

SIMAC

SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO AMBIENTAL DE CALDAS



BOLETÍN CALIDAD DEL AIRE MANIZALES Enero - Marzo 2025

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



Equipo Hi-Vol Manual / Estación Católica
La Estrella / Manizales, Caldas



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA



*GTA en Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

**Subdirección de Evaluación y Seguimiento Ambiental CORPOCALDAS

TABLA DE CONTENIDO

1. EL SISTEMA DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE (SVCA) DE MANIZALES...	2
2. ANÁLISIS METEOROLÓGICO	6
3. RESULTADOS DE MONITOREO PARA PM ₁₀ Y PM _{2.5}	10
3.1. Equipos manuales: Análisis de promedios diarios y mensuales	10
3.2. Equipos manuales: Comparación con la norma anual	13
3.3. Equipos automáticos: Análisis de promedios diarios y mensuales.....	14
3.4. Índice de calidad del aire (ICA) para PM ₁₀ y PM _{2.5} en el SVCA de Manizales	17
4. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS	20
4.1. Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz.....	20
5. REFERENCIAS	21

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 a marzo de 2025

Estación (Abreviatura)	Características y fuentes de contaminantes*	Equipos	Propietario	Año de inicio operación óptima	Estado actual y operación durante 2025	Latitud / Longitud	Altitud msnm
Gobernación (Gob)	CU, SC – MTV, MAI	PM ₁₀ – Manual ^a	Corpocaldas	2009	El pasado 20 de febrero se permite la reinstalación de los equipos que estaban apagados por adecuaciones en la estación. No obstante, los equipos han presentado fallas de estabilización impidiendo la correcta toma de muestras. El equipo de PM – Automático es el único que recolecta datos con normalidad.	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	Se retoma recolección de muestras el 09 de febrero.	N 5° 1' 47.0" W 75° 28' 18"	2091
Liceo (Lic)	CU, SC – ATV, SAI	PM ₁₀ – Manual ^c	Corpocaldas	2010	Por adecuaciones en la estación, se retoma recolección de muestras de PM – Automático el 17 de marzo. El equipo de PM – Manual retoma actividades el 16 de enero.	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	Se retoma recolección de muestras el 12 de febrero.	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.

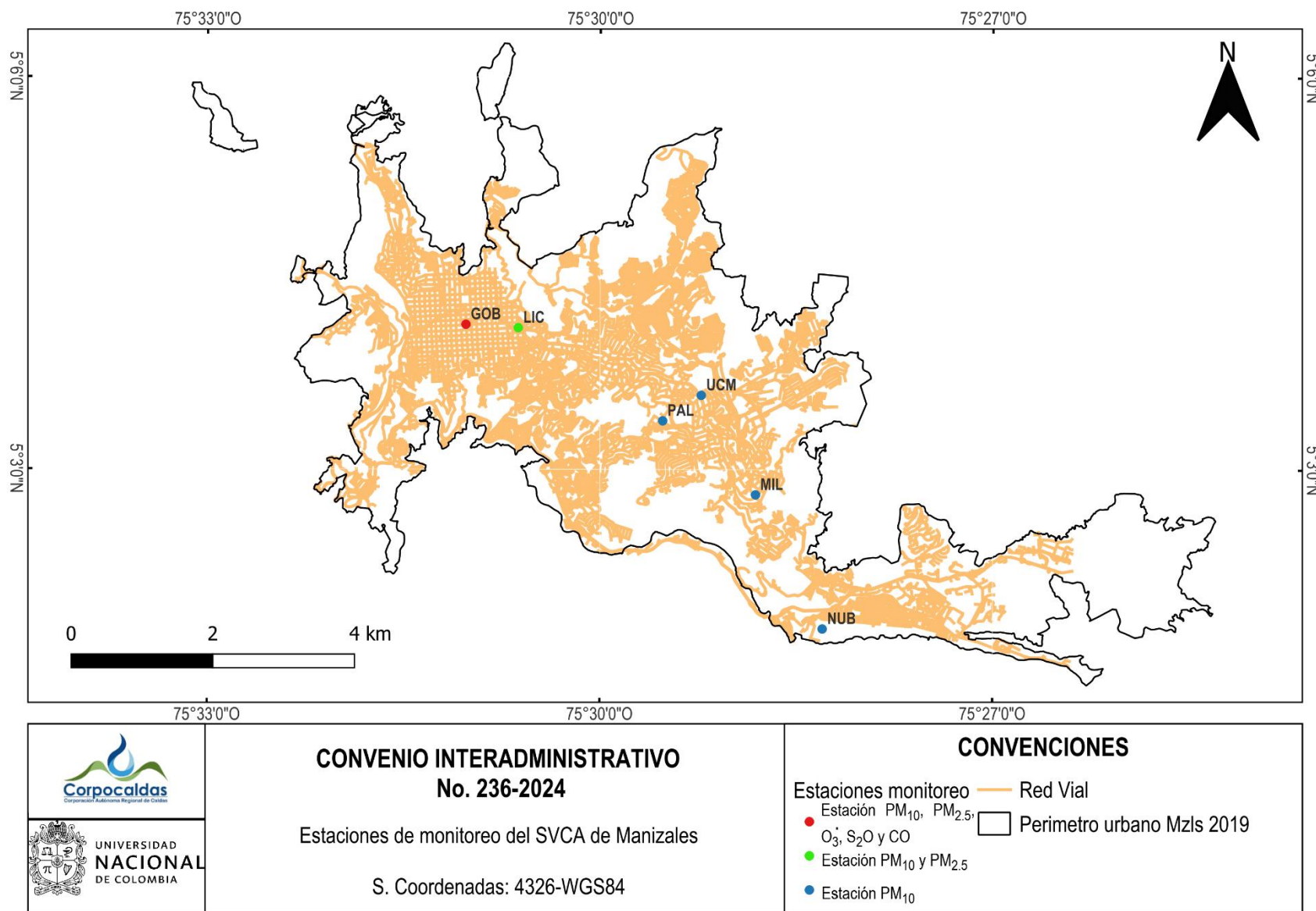


Figura 1. Mapa con ubicación de las estaciones de calidad del aire pertenecientes al SVCA de Manizales

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). Para estos primeros tres meses del 2025, se han presentado situaciones atípicas que han impedido la operación continua de algunas estaciones de la red, como es el caso de Liceo y Gobernación, que tuvieron ausencia de datos en casi la totalidad del periodo de análisis. Liceo retoma su actividad el 17 de marzo, debido a los arreglos en el edificio (ver Figura 1). Por su parte, Gobernación se reinstaló el 20 de febrero, no obstante, debido a los constantes movimientos y la acumulación de polvo durante los arreglos, se presentaron daños posteriores en el aire acondicionado que controla la temperatura ambiental dentro de la cabina de gases, así como problemas de estabilidad de los equipos de PM – Manual de Gobernación. Durante los controles de rutina, se vienen identificando fallas de estabilización por controles de calibración en dichos equipos, lo cual ha impedido la toma de muestras de acuerdo con los protocolos establecidos en el SVCA. Es importante mencionar que los equipos de PM – Manual tipo Low Vol de la estación Gobernación tienen una edad que supera los 16 años desde su adquisición, por lo que ya no se cuentan con repuestos de fábrica originales para reemplazar los que actualmente inducen las fallas internas. Es probable entonces que estos equipos estén culminando su vida útil y la estación continuará con el monitoreo a través del equipo automático que se encuentra en Gobernación.



Figura 1. Adecuaciones en la estación Liceo. Marzo de 2025

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 lo corrido del 2025, se observa que el comportamiento de las variables a lo largo de la ciudad es estable, se evidencian mínimos de precipitación para el mes de enero en todas las estaciones. Se registraron temperaturas máximas diarias que superaron los $30^{\circ}C$. La estación Milán planta Niza registró la mayor precipitación mensual con un acumulado de 303 mm en febrero, mientras que La Nubia registró el menor registro mensual con 40 mm en enero. Para la radiación solar se identifica un comportamiento inverso a la precipitación con promedios mensuales por encima de $177 W/m^2$ en toda la ciudad, y máximos promedios mensuales de hasta $333 W/m^2$ como en Gobernación durante enero.

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 febrero con un valor de 91.7 % en La Nubia y mínimos mensuales de 62.1% 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 enero a marzo de 2025

Mes	Temperatura del Aire [°C]	Velocidad de Viento [m/s]	Dirección Viento [°]	Presión Atmosférica [mm Hg]	Humedad Relativa [%]	Precipitación Acumulada [mm]	Radiación Solar [W/m²]
Gobernación							
Enero	18.2	1.30	261.6	574.4	79.5	53.4	333.2
Febrero	17.3	1.10	268.2	574.1	87.1	125.0	257.2
Marzo	17.6	1.10	262.7	574.6	85.2	165.2	279.9
Liceo							
Enero	17.5	0.58	247.3	589.2	62.1	60.8	225.2
Febrero	16.5	0.35	259.6	589.4	79.2	278.4	177.3
Marzo	16.8	0.43	218.5	589.9	76.5	217.4	205.2
Posgrados							
Enero	17.2	0.10	326.1	594.0	83.1	50.2	317.6
Febrero	16.6	0.10	347.8	593.9	89.9	241.0	227.2
Marzo	17.1	0.20	0.6	593.6	88.1	144.4	247.6
Milán planta Niza							
Enero	18.7	0.39	41.7	583.5	73.6	54.0	303.7
Febrero	17.6	0.34	39.7	583.7	69.0	303.0	213.6
Marzo	18.0	0.36	48.5	583.5	72.1	175.4	243.4
La Nubia							
Enero	19.3	1.12	143.7	595.4	85.0	40.0	225.2
Febrero	19.0	0.56	241.8	595.1	91.7	183.8	177.3
Marzo	19.1	0.68	188.3	595.7	90.7	151.4	205.2
Hospital de Caldas							
Enero	20.2	1.14	187.3	593.6	84.0	49.4	306.2
Febrero	19.4	0.90	206.6	593.6	91.3	254.2	213.8
Marzo	19.7	0.99	173.5	594.1	89.2	173.8	230.7

* ---: 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.

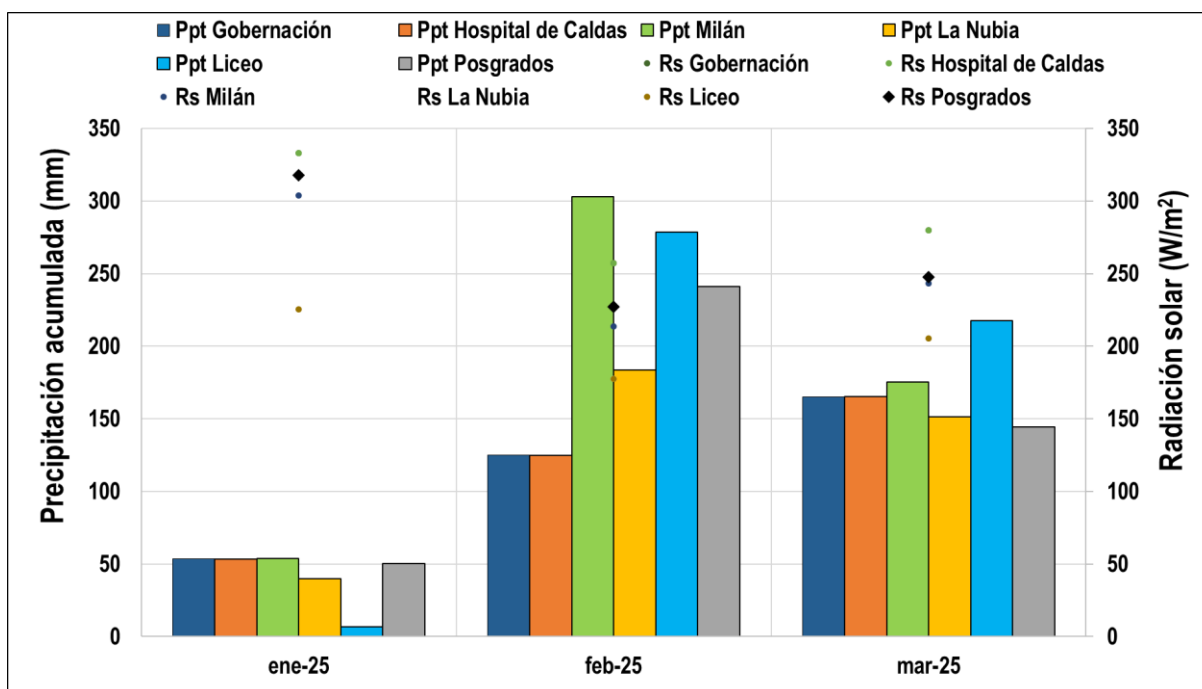


Figura 2. Precipitación mensual acumulada (Ppt) y promedio mensual de radiación solar (Rs) durante enero a marzo de 2025

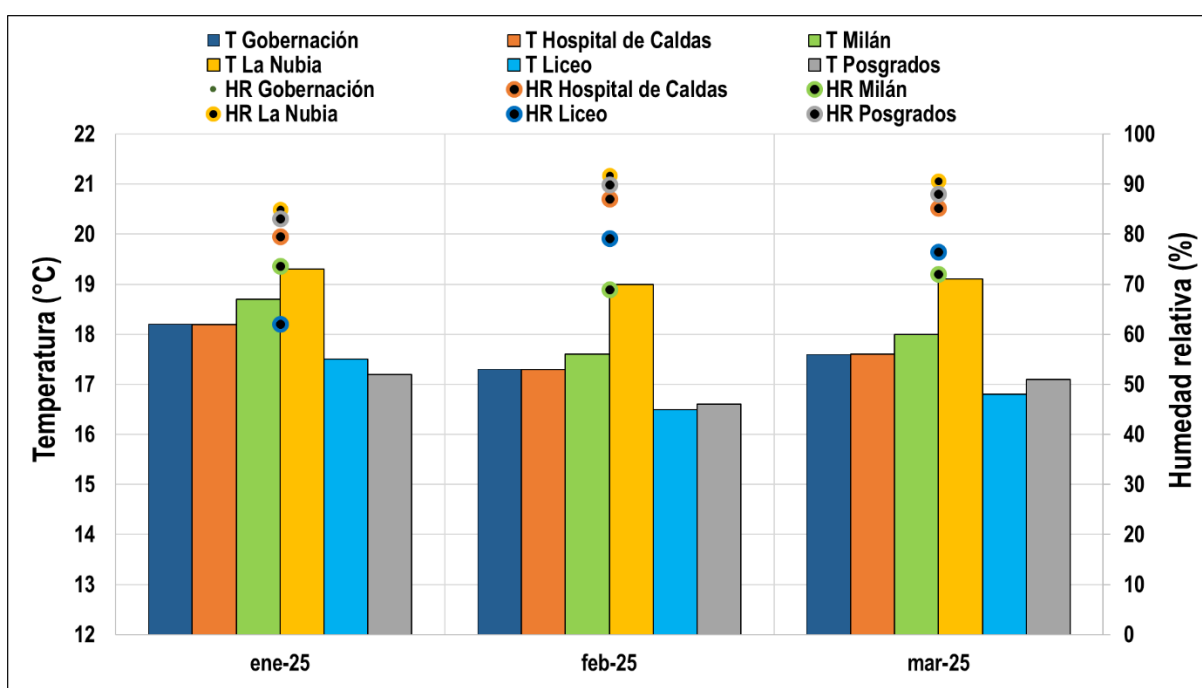


Figura 3. Promedios mensuales de temperatura del aire (T) y humedad relativa (HR) durante enero a marzo de 2025

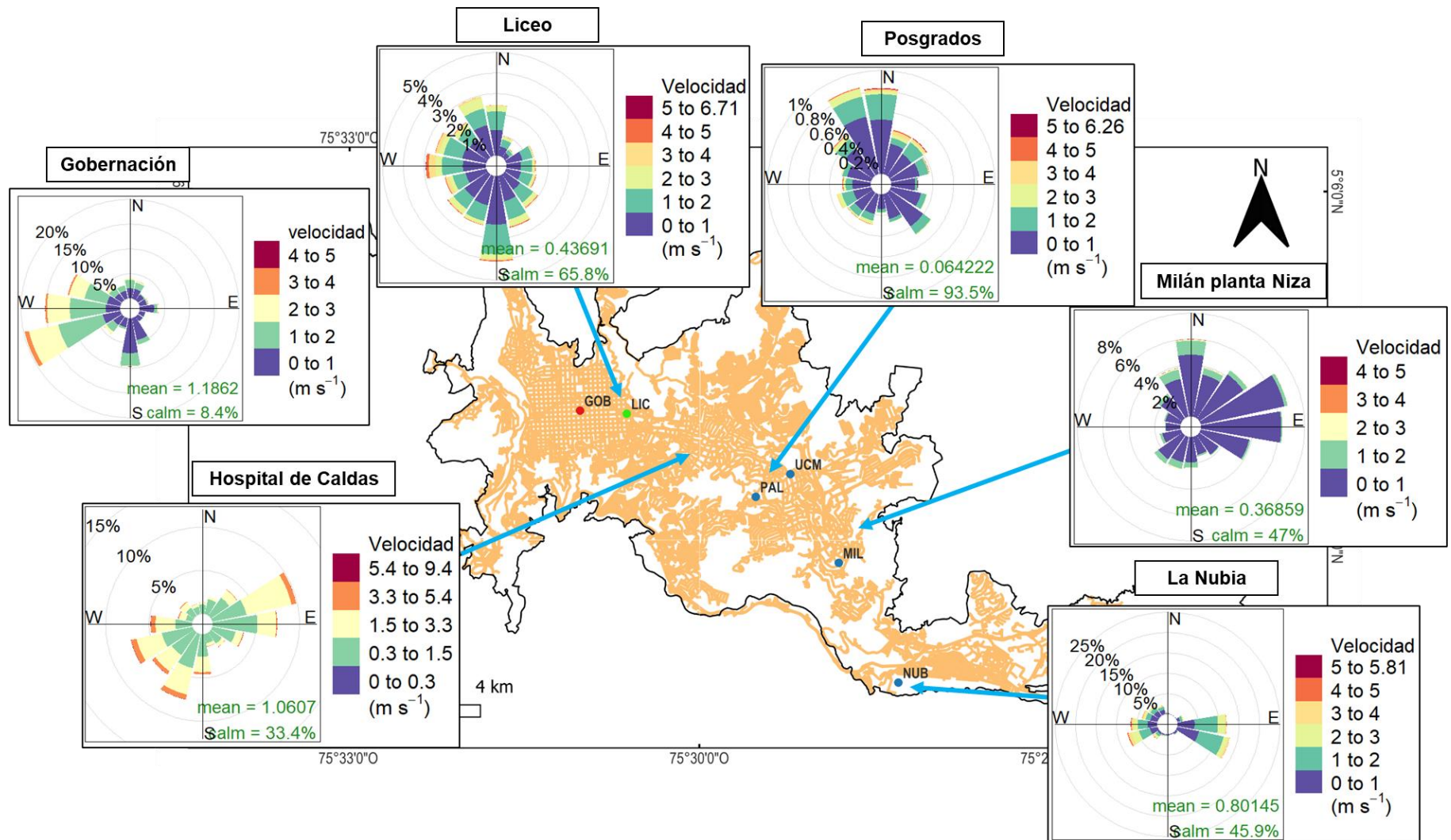


Figura 4. Rosas de viento en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante enero a marzo de 2025

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

3.1. Equipos manuales: Análisis de promedios diarios y mensuales

Durante el período de análisis, los equipos manuales de PM₁₀ en las estaciones Milán y Nubia no operaron con normalidad debido a problemas de acceso. Asimismo, tanto los equipos manuales de PM₁₀ como el de PM_{2.5} en Gobernación presentaron fallas que impidieron su funcionamiento. A pesar de esto, se tuvo operación normal en las demás estaciones. La Tabla 3 presenta los estadísticos descriptivos mensuales para las concentraciones de PM₁₀ – Manuales obtenidos durante enero, febrero y marzo del 2025. 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, en el primer trimestre del 2025, las estaciones de Milán y Liceo registraron las concentraciones promedio más altas de PM₁₀ con valores de $28 \pm 3.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $28 \pm 1.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente; seguidos por, Católica con $20 \pm 3.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Palogrande con $20 \pm 2.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por último, Nubia con $18 \pm 1.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 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 2024, registrando los valores más altos de PM₁₀ en Milán y Liceo con promedios mensuales alrededor de los $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Cabe resaltar que en las estaciones Palogrande y Católica todos 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 estaciones Liceo, Nubia y Milán se cumplió con este criterio el 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 febrero con $30 \pm 3.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$), y un máximo diario de $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el jueves 27 de febrero. 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 Nubia presentó los menores niveles de concentración con un promedio mensual mínimo en marzo con un valor de $17 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 1.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), valores asociados posiblemente con una disminución de la actividad vehicular de la zona debido al periodo vacacional del campus universitario La Nubia.

En el caso de los registros de PM_{2.5} – Manual de la estación Gobernación, como se indicó previamente, debido a daños presentados en el táctil del equipo no se tienen registros de este contaminante para el periodo de análisis.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de las concentraciones promedio mensuales de PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales (µg/m³) durante enero a marzo de 2025

Estadístico*	Enero	Febrero	Marzo	Total
Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	28	30	26	28
Mediana	19	32	27	29
Incertidumbre**	1.99	0.69	0.69	1.12
Desviación Estándar	16	6	8	9
Mínimo	15	19	11	11
Máximo	54	37	34	54
Percentil 95%	50	36	34	37
N° Datos - %DV***	5 - 45	9 - 100	10 - 100	24 - 80
Palogrande PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	19	19	21	20
Mediana	19	19	22	19
Incertidumbre**	3.02	2.60	2.60	2.74
Desviación Estándar	4	8	6	6
Mínimo	13	7	9	7
Máximo	26	33	28	33
Percentil 95%	25	30	28	28
N° Datos - %DV***	11 - 100	8 - 89	10 - 100	29 - 97
Milán PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	---****	30	27	28
Mediana	---	32	27	28
Incertidumbre**	---	3.79	3.79	3.79
Desviación Estándar	---	10	4	7
Mínimo	---	13	22	13
Máximo	---	43	32	43
Percentil 95%	---	41	31	37
N° Datos - %DV***	---	6 - 67	8 - 80	14 - 47
Nubia PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	---	19	17	18
Mediana	---	17	16	17
Incertidumbre**	---	1.51	1.51	1.51
Desviación Estándar	---	7	3	5
Mínimo	---	7	12	7
Máximo	---	27	21	27
Percentil 95%	---	27	21	26
N° Datos - %DV***	---	7 - 78	9 - 90	16 - 53
Católica PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	19	22	21	20
Mediana	19	23	20	19
Incertidumbre**	2.01	4.59	4.59	3.73
Desviación Estándar	3	6	5	5
Mínimo	14	14	14	14
Máximo	26	32	30	32
Percentil 95%	24	30	29	29
N° Datos - %DV***	11 - 100	8 - 89	10 - 100	29 - 97

* 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.

*** %DV = Porcentaje de datos válidos.

**** ---: Indica ausencia de datos.

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

Por último, la Figura 6 presenta la variación promedio de concentraciones de PM_{10} – 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 Liceo y Milán. En el caso de las estaciones Palogrande, Católica y Nubia ubicadas en campus universitarios, se observan mayores niveles de concentración los jueves.

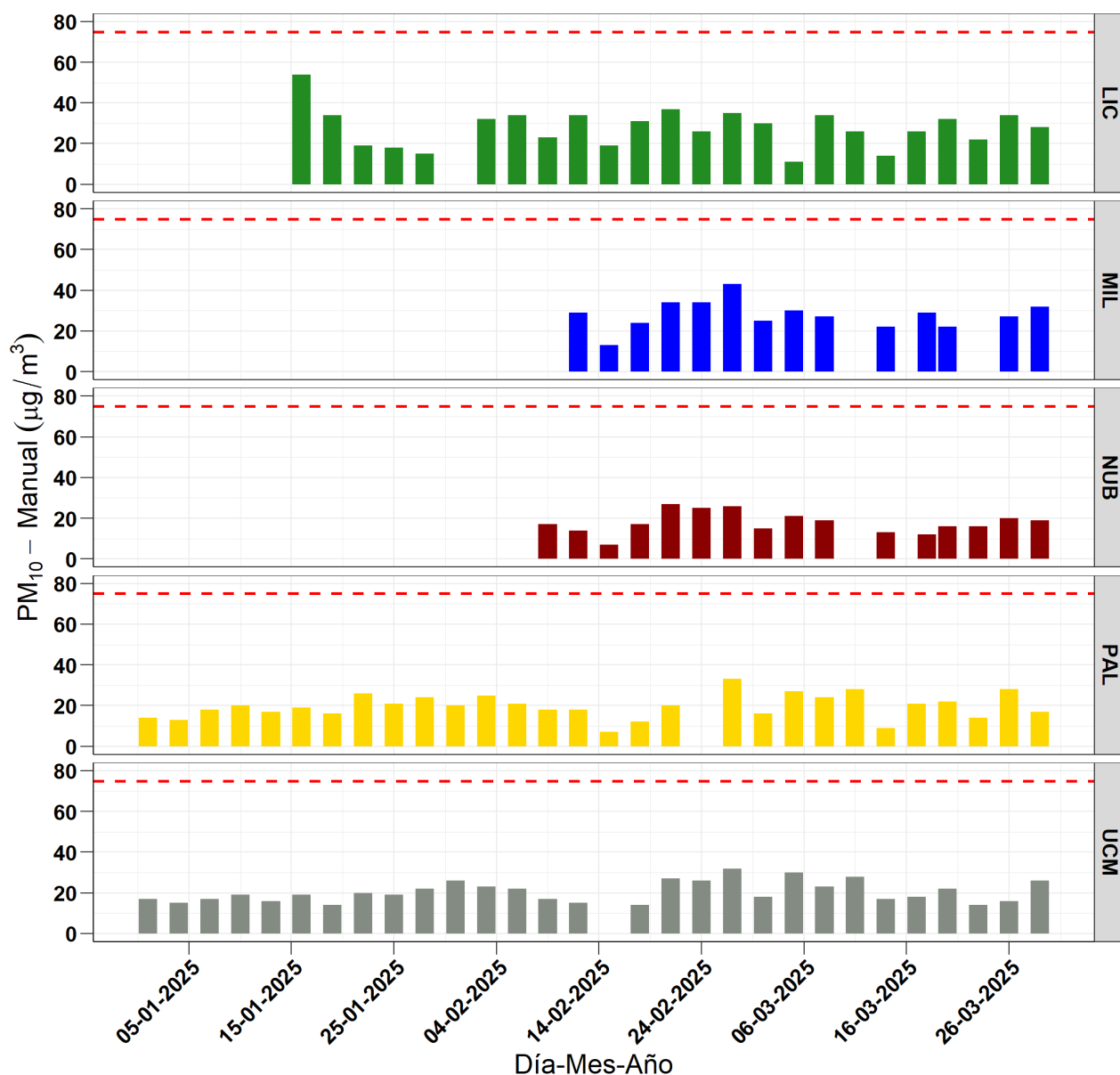


Figura 5. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM_{10} – Manuales durante enero a marzo de 2025

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

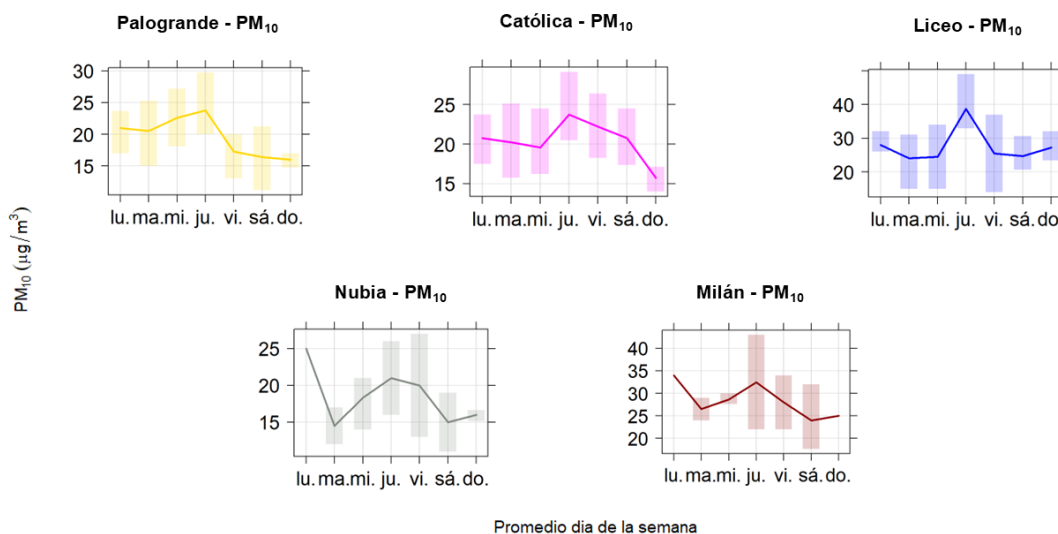


Figura 6. Variación promedio de concentraciones por días de la semana para PM_{10} – Manuales durante enero a marzo de 2025

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 7 se presenta la comparación del promedio aritmético obtenido para las concentraciones de PM_{10} con el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 para PM_{10} ($50 \mu g/m^3$). Se destaca que ninguna de las estaciones superó la normativa anual colombiana. Es importante resaltar que los promedios obtenidos en Manizales para PM_{10} 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} (OMS, 2022).

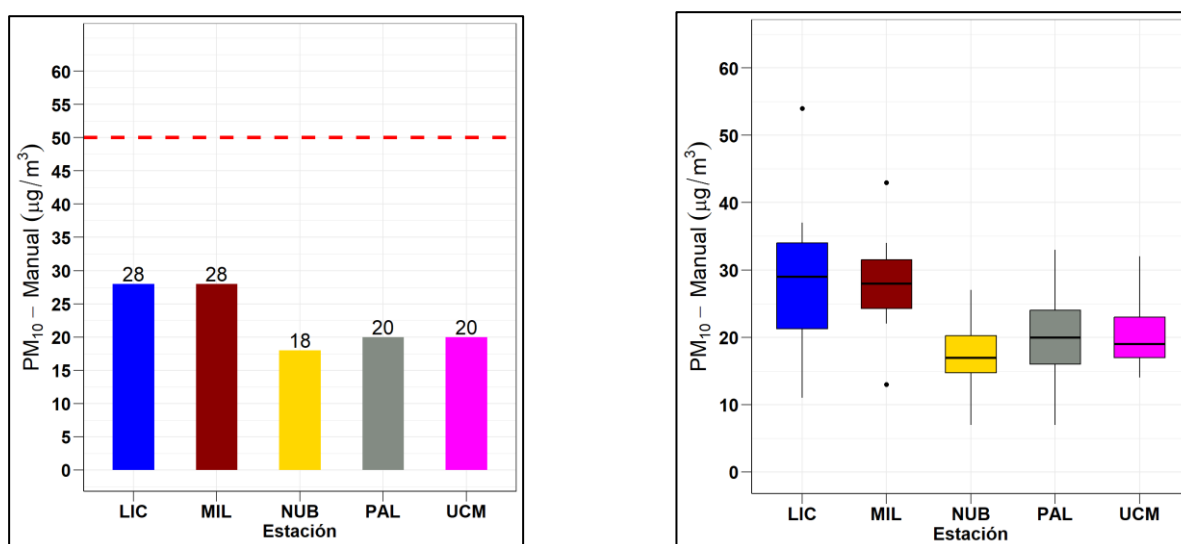


Figura 7. Concentración promedio (izquierda) y diagrama de cajas (derecha) de PM_{10} Manuales durante enero a marzo de 2025

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

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 14.9 µg/m³ (desv. std = 3.5 µg/m³) y 9.1 µg/m³ (desv. std = 2.5 µg/m³) respectivamente. De otra parte, las concentraciones promedio medianas de Liceo para PM₁₀ y PM_{2.5} se encontraron alrededor de los 38.9 µg/m³ (desv. std = 8.4 µg/m³) y 15.2 µg/m³ (desv. std = 8.4 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 21.3 µg/m³ y 20.6 µg/m³ respectivamente, obtenidos en enero y febrero. En el caso de Liceo se resalta la baja cantidad de datos en Liceo para este primer trimestre del 2025.

La Figura 8 presenta el comportamiento temporal de las concentraciones de los equipos PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos (promedio diario) durante enero a marzo de 2025 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.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio mensuales de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automático (µg/m³) durante enero a marzo de 2025

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Total	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar)					Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar)			
Promedio	16.5	14.1	13.2	14.6	--**	--	40	40
Mediana	16.4	14.9	13.4	14.9	--	--	38.9	38.9
Desv. Est.	2.7	4.2	2.6	3.5	--	--	8.4	8.4
Min.	9	5.7	7.9	5.7	--	--	27.2	27.2
Max.	21.3	20.6	18.7	21.3	--	--	53.1	53.1
Percentil 95	20.9	19.8	17.6	20.2	--	--	52.6	52.6
N° Datos	29	27	31	87	--	--	9	9
Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar)					Liceo PM_{2.5} (µg/m³ estándar)			
Promedio	9.3	8.8	9.5	9.3	--	--	15.2	15.2
Mediana	9.4	8.9	9.5	9.1	--	--	13.7	13.7
Desv. Est.	12.5	3.4	2.1	2.5	--	--	8.4	8.4
Min.	4.3	5.7	5.7	2.8	--	--	12.1	12.1

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.	Total	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Max.	13.1	20.6	14.6	14.7	--	--	20.9	20.9
Percentil 95	12.5	13.2	13.4	13.2	--	--	19.8	19.8
N° Datos	29	27	31	87	--	--	9	9

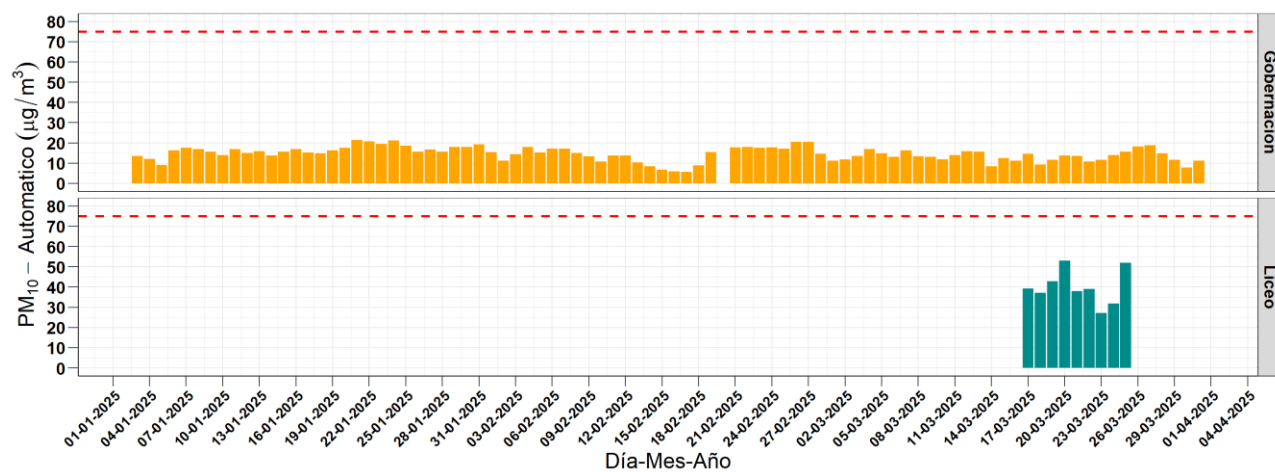
* A partir de datos promedio diarios del equipo

** -- Indica ausencia de datos

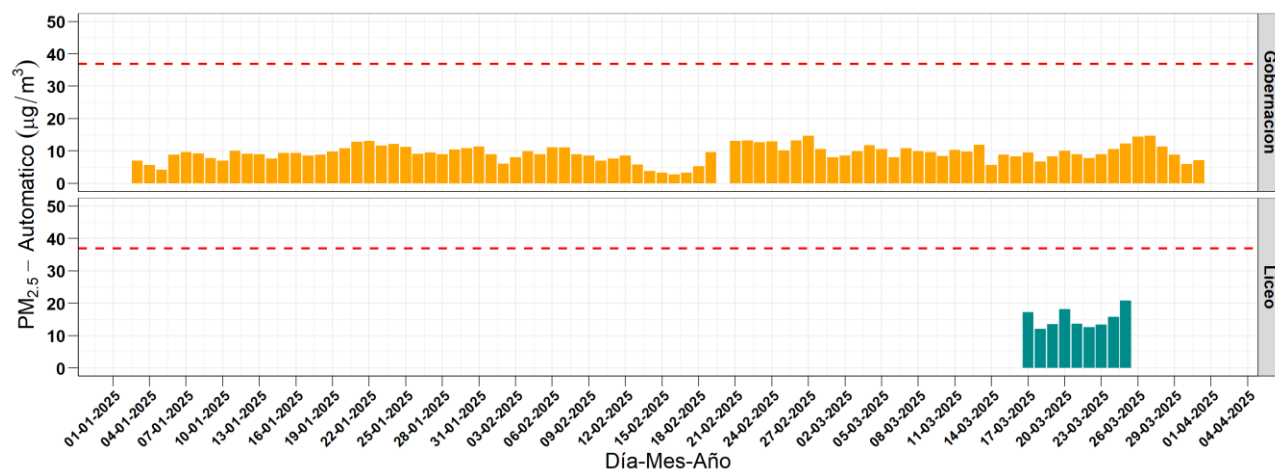
Adicionalmente, la Figura 9 presenta la evolución promedio horaria y por día de la semana de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Automáticas en las estaciones Gobernación y Liceo. Se evidencia como los máximos de concentración horaria se presentan en las horas de alto flujo vehicular de la 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 $20 \mu g/m^3$ para PM_{10} y $15 \mu g/m^3$ 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 $950 W/m^2$ 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.



(a)



(b)

Figura 8. Evolución temporal de concentraciones diarias de los equipos PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Automáticos durante enero a marzo de 2025: (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: $75 \mu g/m^3$ (PM_{10}) y $37 \mu g/m^3$ ($PM_{2.5}$)

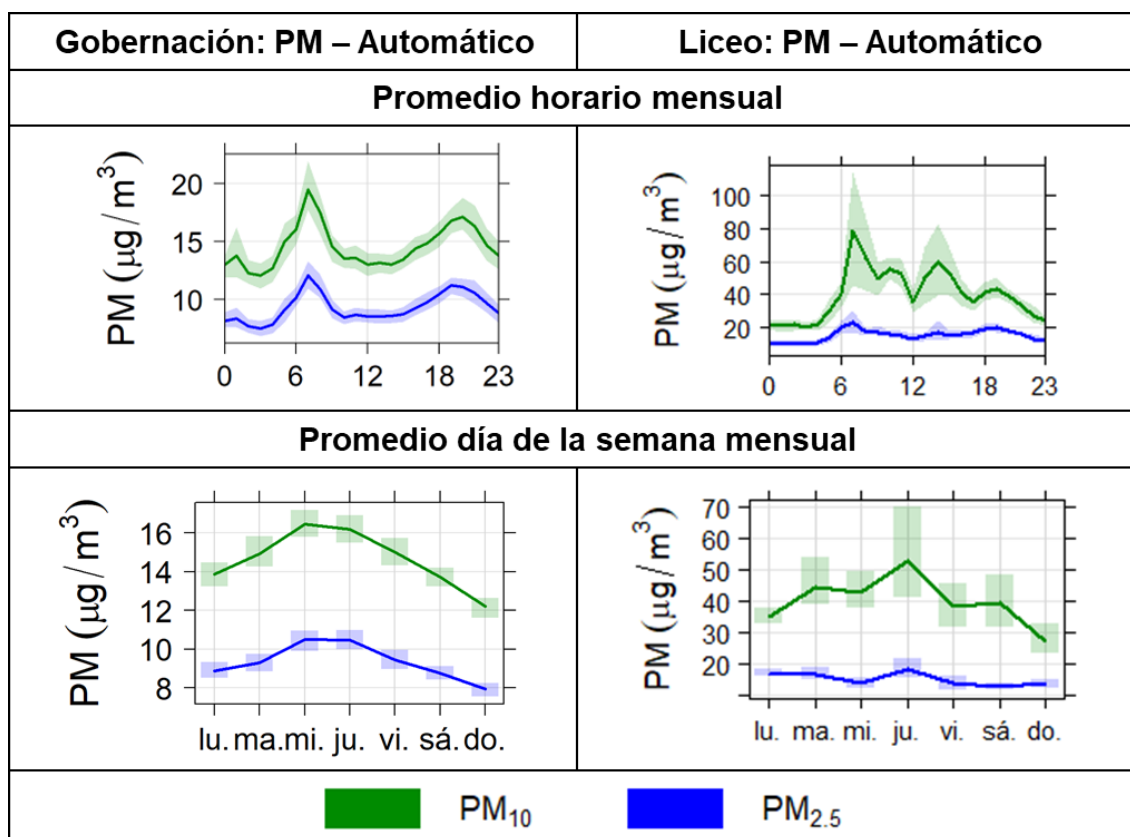


Figura 9. Promedio horario y semanal de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Automáticos durante el enero a marzo de 2025. Gobernación (izquierda) y Liceo (derecha)
La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%

3.4. Índice de calidad del aire (ICA) para PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el SVCA de Manizales

Las Figura 10 y a la Figura 11 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 PM_{10} – Manual, se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena en las cinco estaciones de monitoreo para todos los días analizados.

Por otro lado, las concentraciones de PM_{10} – 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 10% y 90% de los días con ICA en estado moderado en la estación Gobernación y Liceo respectivamente.

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.

	Buena	Moderada	Dañina para la salud de grupos sensibles	Dañina para la salud	Muy dañina para la salud	Peligrosa
Rango PM ₁₀ (µg/m ³)	0 - 54	55 - 154	155 - 254	255 - 354	355 - 424	425 - 504
Rango PM _{2.5} (µg/m ³)	0-12	13-37	38-55	56-150	151-250	251-500

Liceo PM₁₀ – Manual

enero-2025	febrero-2025	marzo-2025
28 29 30 31 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 s d l m m j v	25 26 27 28 29 30 31 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 1 2 3 4 5 6 7 s d l m m j v	22 23 24 25 26 27 28 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 1 2 3 4 s d l m m j v

Palogrande PM₁₀ – Manual

enero-2025	febrero-2025	marzo-2025
28 29 30 31 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 s d l m m j v	25 26 27 28 29 30 31 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 1 2 3 4 5 6 7 s d l m m j v	22 23 24 25 26 27 28 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 1 2 3 4 s d l m m j v

UCM PM₁₀ – Manual

enero-2025	febrero-2025	marzo-2025
28 29 30 31 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 s d l m m j v	25 26 27 28 29 30 31 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 1 2 3 4 5 6 7 s d l m m j v	22 23 24 25 26 27 28 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 1 2 3 4 s d l m m j v

Milán PM₁₀ – Manual

NubiaPM₁₀ – Manual

febrero-2025	marzo-2025	febrero-2025	marzo-2025
25 26 27 28 29 30 31 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 s d l m m j v	22 23 24 25 26 27 28 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 1 2 3 4 s d l m m j v	25 26 27 28 29 30 31 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 1 2 3 4 5 6 7 s d l m m j v	22 23 24 25 26 27 28 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 1 2 3 4 s d l m m j v

Figura 10. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ – Manual en las estaciones: Liceo, Palogrande, Católica, Milán y Nubia del SVCA de Manizales durante enero a marzo de 2025
Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

	Buena	Moderada	Dañina para la salud de grupos sensibles	Dañina para la salud	Muy dañina para la salud	Peligrosa
Rango PM ₁₀ (µg/m ³)	0 - 54	55 - 154	155 - 254	255 - 354	355 - 424	425 - 504
Rango PM _{2.5} (µg/m ³)	0-12	13-37	38-55	56-150	151-250	251-500

Gobernación PM₁₀ – Automático

enero-2025							febrero-2025							marzo-2025						
31	31	31	31	1	2	3	31	31	31	31	31	31	31	28	28	28	28	28	28	28
4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
11	12	13	14	15	16	17	8	9	10	11	12	13	14	8	9	10	11	12	13	14
18	19	20	21	22	23	24	15	16	17	18	19	20	21	15	16	17	18	19	20	21
25	26	27	28	29	30	31	22	23	24	25	26	27	28	22	23	24	25	26	27	28
31	31	31	31	31	31	31	28	28	28	28	28	28	28	29	30	31	31	31	31	31
s	d	l	m	m	j	v	s	d	l	m	m	j	v	s	d	l	m	m	j	v

Liceo PM₁₀ – Automático

marzo-2025						
28	28	28	28	28	28	28
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	31	31	31	31
s	d	l	m	m	j	v

Gobernación PM_{2.5} – Automático

enero-2025							febrero-2025							marzo-2025						
31	31	31	31	1	2	3	31	31	31	31	31	31	31	28	28	28	28	28	28	28
4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
11	12	13	14	15	16	17	8	9	10	11	12	13	14	8	9	10	11	12	13	14
18	19	20	21	22	23	24	15	16	17	18	19	20	21	15	16	17	18	19	20	21
25	26	27	28	29	30	31	22	23	24	25	26	27	28	22	23	24	25	26	27	28
31	31	31	31	31	31	31	28	28	28	28	28	28	28	29	30	31	31	31	31	31
s	d	l	m	m	j	v	s	d	l	m	m	j	v	s	d	l	m	m	j	v

Liceo PM_{2.5} – Automático

marzo-2025						
28	28	28	28	28	28	28
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31	31	31	31	31
s	d	l	m	m	j	v

Figura 11. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀, PM_{2.5} – Automático en las estaciones: Gobernación y Liceo durante enero a marzo de 2025

Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

4. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS

4.1. Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz

Durante el primer trimestre de 2025 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 5 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 78% de los reportes presentaron predominancia de vientos hacia el suroccidente y un 22% hacia el noroccidente y/o occidente, ubicación de Manizales, 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 5. 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 en la estación Gobernación (SGC, 2025)

Fecha (dd-mm)	Altura de la columna (m)	Predominancia del viento *	PM ₁₀ – Automático (µg/m ³)
01-01	2100	Suroccidente	13.6
19-01	1600	Suroccidente	16.4
20-01	1400	Suroccidente	17.5
09-02	1500	Suroccidente	13.4
10-02	1500	Suroccidente	10.8
13-02	2300	Suroccidente	13.4
20-02	1800	Noroccidente	--
11-03	1800	Noroccidente y Suroccidente	13.8
25-03	1900	Suroccidente	15.6

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

**-- Ausencia de datos

5. 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), 2025, 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://concejodemanizales.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>