximo permisible horario de la Resolución 2254 de 2017 equivalente a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no fue superado en ningún día

La Figura 19 presenta la variación promedio horaria, mensual y por día de la semana. Se observa un comportamiento horario similar al CO con valores máximos de concentración cercanos a las horas pico de tráfico vehicular al inicio y fin de la jornada laboral, alrededor de las 7 am y las 8 pm, con promedios horarios

alrededor de $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $4.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Asimismo, se observan mínimos alrededor de los $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al medio día (entre las 11 am y 1 pm).

Al comparar el promedio por día de la semana, se observa un comportamiento con máximos de concentración los martes con un valor alrededor de $3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y mínimos promedio los domingos alrededor de los $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, una reducción aproximada del 31% relacionada a la baja actividad de las fuentes móviles en ruta de la ciudad.

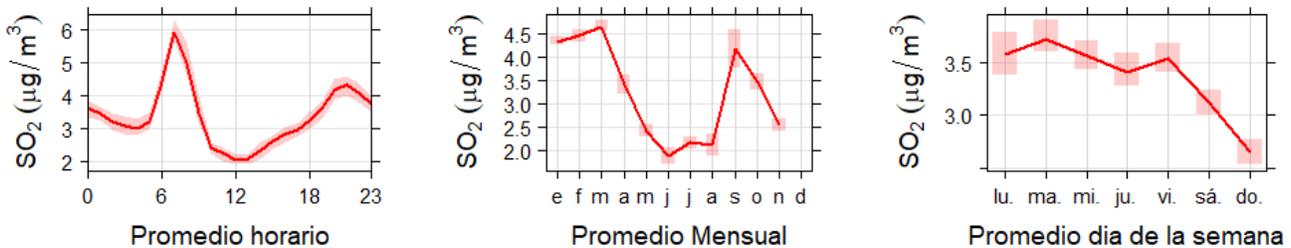


Figura 19. Variación promedio de SO₂ horario (izquierda), mensual (centro) y por día de la semana (derecha) durante el 2024

La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%

4.3. Monitoreo de ozono troposférico (O₃)

La Tabla 7 presenta los estadísticos descriptivos para O₃ durante el periodo de análisis, así como la subclasificación entre las concentraciones del día (diurno) y la noche (nocturno). Las concentraciones promedio medianas⁴ del 2024, se encontraron en $28.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el día completo, $45.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la jornada diurna y $20.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la jornada nocturna. Al comparar los registros de la mediana diaria con respecto al 2022 ($23.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y con respecto al 2023 ($25.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se observó un aumento del 24% y 14% respectivamente. Este aumento progresivo indica un posible cambio en la emisión de precursores de O₃ ya que para el 2024 se observó un incremento paulatino de las concentraciones promedio, observándose máximos horarios y octohorarios por encima de los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, representando máximos históricos en la ciudad desde su monitoreo en el 2014.

Se destaca que los datos presentan sesgo estadístico hacia la derecha y la mediana tiende a ser menor que el promedio, indicando la variabilidad de las concentraciones de este contaminante en la ciudad. Con respecto a los promedios mensuales, se puede observar que durante mayo se presentó el menor registro con un valor de $20.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y durante septiembre se registró el mayor promedio mensual con un valor $44.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La Figura 20 presenta la evolución de concentraciones octohorarias de O₃ durante el 2024. El promedio aritmético es estimado a partir de los datos cincominutales del equipo según lo estipulado por el “Manual de operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire” del MADVT (MAVDT, 2010). Se resalta que las concentraciones octohorarias de O₃ se encontraron por debajo de los límites establecidos por la

⁴ Debido a que la serie de datos no posee una distribución normal, se deciden utilizar pruebas estadísticas no paramétricas que permitan evidenciar los cambios en las concentraciones, sin incluir el sesgo estadístico de los datos.

normatividad vigente ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedios de 8 horas), a excepción de un registro obtenido el 12 de abril con un valor de $112 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabla 7. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante el 2024 y su comparativo entre periodos del día

Periodo	Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Diario (0:00 a 23:59)	Promedio	42.1	39.3	43.2	34.3	20.1	21.4	32.3	36.4	44.2	36.2	23.3	--**	33.9
	Mediana	36.5	33.6	37.8	28.7	15.5	17.9	29.6	31.9	39.4	30.6	20.4	--	28.7
	Incertidumbre***	1.12	1.12	1.12	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	--	1.78
	Min.	5.2	4.9	5.7	1.1	1.1	1.2	2.1	2.6	4.3	3.2	1.6	--	1.1
	Max.	100.1	100.3	104.2	119.1	69.7	67.4	289.9	135.9	118.8	92.2	178.3	--	289.9
	Percentil 95	87.5	81.9	87.8	83.5	54.3	51.7	64.3	75.9	83.7	77.4	52.9	--	79.1
	N° Datos	744	696	744	692	742	720	744	554	586	744	484	--	7450
Diurno (6:00 a 17:59)	Promedio diurno	57.3	52.6	57	46.1	28.8	30.3	41.6	47.7	56.9	49.6	30	--	45.5
	Mediana diurna	61.4	57.8	62	44.4	27.6	30.3	45.1	49.8	63	50.9	28.1	--	45.3
	Desv. Est.	24.8	25.2	25.6	28.2	17	15.5	18.4	21.8	23.5	22.6	16.8	--	24.5
	Max.	100.1	100.3	104.2	119.1	69.7	67.4	74.3	91.7	101.9	92.2	97.4	--	119.1
	N° Datos	372	348	372	344	370	360	372	276	294	372	247	--	3727
Nocturno (18:00 a 5:59)	Promedio nocturno	26.7	26	29.5	22.7	11.4	12.4	23	25.2	31.3	22.7	16.	--	22.5
	Mediana nocturna	24.1	24.4	28.1	20.1	9.3	11.1	21.1	24.4	31.1	22.8	13.2	--	20.9
	Desv. Est.	14.1	12.5	12.8	16.2	8.3	7.9	20.9	14.2	13.9	11.5	14.1	--	15.1
	Max.	73.5	68.6	76.8	85.3	44	41.9	289.9	135.9	118.7	55.2	178.3	--	289.9
	N° Datos	372	348	372	348	372	360	372	278	292	372	237	--	3723

* Estadísticos estimados a partir de datos promedios horarios del equipo.

** --: Indica ausencia de datos.

*** Unidades: ppb. Las fuentes de incertidumbre están relacionadas principalmente con los procedimientos de calibración multipunto realizados con empresa externa: Comparación con patrones de referencia, desempeño por repetibilidad y resolución del instrumento.

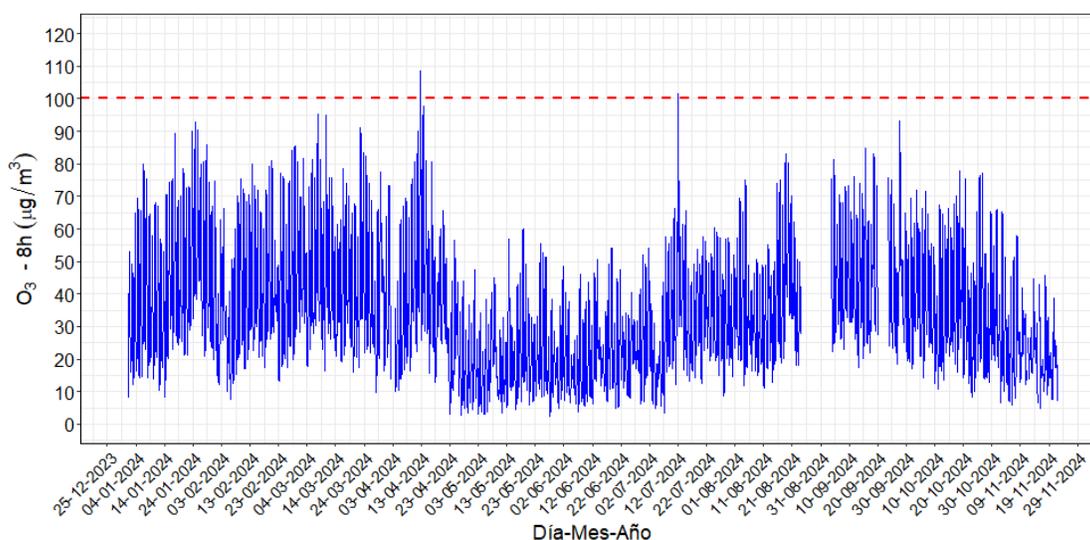


Figura 20. Evolución temporal de concentraciones promedio octohorario de O_3 durante el 2024

El nivel máximo permisible octohorario de la Res, 2254 de 2017 equivalente a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no fue superado

Para poder explicar el comportamiento de este contaminante, se resalta que el O₃ es un contaminante secundario que es formado en la atmósfera debido a las reacciones fotoquímicas en presencia de contaminantes primarios conocidos como precursores. Los principales precursores del O₃ son los óxidos de nitrógeno (NO_x, que representa las especies NO y NO₂) y los compuestos orgánicos volátiles (COVs). En la ciudad de Manizales ambos precursores son dominados por emisiones vehiculares (Unal - Corpocaldas, 2020). La formación de O₃ depende directamente de la relación entre COVs/NO_x y la habilidad oxidativa de la atmósfera, que depende de la presencia de radicales hidroxilos (OH·) en el ambiente.

Bajo una relación mayor a 1 entre COVs/NO_x, los radicales hidroxilos (OH) reaccionarán mayoritariamente con los COVs para generar moléculas de agua, NO₂ y especies de aldehídos (ver reacciones 1, 2 y 3). Por otro lado, con una baja relación de COVs/NO_x las reacciones de NO_x serán predominantes (ver reacciones 3, 4, 5 y 6) y removerán los radicales OH del sistema, generando consumo de O₃ mediante la reacción de titulación (ver reacción 6); para finalmente inducir la producción de especies como ácido nítrico que posteriormente precipitan en forma seca o húmeda (Sengel y otros, 2020; Fabián y Dameris, 2014).

En general, la disminución de emisiones de precursores como los NO_x se relaciona con una reducción en la actividad del tráfico vehicular. Este fenómeno altera las reacciones fotoquímicas induciendo una mayor generación de O₃, debido a que los radicales (OH·) tenderán hacia la reacción con COVs y favorecerán la producción neta de NO₂ (reacciones 1, 2 y 3),

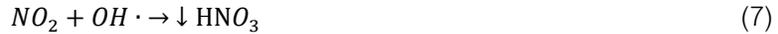
Posteriormente, la fotólisis del NO₂ (reacción 4) favorecerá la generación de O₃ (Ver reacción de titulación (6)) y el equilibrio será desplazado hacia el lado izquierdo de la reacción, este fenómeno reducirá la habilidad oxidativa de la atmósfera y por ende disminuirá el consumo de O₃ durante la noche (reacción 7), generando así un remanente atmosférico de O₃ que puede aumentar los niveles de concentración para el día siguiente (Sengel y colaboradores, 2020).

A medida que aumenta la generación de precursores en la atmósfera, se presenta una competencia por el consumo de radicales hidroxilos (OH) presentes en el ambiente y la reacción de titulación (reacción 6) es desplazada hacia un mayor consumo de O₃, por consiguiente, una reducción de las concentraciones observadas. En este sentido se podría sugerir que las concentraciones de O₃ en la ciudad de Manizales se encuentran dominadas por la presencia de COVs en la atmósfera (Li, 201; Sengel y otros, 2020).



Dónde: R representa una cadena de hidrocarburos (ej, Etano (C₂H₆) el grupo R representara la cadena C₂H₅); M representa cualquier mediador inerte que permita conservar el momento de la reacción (ej, Nitrógeno).





Dónde: $h\nu$ representa la energía fotoquímica efecto de la radiación solar en su longitud de onda corta.

La Figura 21 presenta el promedio horario y promedio por día de la semana de la variación de O_3 y radiación solar para el período de análisis. Adicionalmente, se presenta el comportamiento de estas variables durante el día (diurno, entre las 6 am y 6 pm) y la noche (nocturno, entre las 6 pm y 6 am). Se observa que se presentan los picos máximos en las concentraciones de ozono durante las 11:30 am y 3:00 pm del día, alcanzando concentraciones promedio alrededor de $70 \mu g/m^3$. Las concentraciones diurnas son aproximadamente 2 veces más elevadas que en las noches, con una mediana diurna de $45.3 \mu g/m^3$ y una nocturna de $20.9 \mu g/m^3$.

Para el período nocturno, se presenta un pico de ozono entre la 1:00 am y 3:00 am con valores cercanos a los $30 \mu g/m^3$, fenómeno relacionado posiblemente al transporte de O_3 que es generado durante el día y posteriormente es transportado desde la parte alta de la cordillera hacia el centro urbano, debido a los patrones de circulación de vientos montaña - valle característicos de la ciudad. Adicionalmente, la ausencia de radiación solar disminuye la temperatura de las masas de aire y por ende la reducción en la flotabilidad, generando la disminución de la altura de la capa de mezcla. Este fenómeno impide la libre dispersión de contaminantes en la atmósfera. De otra parte, se evidencia que los promedios obtenidos no presentan una relación específica con los días de la semana laborales y no laborales.

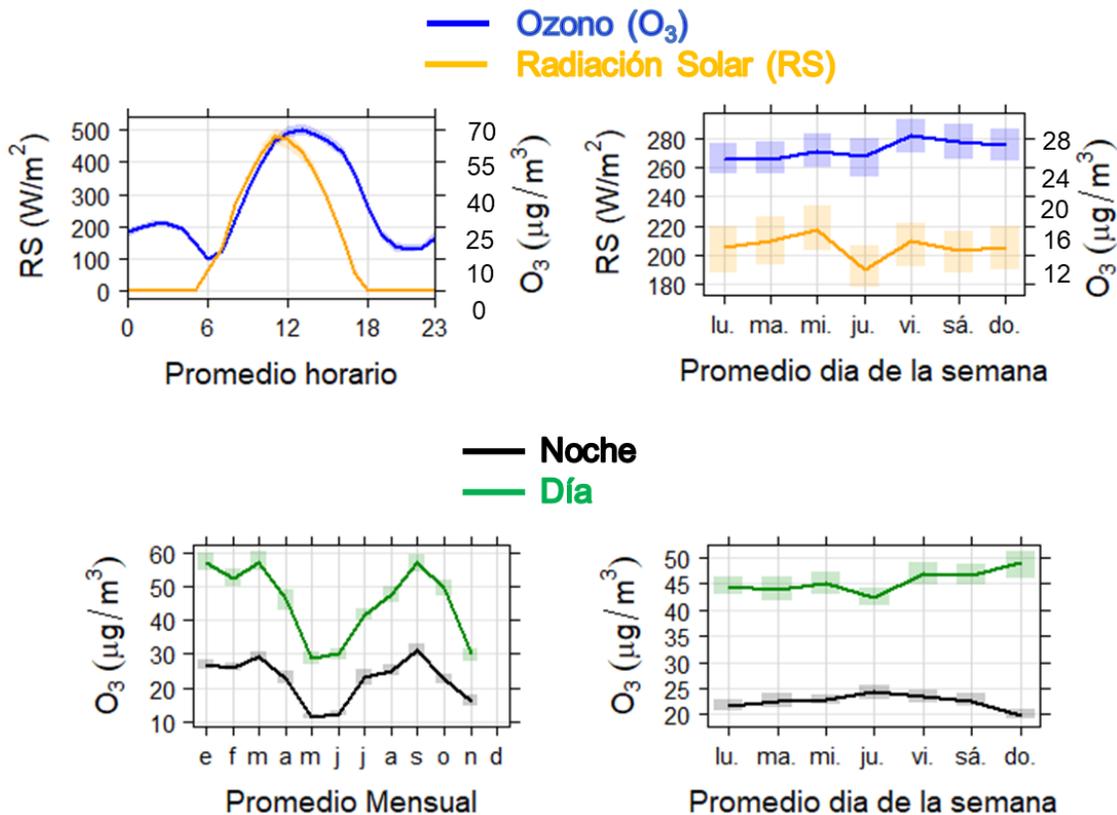


Figura 21. Variación promedio horaria y por día de la semana de O_3 y radiación solar
 Se incluye además el comportamiento promedio semanal entre las horas diurnas y nocturnas durante período de análisis

4.4. Índices de calidad del aire (ICA) para O₃, SO₂ y CO en el SVCA de Manizales

La Figura 22 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de CO, SO₂ y O₃. El ICA representa mediante un indicador de color, el estado de la calidad del aire de acuerdo con la concentración de cada contaminante y su posible afectación a la salud. Para el cálculo de este indicador se utiliza la metodología propuesta por la Resolución 2254 de 2017 (capítulo IV artículo 18 al 21) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS 2017). Se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena en lo que va del 2024 para los contaminantes mencionados, a excepción del 12 de abril que presentó un ICA Moderado para O₃, el primer registro histórico que supero los 100 µg/m³.

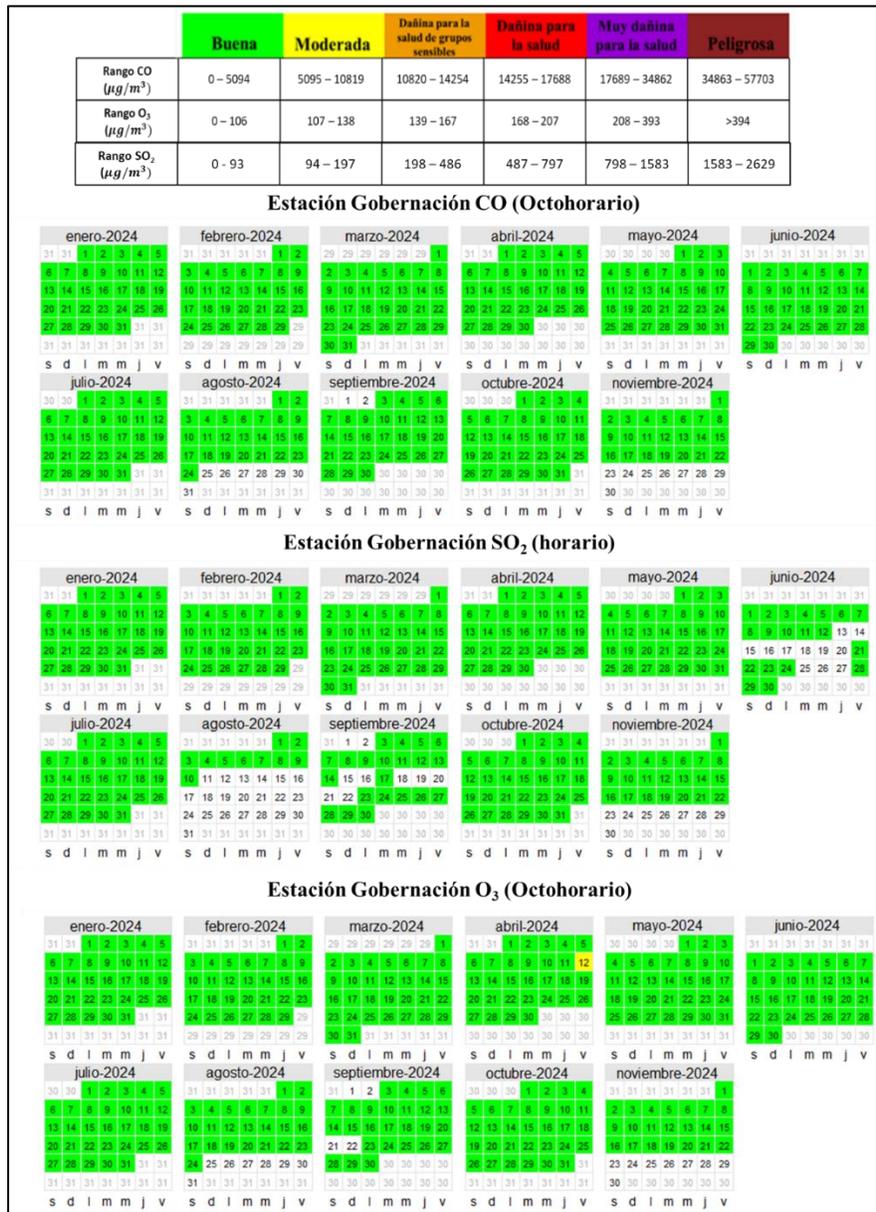


Figura 22. Índice de calidad del aire (ICA) para CO, SO₂ y O₃ en Manizales durante el 2024

Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS

5.1. Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz

Durante 2024 se realizó un seguimiento de los diferentes reportes semanales que son generados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) a través de su plataforma en línea, permitiendo confirmar algunos días con actividad y emisiones atmosféricas de esta fuente puntual natural asociadas con ceniza volcánica y SO₂. La Tabla 8 presenta un resumen con algunos de los días que tuvieron alturas significativas de la columna de gases emitidos (superiores a los 1500 metros). De estos días se destaca que el 90% de los reportes presentaron predominancia de vientos hacia el occidente y/o noroccidente, ubicación de Manzales, generando una posible afectación a la calidad del aire por esta fuente en la ciudad. Finalmente, cabe mencionar que, a pesar de la actividad a lo largo del año, las concentraciones en la ciudad no se vieron afectadas de manera drástica, entre otros por el efecto favorable de las direcciones del viento.

Tabla 8. Resumen de emisiones volcánicas significativas (altura de la columna de gases superiores a los 1500 m), con posible afectación en concentraciones diarias de PM₁₀ – Automático y SO₂ en la estación Gobernación (SGC, 2024)

Fecha (dd-mm)	Altura de la columna (m)	Predominancia del viento *	PM ₁₀ – Automático (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)
06-01	1800	Noroccidente	31.9	3.8
10-01	2400	Noroccidente	42.3	4.4
20-01	2000	Noroccidente	34.5	5.7
29-01	1800	Norte	42.3	4
05-02	1800	Vertical	19.1	5.6
27-02	2000	Noroccidente	29.9	5.5
01-03	1800	Suroccidente	27.9	3.7
09-03	2000	Vertical	23.9	3.4
04-04	1500	Noroccidente	--**	3.4
13-04	1600	Noroccidente	36.8	2.3
18-04	1700	Noroccidente	28.7	3.3
29-04	1600	Noroccidente	15.4	2.1
30-04	2000	Noroccidente	17.8	4.7
10-05	1500	Noroccidente	10.7	3.7
26-05	1500	Noroccidente	--	1.6

Fecha (dd-mm)	Altura de la columna (m)	Predominancia del viento *	PM ₁₀ – Automático (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)
01-06	1800	Noroccidente	9.8	3.3
09-06	1500	Noroccidente	--	1.4
18-06	2000	Noroccidente	13.3	--
29-06	2100	Occidente	14.5	1.4
10-07	3300	Occidente	15.8	2.4
26-07	2300	Occidente	22.7	1.4
30-08	2300	Noroccidente	16.3	--
18-09	1800	Noroccidente	--	--
30-09	2000	Vertical	--	4.2
07-10	1800	Noroccidente	--	3.1
11-10	1500	Noroccidente	--	2.2
16-10	2200	Noroccidente	16.8	3.9
26-10	2100	Noroccidente	--	2.5
30-10	1800	Noroccidente	--	5.1
10-11	1600	Suroriente	7.5	1.7
24-12	2200	Occidente	--	--

* Corresponde a la dirección a la que se dirigió la columna de gases

**-- Ausencia de datos

6. REFERENCIAS

- Carslaw, D.C. y Ropkins K., 2015, The openair manual – opensource tools for analysing air pollution data, Manual for version 1,1-4, King’s college London,
- Cuesta A., Wahl M., Acosta J., García J., Aristizábal B,H, 2020, Mixing layer height and slope wind oscillation: Factor that control ambient air SO₂ in a tropical mountain city, *Sustainable cities and society*, Vol 52, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101852>,
- G. Loosmore y R. Cederwall, 2004, Precipitation scavenging of atmospheric aerosols for emergency response applications: testing an updated model with new real time data, *Atmospheric Environment*, vol, 38, pp, 993-1003
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), 2017, Resolución 2254 de 2017, Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones, Bogotá, D. C., Colombia,
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), 2010, Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire, Bogotá, D.C., Colombia,
- Organización Mundial de la Salud – OMS, 2018, [En línea] Disponible en: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Organización Mundial de la Salud – OMS, 2022, WHO global air quality guidelines, Particulate matter (PM_{2,5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide,
- Our World in Data, “Indoor Air Pollution” Hannah Ritchie and Max Roser, 2017, [En línea], Disponible en: <https://ourworldindata.org/air-pollution>, [Último acceso: 15/07/2024],
- Servicio geológico colombiano (SGC), 2024, Boletín semanal de actividad del volcán Nevado del Ruiz, Manizales, Caldas, Dirección de geo amenazas.
- Steer Davies Gleave, (2017), Manizales plan maestro de movilidad, Manizales: Gaceta del concejo de Manizales, Recuperado el 06 de 17 de 2019, de <http://concejodemanzales.gov.co/wp-content/uploads/2018/06/GACETA-188-DE-2018-PLAN-MAESTRO-DE-MOVILIDAD-DEFINITIVA.pdf>
- Unal – Corpocaldas, 2019a, Actualización del inventario de emisiones atmosféricas en la ciudad de Manizales año base 2017, Boletín de resultados, Disponible en: <http://cdiac,manizales,unal,edu,co/inicio/publicaciones,php>