

SIMAC

SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO AMBIENTAL DE CALDAS



BOLETÍN CALIDAD DEL AIRE MANIZALES ENERO – MARZO 2022



*Angel David Gálvez Serna, *Erika Marcela Trejos Zapata,
*Carlos Mario González Duque, **Mauricio Velasco García

Estación PM₁₀ – Manual Palogrande

Terraza Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales - Bloque H



*Instituto de Estudios Ambientales, 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	5
3. RESULTADOS DE MONITOREO PARA PM ₁₀ Y PM _{2.5}	9
3.1. Equipos manuales: Análisis de promedios diarios y mensuales	9
3.2. Equipos manuales: Comparación preliminar 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. RESULTADOS DE MONITOREO PARA GASES	19
4.1. Monitoreo de monóxido de carbono (CO)	19
4.2. Monitoreo de dióxido de azufre (SO ₂)	22
4.3. Monitoreo de ozono troposférico (O ₃)	24
4.4. Índices de calidad del aire (ICA) para O ₃ , SO ₂ y CO en el SVCA de Manizales	27
5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS	29
5.1. Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz	29
6. REFERENCIAS	30

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

En la actualidad, la contaminación atmosférica corresponde al cuarto factor de riesgo para la salud humana, después de fumar, la hipertensión y la diabetes (Our World in data, 2020). 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 son: (1) Partículas suspendidas totales (PST), (2) Partículas con diámetro menor o igual a 10 micrómetros (PM_{10}) y (3) 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 controlar aquellas zonas donde se superen las normas de calidad del aire. Además, es un insumo para establecer medidas de prevención donde la calidad del aire sea catalogada como perjudicial 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 del IDEAM - SISAIRE. 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 2022 en la ciudad de Manizales se cuenta 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 $PM_{2.5}$ 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 permite la obtención de registros promedio diario de la concentración en aire ambiente de dichos contaminantes (muestras de 24 horas cada tres días). Por otra parte, tanto los equipos automáticos de PM_{10} y $PM_{2.5}$, como el seguimiento de gases (O_3 , SO_2 y CO) permiten la obtención de registros cinco minútales, 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 para comparar los límites máximos permisibles definidos en la normativa colombiana: *Resolución 2254 de 2017* (MADS, 2017).

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).

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 óptima operación	Estado actual	Latitud / Longitud	Altitud msnm
Gobernación (Gov)	CU, SC – MTV, PAI	PM ₁₀ – Manual ^a	Corpocaldas	2009	Operación óptima.	N 5° 4' 6.53" W 75° 31' 1.54"	2155
		PM _{2.5} - Manual ^a	Corpocaldas	2009	Operación óptima.		
		SO ₂ - Automático	UN	2019	Operación óptima.		
		O ₃ - Automático	UN	2018	Operación óptima.		
		CO - Automático	Corpocaldas	2018	Operación óptima.		
		PM ₁₀ y PM _{2.5} - Automático ^b	Corpocaldas	2019	Operación óptima.		
Palogrande (Pal)	ZC, SR – BTV, SAI	PM ₁₀ - Manual ^c	UN	2009	Operación óptima.	N 5° 3' 22.4" W 75° 29' 31.3"	2154
Nubia (Nub)	ZSE, SR – 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, PAI	PM ₁₀ - Manual ^c	Corpocaldas	2010	Operación óptima.	N 5° 4' 5.01" W 75° 30' 37.58"	2156
		PM ₁₀ y PM _{2.5} - Automático ^b	Corpocaldas	2019	Operación óptima.		
Milán (Mil)	ZC, SR – AAI, MTV	PM ₁₀ - Manual ^c	Corpocaldas	2012	Operación óptima.	N 5° 2' 48.5" W 75° 28' 48.68"	2188
Católica (UCM)	CU, SC – ATV, SAI	PM ₁₀ - Manual ^c	Corpocaldas - UCM	2022 (mayo)	Operación óptima.	N 5° 3'34.13" W 75°29'13.63"	2038

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

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

AAI: Alta actividad industrial

MAI: Moderada actividad industrial

PAI: Pequeña actividad industrial

AZI: Adyacente a zona industrial

SAI: Sin actividad industrial.

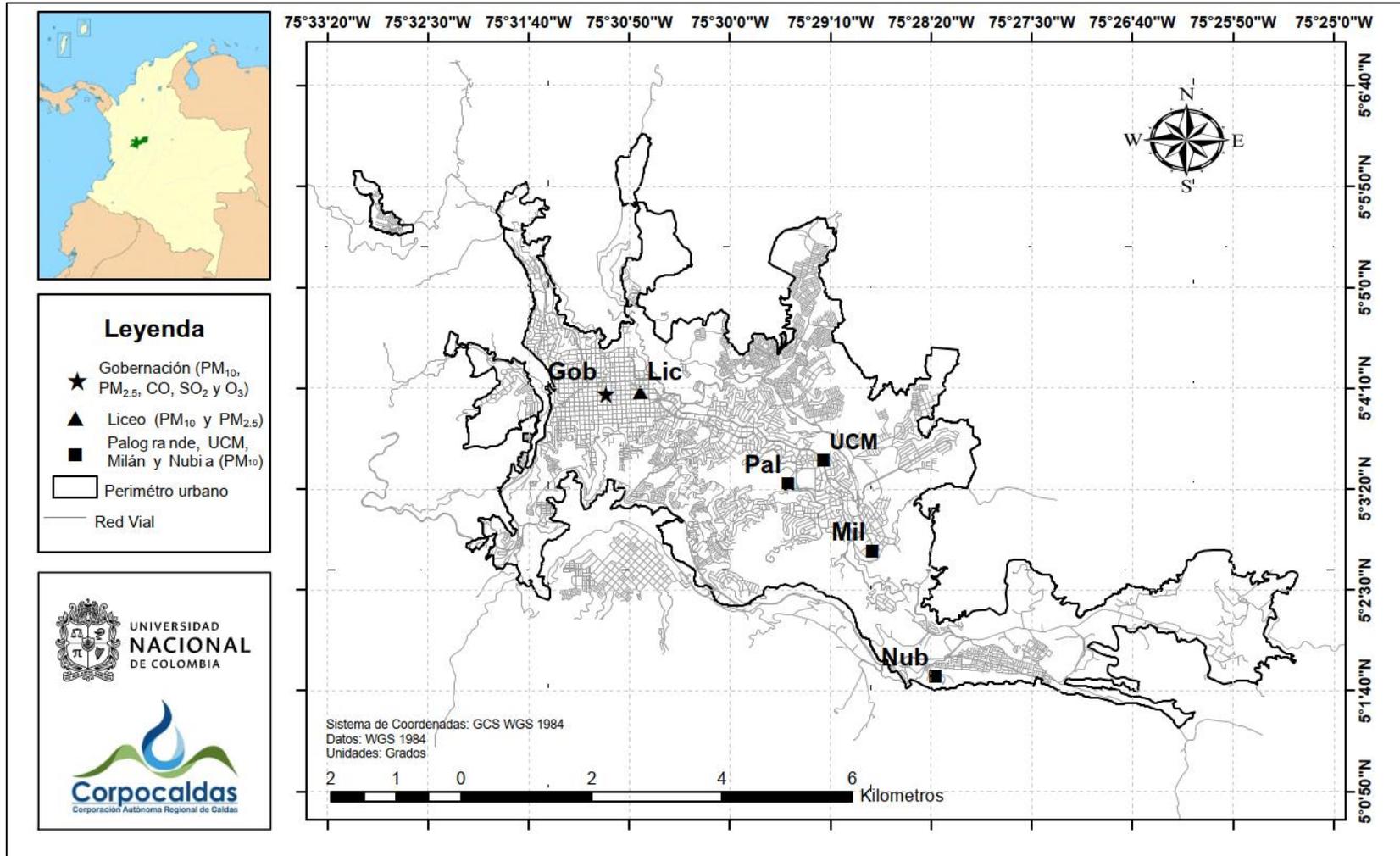


Figura 1. Mapa con ubicación de las estaciones de calidad del aire pertenecientes al SVCA de Manizales para el período de análisis

2. ANÁLISIS METEOROLÓGICO

Las condiciones climáticas juegan un papel importante en la dinámica de los contaminantes en el aire. Contaminantes secundarios como el ozono troposférico (O_3), dependen de las reacciones en presencia de radiación solar para formarse en el aire, a partir de contaminantes primarios (COV y NOx) emitidos directamente por fuentes antropogénicas y naturales. Por su parte, el aumento de la humedad relativa se asocia al aumento 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 de partículas (Loosmore y Cederwall, 2004).

En el mismo sentido, la precipitación hace un lavado de la atmósfera, arrastrando hacia el suelo el material particulado del aire, este fenómeno se conoce como *scavenging* (Akyüz y Cabuk, 2009). Finalmente, la velocidad del viento 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.

La Tabla 2 presenta los consolidados mensuales de las variables meteorológicas en las estaciones más próximas a las estaciones de calidad del aire para los meses de enero a marzo de 2022. Las estaciones meteorológicas corresponden a Gobernación de Caldas, Liceo, Posgrados, Milán planta Niza y La Nubia. Con la información obtenida en estas estaciones meteorológicas, se estiman las concentraciones a condiciones estándar ($25^{\circ}C$ y 1 atm) obtenidas por los equipos del SVCA de Manizales. De manera alternativa las Figura 2 y Figura 3 presentan el comportamiento promedio mensual de algunas variables meteorológicas de las estaciones mencionadas. Se aprecia que el comportamiento de las variables a lo largo de la ciudad es estable.

Durante el período de análisis, se observó un patrón característico en la ciudad, marcándose para enero – febrero el final de las temporadas de bajas precipitaciones y el comienzo de las temporadas de altas precipitaciones para marzo. Al comparar los valores de las estaciones se observa que Gobernación obtuvo el mayor registro con 282.8 mm durante el mes de enero, así como los menores registros durante febrero con un total de 64.4 mm de lluvia.

Para el caso de la temperatura ambiente, se observa un comportamiento homogéneo en la ciudad obteniéndose el mayor promedio mensual durante enero en Milán Planta Niza y un mínimo promedio mensual de 14.4 en Liceo y Posgrados durante febrero y marzo. Para la radiación solar se identifica un comportamiento inverso a la precipitación con promedio mensuales de hasta 296.2 W/m^2 en La Nubia 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 marzo con un valor de 88.7 % en la estación La Nubia.

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

Tabla 2. Estadísticos mensuales para las variables meteorológicas próximas a las estaciones de calidad del aire durante el período de análisis

Mes	Temperatura del Aire [°C]	Velocidad de Viento [m/s]	Dirección Viento [°]	Presión Atmosférica [hPa]	Humedad Relativa [%]	Precipitación Acumulada [mm]	Radiación Solar* [W/m ²]	Max. Rad. solar [W/m ²]
Gobernación de Caldas								
Enero	16.8	0.08	261.0	567.9	85.5	257.6	203.4	1166
Febrero	16.8	0.09	265.9	567.5	85.0	64.4	241.3	1025
Marzo	16.6	0.08	260.3	567.8	87.3	282.8	269.3	1158
Liceo								
Enero	16.6	0.36	289.9	589.5	76.9	215.6	255.2	1120
Febrero	16.5	0.41	311.0	589.3	74.5	105.2	248.6	1140
Marzo	16.4	0.26	228.6	589.4	78.7	265.8	237.3	1240
Posgrados								
Enero	16.5	0.24	332.2	594.4	84.3	105.2	265.9	1120
Febrero	16.4	0.23	339.1	594.1	84.4	93.8	245.6	1302
Marzo	16.4	0.19	338.0	594.3	86.5	200.4	244.1	1280
Milán planta Niza								
Enero	17.5	0.10	314.9	584.1	76.3	124.4	257.6	1234
Febrero	17.3	0.07	320.9	583.8	75.9	189.6	248.0	1040
Marzo	17.2	0.03	301.4	584.2	75.1	248.6	233.7	1103
La Nubia								
Enero	17.3	0.86	237.8	596.6	86.3	109.8	296.2	998
Febrero	17.1	0.90	199.3	596.3	86.4	105.0	284.3	991
Marzo	17.2	0.63	231.2	596.3	88.7	167.2	257.4	997

* Correspondiente al promedio comprendido entre las 6 am y 5 pm (período de luz solar).

** NA: Ausencia de datos por fallas en el equipo.

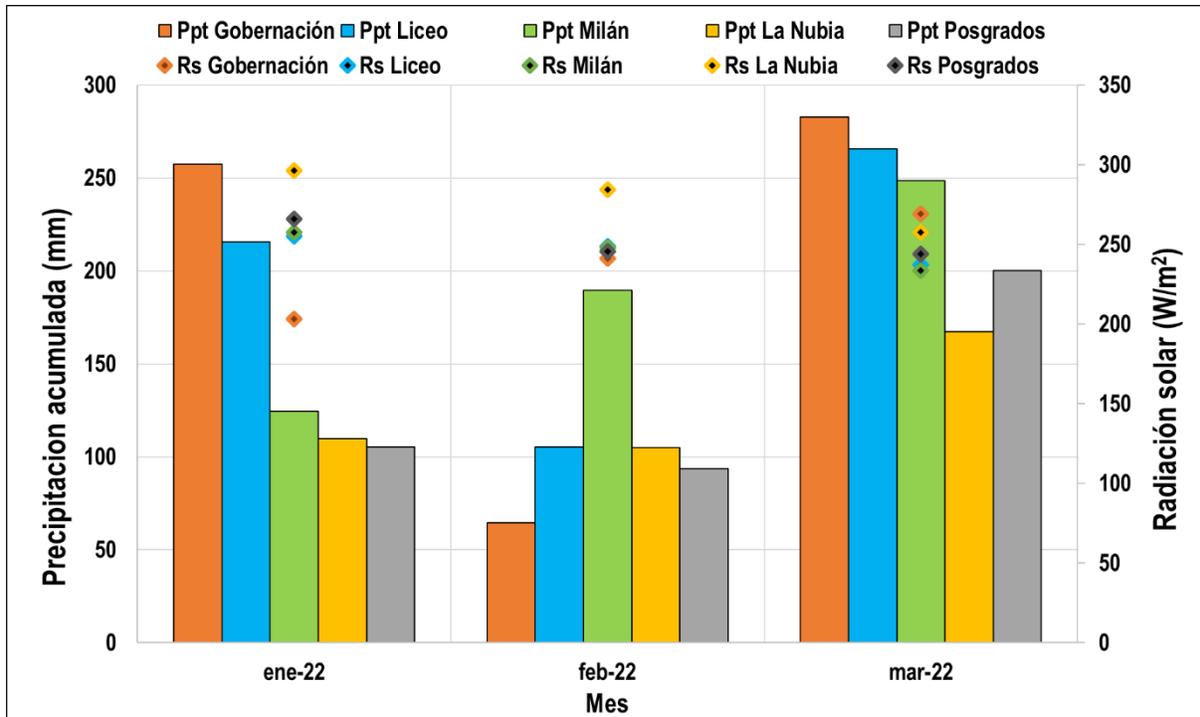


Figura 2. Promedios mensuales de precipitación acumulada (Ppt) y radiación solar (Rs) durante el período de análisis

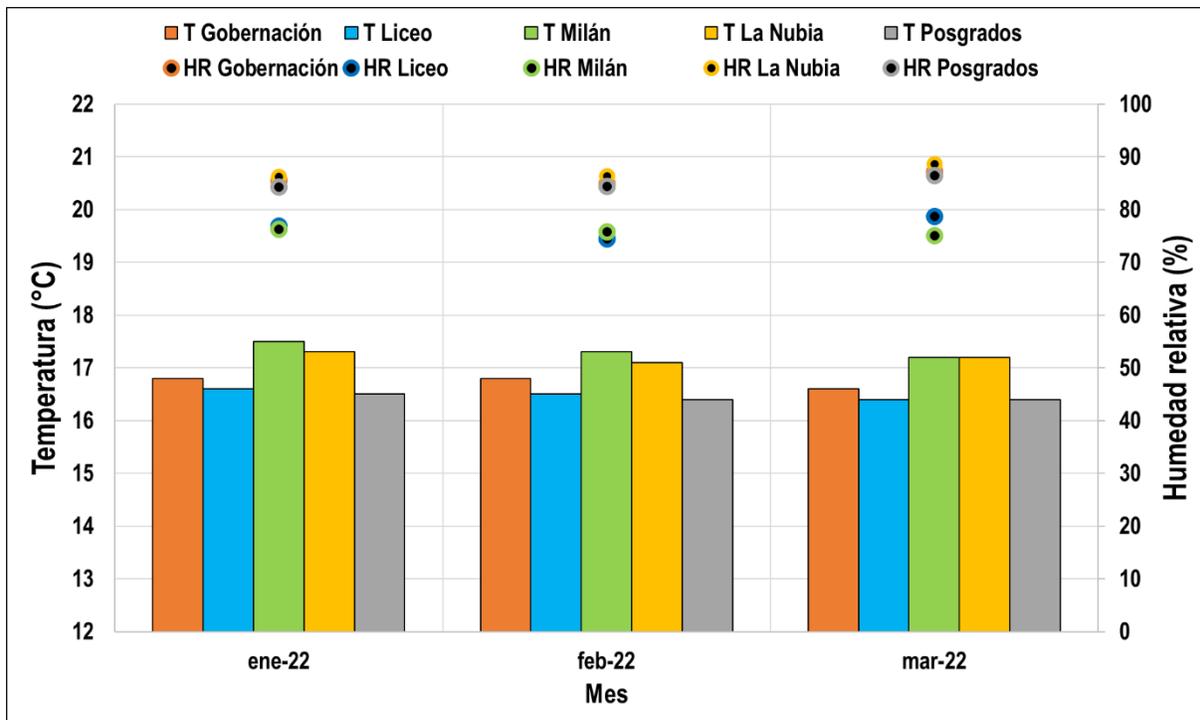


Figura 3. Promedios mensuales de temperatura del aire (T) y humedad relativa (HR) durante el período de análisis

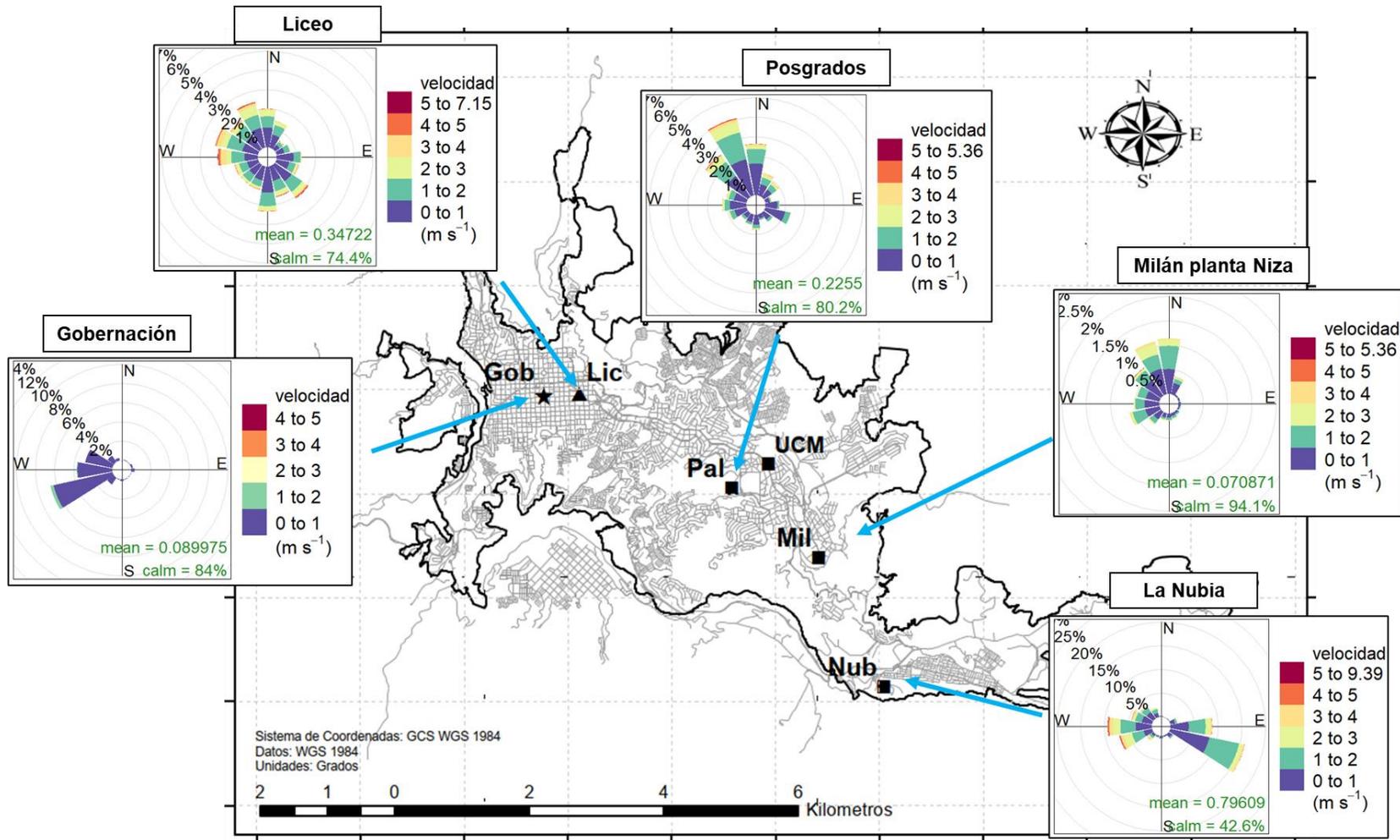


Figura 4. Rosas de viento en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante el período de análisis

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 obtenidas durante lo corrido del 2022 (enero - marzo). Se muestra 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, durante el año 2022, las estaciones de Milán y Liceo registraron las concentraciones promedio más altas de PM₁₀ en la ciudad con valores de $35 \pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $27 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente; seguidos por Gobernación con $24 \pm 1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Católica con $21 \pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$; por último, Palogrande y Nubia con $19 \pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se destaca que este patrón en los niveles de concentración se ha mantenido constante de acuerdo con los registros del SVCA en los años 2019 al 2021, los cuales registraron los valores más altos de PM₁₀ en Milán y Liceo con promedios mensuales por encima de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y los menores registros fueron obtenidos en Nubia y Palogrande con promedios alrededor de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cabe resaltar que el 90% de los meses monitoreados en las estaciones cumplieron con el porcentaje de datos válidos del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial establecido en 75%, perdiéndose pocas o ninguna muestra durante los meses del presente año, indicando la relevancia por número de datos en los resultados (MAVDT, 2010).

Se identificó que Milán presentó los mayores niveles de concentración de PM₁₀ con el mayor promedio aritmético mensual reportado en marzo de $38 \pm 0.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), con un máximo diario de $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el pasado martes 29 de marzo, un registro atípico sin explicación atribuible clara. 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 su menor registro mensual durante agosto con un valor de $17 \pm 0.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

De manera general, se ha identificado que las estaciones Milán, Liceo y en menor medida Gobernación y Católica, se encuentran influenciadas por tráfico vehicular (representado por un flujo importante de buses y camiones de carga principalmente en Liceo y Milán respectivamente). De acuerdo con la actualización del inventario de emisiones de la ciudad año base 2017, estas categorías poseen especial importancia ya que, a pesar de que su flota corresponde al 3.2% del total de vehículos de la ciudad, estos vehículos emplean diésel como combustible y son responsables del 56% (351.2 ton/año) y 24% (151.9 ton/año) del total de emisiones de PM₁₀ respectivamente (Unal - Corpocaldas, 2019). De otra parte, las áreas de influencia de las estaciones Nubia y Palogrande se encuentran dominadas por las moderadas dinámicas de movilidad relacionadas a la presencialidad en los campus universitarios; así como el efecto de las zonas verdes de los campus.

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

Estadístico*	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	19	24	30	24
Mediana	20	23	31	25
Incertidumbre**	1.1	1.2	0.9	1.1
Desviación Estándar	4	6	5	5
Mínimo	12	17	16	12
Máximo	23	35	39	39
Percentil 95%	22	33	38	38
N° Datos - %DV***	9 - 80	9 - 100	10 - 100	28 - 93
Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	24	29	29	27
Mediana	25	27	32	28
Incertidumbre	0.89	0.89	0.98	0.9
Desviación Estándar	5	8	6	6
Mínimo	14	16	18	14
Máximo	30	41	38	41
Percentil 95%	30	40	37	40
N° Datos - %DV	10 - 90	9 - 100	7 - 70	26 - 86
Palogrande PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	18	18	22	19
Mediana	20	19	22	20
Incertidumbre	0.84	0.94	0.94	0.9
Desviación Estándar	3	6	5	5
Mínimo	12	11	12	11
Máximo	21	27	29	29
Percentil 95%	21	26	28	28
N° Datos - %DV	11 - 100	9 - 100	10 - 100	30 - 100
Espacio en blanco				

Estadístico*	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Milán PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	32	35	38	35
Mediana	32	34	36	34
Incertidumbre	1.01	0.94	0.95	1.0
Desviación Estándar	3	5	6	5
Mínimo	25	27	24	24
Máximo	37	43	63	63
Percentil 95%	36	42	55	55
N° Datos - %DV	9 - 80	8 - 90	9 - 90	26 - 86
Nubia PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	17	18	21	19
Mediana	17	17	20	18
Incertidumbre	0.98	1.1	0.94	1.0
Desviación Estándar	3	4	4	4
Mínimo	12	12	13	12
Máximo	21	28	35	35
Percentil 95%	21	26	31	31
N° Datos - %DV	7 - 63	9 - 100	10 - 100	26 - 86
Católica PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	18	22	22	21
Mediana	20	22	23	22
Incertidumbre	0.98	0.97	1.03	1.0
Desviación Estándar	3	4	4	4
Mínimo	12	17	12	12
Máximo	23	29	29	29
Percentil 95%	22	28	27	28
N° Datos - %DV	11 - 100	9 - 100	10 - 100	30 - 100
Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar)				
Promedio	12	17	18	16
Mediana	13	15	17	15
Incertidumbre	1.12	1.03	1.15	1.1
Desviación Estándar	3	4	4	4
Mínimo b	6	10	11	6
Máximo	17	25	25	25
Percentil 95%	16	23	24	24
N° Datos - %DV	11 - 100	9 - 100	10 - 100	30 - 100

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

** Fuentes de incertidumbre están relacionadas principalmente con los 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 durante el día de monitoreo y para reportar las concentraciones de contaminantes a condiciones estándar

*** %DV = Porcentaje de datos validos

En lo referente al monitoreo de $PM_{2.5}$ de la estación Gobernación, se registró un valor promedio de $16 \pm 1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Se puede observar que marzo presentó el mayor nivel de concentraciones con un promedio mensual de $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras enero presentó el menor valor promedio con $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Al comparar los registros del 2022 con respecto al 2021 y 2020, no se observó un cambio significativo en los promedios mensuales con variaciones que no superan el 10%.

Adicionalmente, se presentan las figuras de evolución temporal de concentraciones diarias obtenidas para PM_{10} (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 (PM_{10} y $PM_{2.5}$) establecido en la Resolución 2254 de 2017 que establece $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ (MADS, 2017).

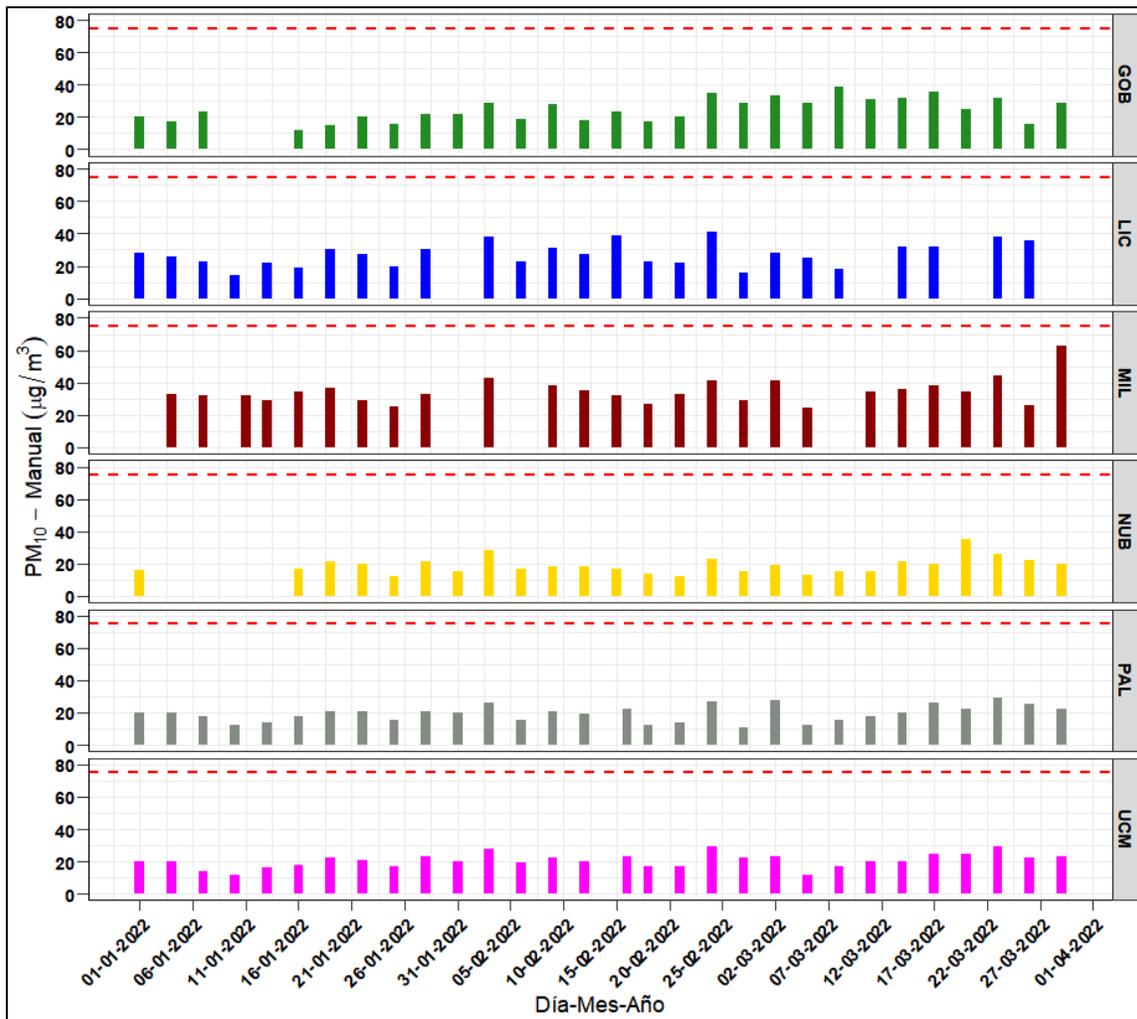


Figura 5. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM_{10} – Manuales durante el período de análisis

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

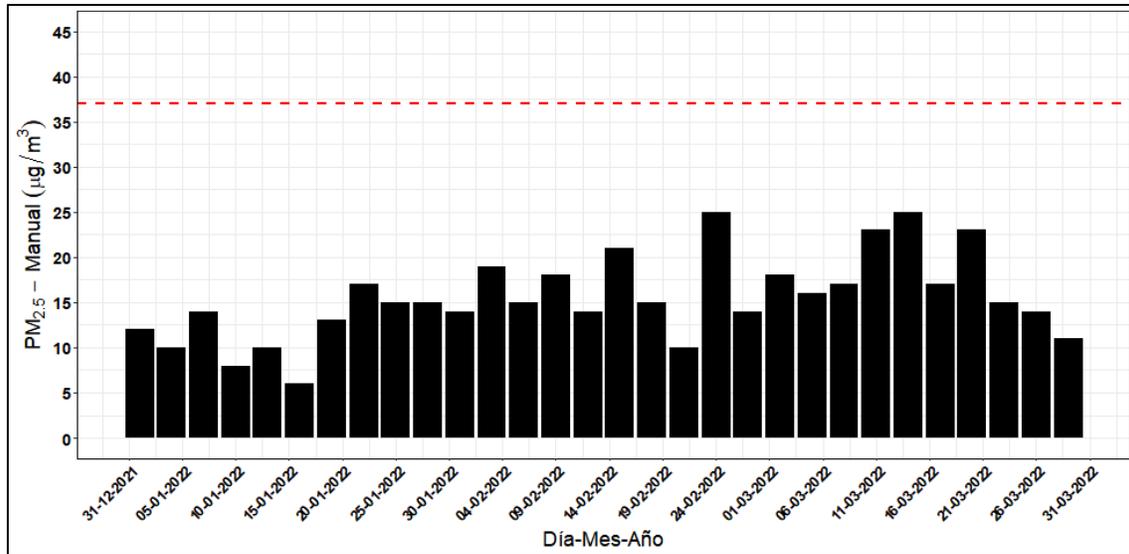


Figura 6. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM_{2.5} – Manual durante el período de análisis

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

La Figura 7 presenta la variación promedio de concentraciones de PM₁₀ 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 Liceo y Gobernación, debido a su ubicación próxima a una de las avenidas de alto tráfico en la ciudad. Para el caso de las estaciones ubicadas en campus universitarios, parecen existir actividades altas durante los miércoles y jueves, así como durante los fines de semana cuya influencia no permite una reducción significativa de concentración los domingos, muy probablemente debido a la actividad de los buses de transporte público durante estos días.

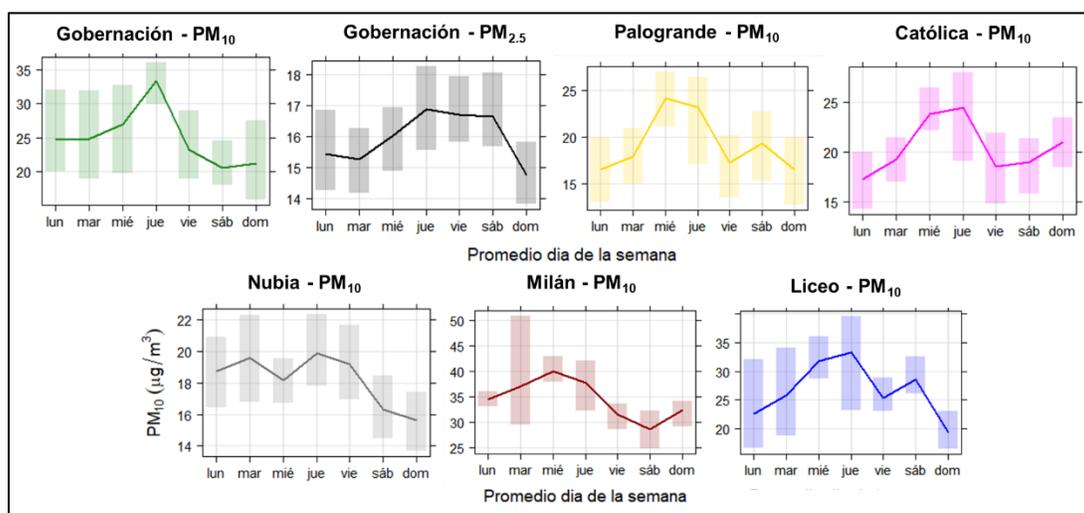


Figura 7. Variación promedio de concentraciones por días de la semana para PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales durante el período de análisis

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

3.2. Equipos manuales: Comparación preliminar 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 la normativa anual para el 2022 establecida en la Resolución 2254 de 2017 para PM_{10} ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y $PM_{2.5}$ ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Se observó que, de manera preliminar ninguna de las estaciones ha superado la normativa anual colombiana. Finalmente, es importante destacar que los promedios obtenidos en Manizales para PM_{10} y $PM_{2.5}$ en todas las estaciones, superaron las recomendaciones recientes en términos de promedio anual propuestas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ (OMS, 2022).

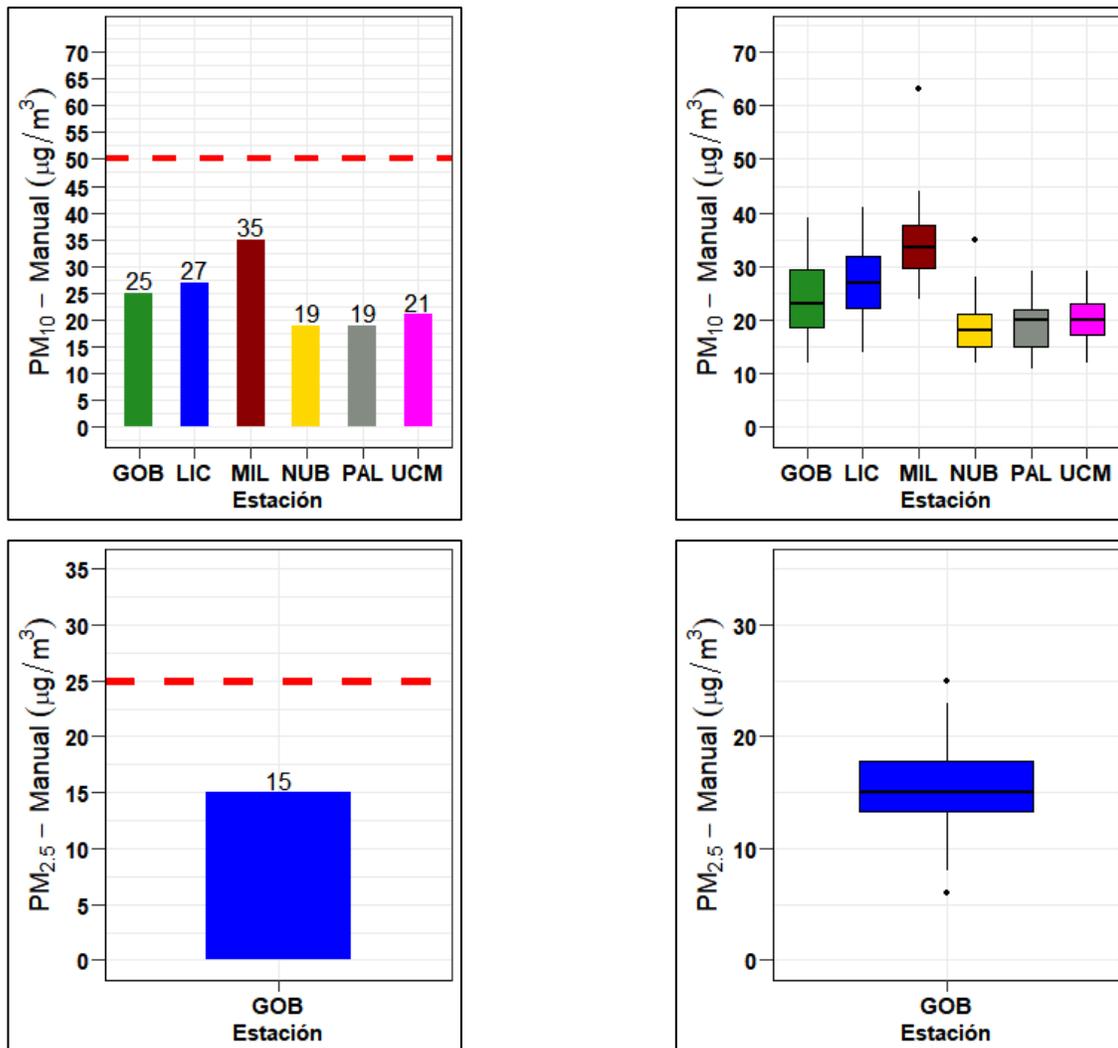


Figura 8. Concentración promedio (izquierda) y diagrama de cajas (derecha) de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Manuales durante el período de análisis

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

3.3. Equipos automáticos: Análisis de promedios diarios y mensuales

La Tabla 4 presenta los estadísticos descriptivos comparativos de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos en las estaciones Gobernación y Liceo durante lo corrido del 2022. Se observó que, las concentraciones promedio (medianas¹) de Gobernación para PM₁₀ y PM_{2.5} se encontraron alrededor de los 22.8 µg/m³ (desv. std = 5.2 µg/m³) y 15.3 µg/m³ (desv. std = 3.7 µg/m³) respectivamente. De otra parte, las concentraciones promedio medianas de Liceo para PM₁₀ y PM_{2.5} se encontraron alrededor de los 26.2 µg/m³ (desv. std = 6.5 µg/m³) y 16.6 µg/m³ (desv. std = 3.7 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 a los promedios mensuales, se puede observar que el patrón en los niveles de concentración es levemente similar a los obtenidos en los equipos manuales. Destacan los máximos de promedio diario obtenidos para PM₁₀ de 35.6 µg/m³ en Gobernación durante febrero y 47.4 µg/m³ en Liceo durante enero, ambos días con ausencia de precipitaciones. De forma similar sucedió para PM_{2.5} cuyos registros máximos diarios fueron de 25.2 µg/m³ en Gobernación y 25.8 µg/m³ en Liceo, ambos registros concuerdan con PM₁₀.

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

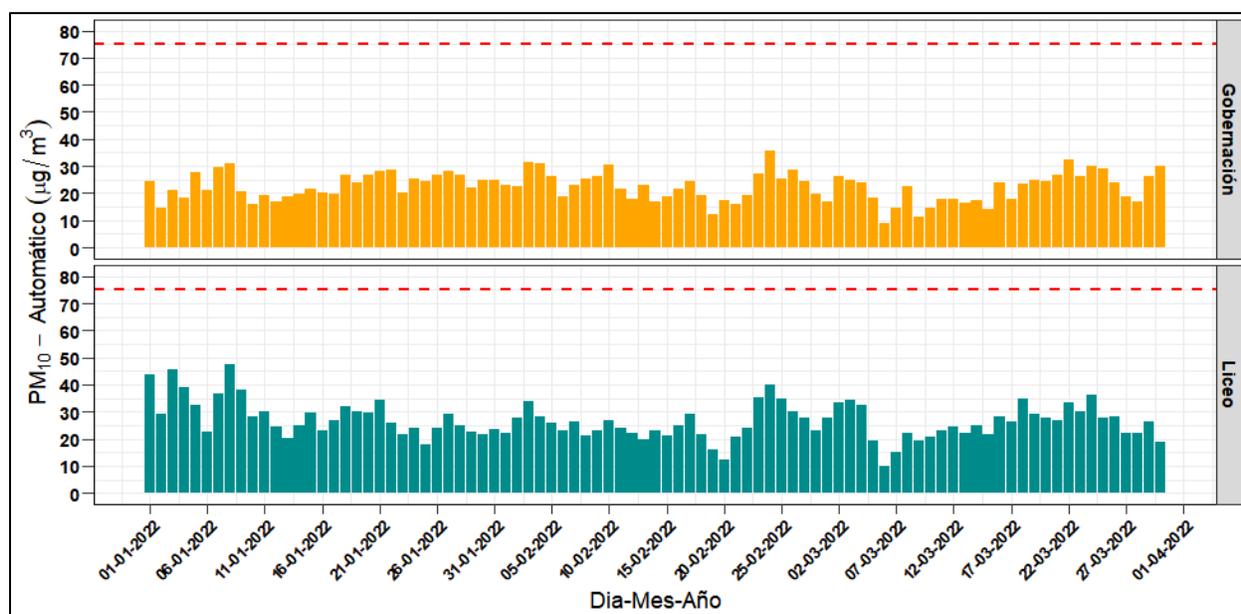
Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Mediana	23.1	23.2	21.3	22.5
Mediana	22.9	22.9	22.6	22.8
Desv. Est.	4.3	5.4	5.8	5.2
Min.	14.5	12.3	8.8	8.8
Max.	30.8	35.6	32.3	35.6
Percentil 95	29.2	31.4	29.9	31.4
N° Datos	31	28	31	90
Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	29.4	25.3	25.4	26.7
Mediana	28.7	23.8	26.2	26.2
Desv. Est.	7.5	5.8	6.1	6.5
Min.	18	12.4	10.2	10.2
Max.	47.4	40.1	36.4	47.4
Percentil 95	44.8	35.2	34.5	44.8
N° Datos	31	28	31	90

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar)				
Promedio	15.9	16.4	14.9	15.7
Mediana	15.9	15.8	14.2	15.3
Desv. Est.	3.2	3.9	3.9	3.7
Min.	9.7	9.1	5.7	5.7
Max.	21.9	25.2	22.2	25.2
Percentil 95	20.1	23.7	21.1	23.7
N° Datos	31	28	31	90
Liceo PM_{2.5} (µg/m³ estándar)				
Promedio	16.6	17.4	16.2	16.7
Mediana	17.2	16.8	15.7	16.6
Desv. Est.	3.2	3.8	4.1	3.7
Min.	10.2	8.5	6	6.0
Max.	22.3	25.8	24.3	25.8
Percentil 95	21.5	24	22.9	24.0
N° Datos	31	28	31	90

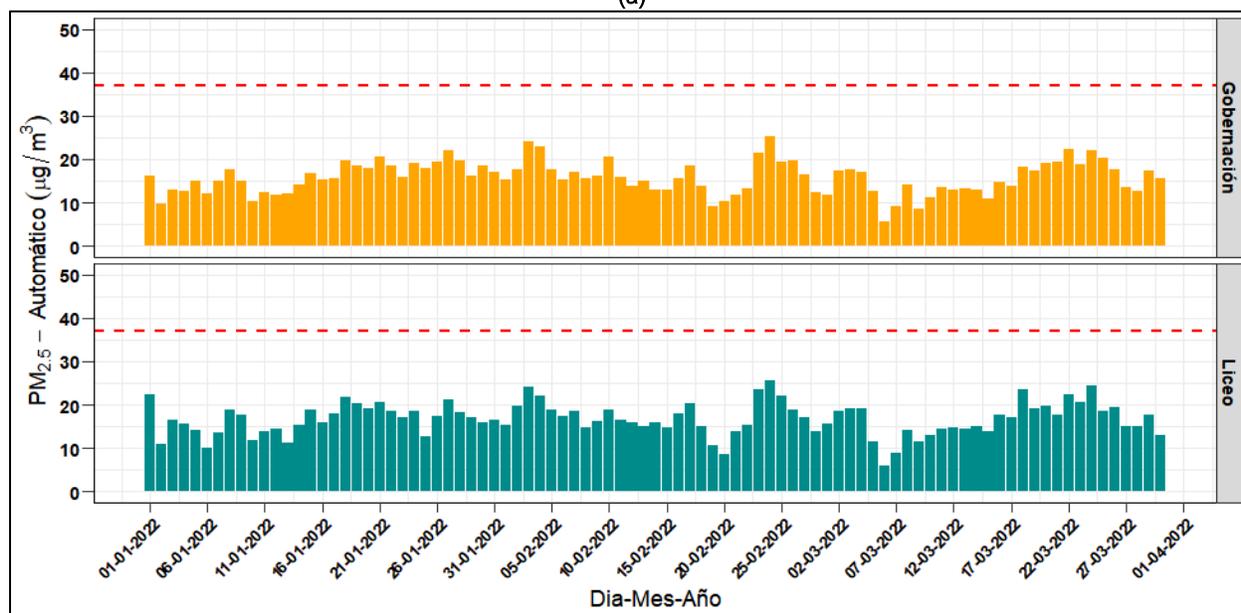
¹ Debido a que la serie de datos no posee una distribución normal, se deciden utilizar pruebas estadísticas no paramétricas que permitan evidenciar los cambios en las concentraciones, sin incluir el sesgo estadístico de los datos.

* Estadísticos estimados a partir de datos promedio diarios del equipo.

La Figura 9 presenta el comportamiento temporal de las concentraciones de los equipos PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos (promedio diario) durante el período de análisis en las estaciones Gobernación y Liceo. Se puede observar allí un comportamiento estable en los registros, indicando la baja variabilidad de las fuentes en el área de influencia de las estaciones.



(a)



(b)

Figura 9. Evolución temporal de concentraciones diarias de los equipos PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos durante el año 2022: (a) PM₁₀ (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 µg/m³ (PM₁₀) y 37 µg/m³ (PM_{2.5})

Finalmente, se presenta la Figura 10 con la evolución promedio horaria y por día de la semana de las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticas en las estaciones Gobernación y Liceo. Se identifica que 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).

Estos máximos de concentración horaria en ambas estaciones registraron valores superiores a los 30 µg/m³ para PM₁₀ y 20 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 1300 W/m² entre las 11 am y 1 pm, ganan flotabilidad y ascienden en la atmósfera. Este comportamiento es favorecido además por el aumento en la altura de la capa límite planetaria, dando lugar a una mayor dispersión de los contaminantes emitidos (Cuesta y colaboradores, 2020).

Adicionalmente, se presenta el 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 30% respecto al promedio semanal para ambas estaciones y para ambos contaminantes. Se destaca que, para el caso de los sábados, no se presenta una reducción significativa en los valores promedio diarios comparados con el promedio semanal, indicando que este día se comporta como un día laboral en la ciudad.

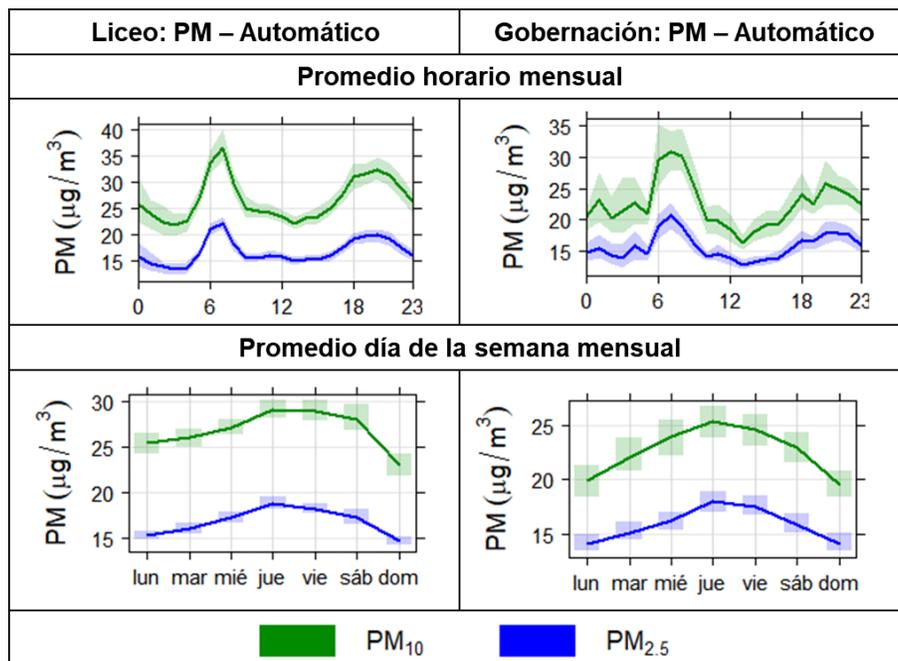


Figura 10. Promedio horario y semanal de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos durante el período de análisis, Liceo (izquierda) y Gobernación (derecha)

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

La Figura 11, ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. y ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. presentan los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de PM – Manuales. De forma similar, la Figura 12 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de PM – 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, registrándose únicamente un día (29/03/2022) con calidad del aire en estado Moderado en la estación Milán, estación caracterizada por su clasificación industrial y contar además con tráfico vehicular pesado. Para el caso de $PM_{2.5}$ – Manual en la estación Gobernación, un 77% de los días analizados presentaron ICA en estado moderado, un porcentaje mayor hasta en 10 unidades con respecto a años anteriores, indicando un leve aumento en la actividad de las fuentes, por lo que se recomienda poner especial atención en el control de fuentes de emisión vehiculares en la ciudad.

Por otro lado, con base en la concentración de PM_{10} - Automático, se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena en todos los días en ambas estaciones – Gobernación y Liceo. Para el caso de $PM_{2.5}$ – Automático, en ambas estaciones se tuvo un porcentaje entre 73 y 83% de los días con ICA en estado moderado, siendo más evidente este efecto constante a lo largo del año, comprobando un aumento en las fuentes de emisión en las áreas de influencia del sector centro de la ciudad.

Se destacan, algunos registros que pudieron ser influenciados por la alta actividad del volcán Nevado del Ruiz principalmente durante febrero y marzo, mes que registró altas emisiones con columnas de gases superiores a los 1800 m de altura desde la boca del volcán y direcciones de viento predominantes en dirección al centro urbano (ver sección 5.1)

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

Gobernación PM₁₀ – Manual



Católica PM₁₀ – Manual



Liceo PM₁₀ – Manual



Milán PM₁₀ – Manual



Palogrande PM₁₀ – Manual



Nubia PM₁₀ – Manual



Gobernación PM_{2.5} – Manual



Figura 11. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ y PM_{2.5} – Manual en las estaciones del SVCA de Manizales durante el período de análisis

Cálculo según lineamientos de la resolución 2254 de 2017 del MADS

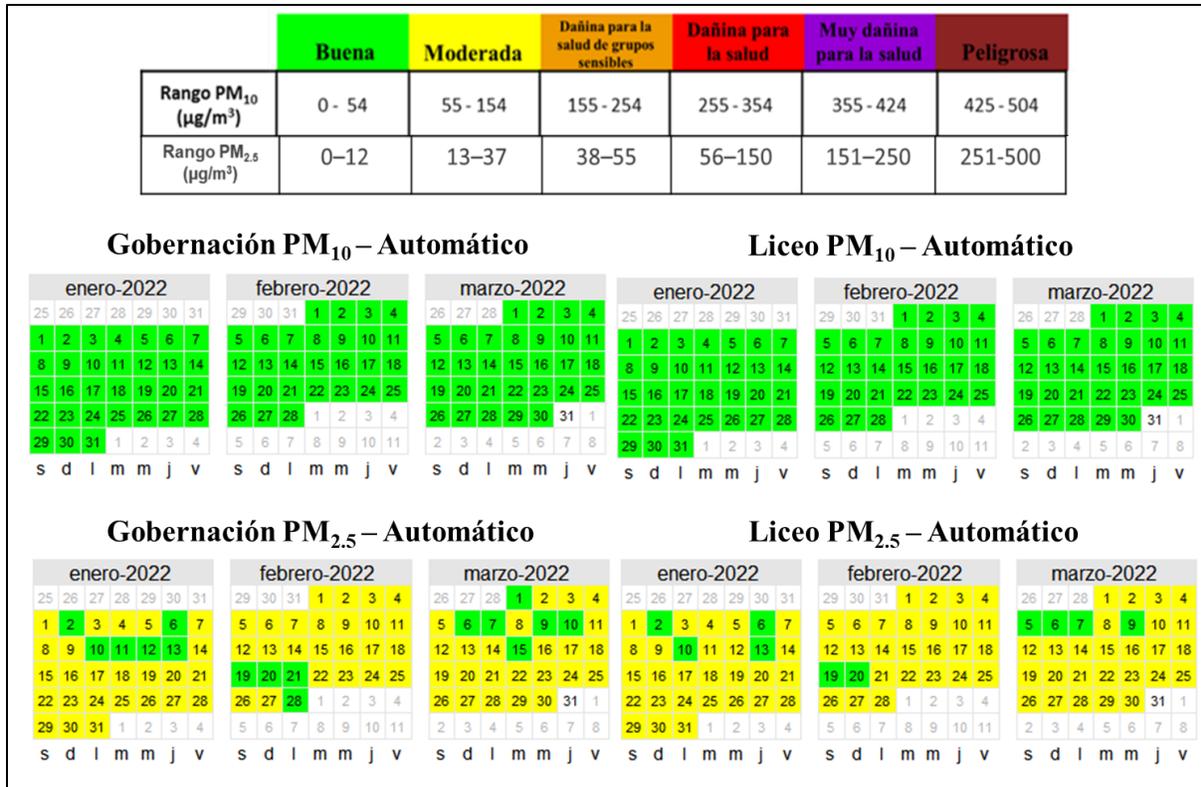


Figura 12. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ y PM_{2.5} – Automático en las estaciones: Gobernación y Liceo durante el período de análisis
Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

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, durante el año 2022 las concentraciones promedio medianas² se encontraron alrededor de 867.4 µg/m³ (desv. std = 451.5 µg/m³). Al comparar los registros de la mediana del 2022 con respecto al año 2021 (717.3 µg/m³), se observó un aumento del 21 %. Debido a que el CO es mayoritariamente dominado por la combustión de gasolina proveniente de motocicletas y vehículos particulares, categorías vehiculares que aportan cerca del 41% (11599.7 ton/año) y 38% (10653 ton/año) respectivamente a la emisión de este contaminante (Unal – Corpocaldas, 2020; Unal - Corpocaldas, 2019). Los presentes resultados sugieren un aumento en la actividad de los patrones de emisión provenientes de estas fuentes de emisión.

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 destaca que los datos presentan sesgo estadístico hacia la derecha y la mediana tiende a ser 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 enero presentó el mayor registro con un valor para de $1021.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, indicando un posible aumento en la presencia de vehículos particulares en inmediaciones de la estación. Para el caso del mínimo promedio registrado, este se presentó el 09 marzo con un valor de $246.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sin un evento particular que lo explique.

De manera complementaria, la Figura 13 presenta la evolución de concentraciones octohorarias de CO durante el periodo de análisis. 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 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 14 presenta la variación promedio horario, 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 6 pm, con promedios horarios entre $1400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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).

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

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Promedio	1021.9	935.5	958.9	974.3
Mediana	918.6	827.5	821.3	867.4
Incertidumbre**	1.26	1.26	1.26	1.26
Desv. Est.	401.7	442.1	494.3	451.5
Min.	464.6	272.6	246.1	246.1
Max.	2870.9	3162.6	2983.9	3162.6
Percentil 95	1913.0	1764.5	1995.3	1918.9
N° Datos	682	613	720	2063

* 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.

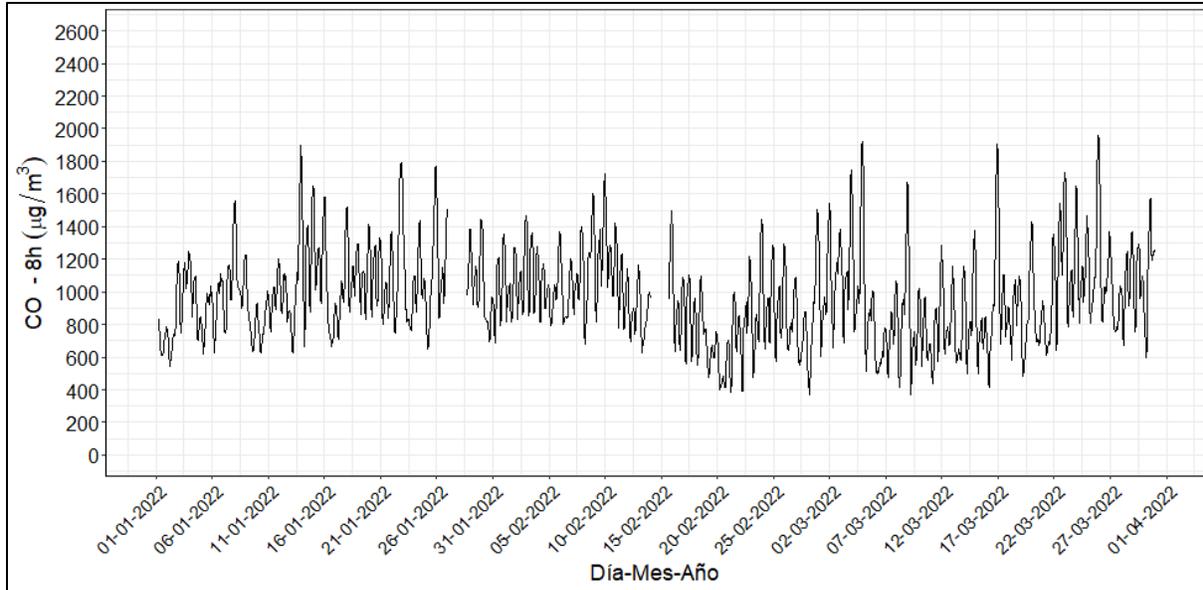


Figura 13 Evolución temporal de concentraciones promedio octohoraria de CO durante el período de análisis

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

Para el caso de la hora pico del medio día se registran concentraciones alrededor de los 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valor relacionado directamente con las dinámicas que se presentan en la atmósfera de la ciudad. Debido a la presencia de radiación solar se incrementa la temperatura de las masas de aire y aumenta la flotabilidad de estas. Consecuentemente se genera la elevación de la capa límite planetaria generando una mayor dispersión de los contaminantes en la atmósfera, además de la intensificación de los procesos de reacción química que generan contaminantes secundarios como el ozono troposférico (O_3) (Cuesta y otros, 2020).

Al comparar el promedio entre los días de semana, se observa un patrón estable con valores promedio alrededor de los 1100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y una concentración mínima los domingos (día con la menor actividad económica de la ciudad) con un valor promedio cercano a los 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta disminución cercana al 27% en comparación con el promedio semanal, indica la representatividad del aporte de las fuentes de emisión móviles en las concentraciones de CO observadas.

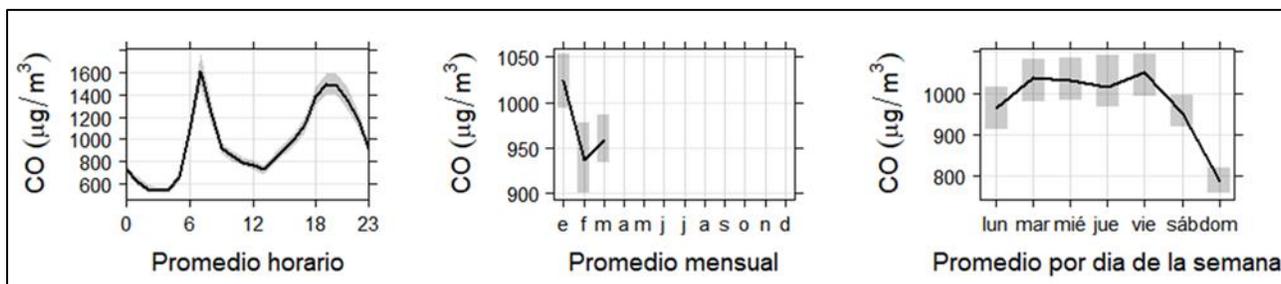


Figura 14. Variación promedio de CO horario (izquierda), mensual (centro) y por día de la semana (derecha) durante el período de análisis

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 comparativos para SO₂ durante el período de análisis. Se observa que, durante primer trimestre del año 2022, las concentraciones promedio medianas³ se encontraron alrededor de 5.8 µg/m³ (desv. std = 2.3 µg/m³), con un máximo valor registrado de 22.1 µg/m³ obtenido el 28 de marzo, valor sin explicación atribuible a pesar de algunos reportes de actividad volcánica durante este mes (ver sección 5.1). Al comparar el registro de la mediana en mención con respecto al año 2021 (7.7 µg/m³), se observó una disminución del (-)25%, indicando un posible cambio en los patrones de conducción vehículos a gasolina en inmediaciones de la estación. Estas fuentes móviles en ruta han sido identificadas como fuentes de aporte de este contaminante en la ciudad y que similarmente al CO, se ha identificado su relación con las fuentes primarias de emisión en la estación Gobernación (Unal – Corpocaldas, 2020; Unal - Corpocaldas, 2019).

Se destaca que los datos presentan sesgo estadístico hacia la derecha y la mediana tiende a ser menor que los promedios, indicando la variabilidad de las concentraciones de este contaminante en la ciudad. Con respecto a los promedios mensuales, se puede observar que durante enero se presentó el mayor registro con un valor promedio de 7.2 µg/m³, mes con alta influencia de emisiones del volcán Nevado del Ruiz, donde se registraron emisiones de la columna de gases con alturas superiores a los 1500 m (SGC, 2020).

Tabla 6. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de SO₂ (µg/m³) durante el período de análisis

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Promedio	7.2	6.0	5.4	6.2
Mediana	6.6	5.5	4.8	5.8
Incertidumbre**	1.57	1.57	1.57	1.57
Desv. Est.	1.9	2.3	2.3	2.3
Min.	4.3	2.4	2.4	2.4
Max.	15.7	16.4	22.1	22.1
Percentil 95	11.2	10.9	9.4	10.6
N° Datos	682	613	720	2063

* 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.

*** Numero de datos no validos (<30% del mes)

De manera complementaria, la Figura 15 presenta la evolución de concentraciones horarias de SO₂ durante el período de análisis. El promedio aritmético es estimado a partir de los datos cinco minútales del equipo según lo estipulado por el “Manual de operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire” del MADVT

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.

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

Adicionalmente, la Figura 16 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 $9.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Asimismo, se observan mínimos alrededor de los $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 viernes con un valor medio alrededor de los $6.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y mínimos promedio los domingos alrededor de los $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

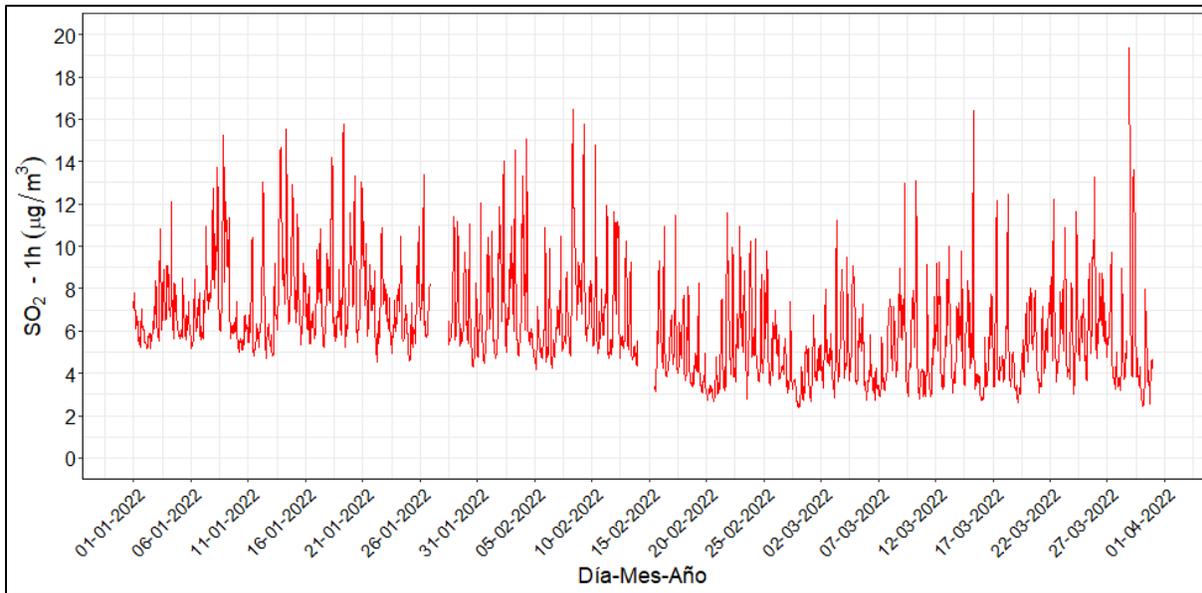


Figura 15. Evolución temporal de concentraciones promedio horario de SO_2 durante el período de análisis

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

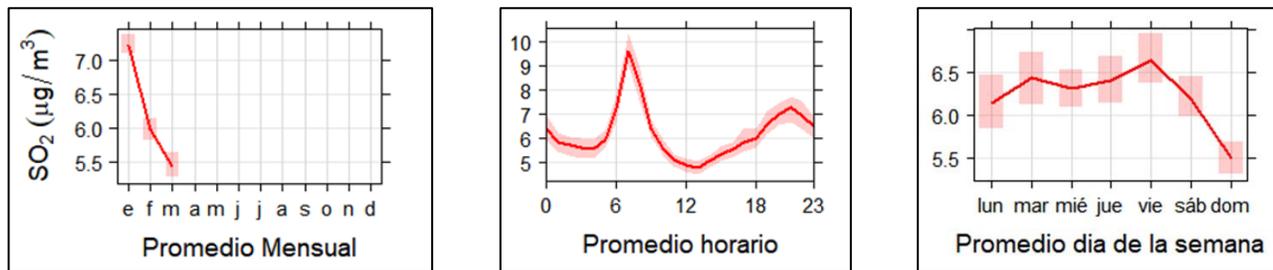


Figura 16. Variación promedio de SO_2 horario, mensual y por día de la semana durante el período de análisis

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). Se destaca que los datos presentan sesgo estadístico hacia la derecha y la mediana tiende a ser menor que los promedios, indicando la variabilidad de las concentraciones de este contaminante en la ciudad. Con respecto a los promedios mensuales, se puede observar que, inversamente al CO, durante enero se presentó el menor registro con un valor de mediana de 23.2 µg/m³ y durante febrero se registró el mayor promedio mensual con un valor de mediana de 25.7 µg/m³.

Durante el primer trimestre del año 2022, las concentraciones promedio medianas⁴ se encontraron alrededor de 24.6 µg/m³ para el día completo, 40.0 µg/m³ para la jornada diurna y 17.2 µg/m³ para la jornada nocturna. Al comparar los registros de la mediana diaria del primer trimestre del 2022 con respecto al año 2021 (10.0 µg/m³), se observó un aumento del 146%, indicando un posible aumento en la emisión de precursores de O₃, un comportamiento relacionado directamente con la presencia de vehículos diésel en inmediaciones de la estación que generan contaminantes como los óxidos de nitrógeno NO_x.

De manera complementaria, la Figura 17 presenta la evolución de concentraciones octohorarias de O₃ durante el período de análisis. 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 permitidos por la normatividad vigente (100 µg/m³ para promedios de 8 horas).

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 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).

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.

Tabla 7. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de O₃ (µg/m³) durante el período de análisis y su comparativo entre periodos del día

Periodo	Estadísticos	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Diario (0:00 a 23:59)	Promedio	28.8	30.9	28.7	29.5
	Mediana	23.2	25.7	23.9	24.6
	Incertidumbre**	1.16	1.16	1.16	1.16
	Min.	2.0	1.5	1.5	1.5
	Max.	81.1	87.4	84.6	87.4
	Percentil 95	68.6	72.6	63.4	69.4
	N° Datos	682	613	720	2063
Diurno (6:00 a 17:59)	Promedio diurno	39.0	42.3	38.4	39.8
	Mediana diurna	38.1	42.6	38.6	40.0
	Desv. Est.	21.6	22.0	19.7	21.1
	Max.	81.1	87.4	84.6	87.4
	N° Datos	343	306	360	1033
Nocturno (18:00 a 5:59)	Promedio nocturno	18.4	19.5	18.9	19.1
	Mediana nocturna	16.6	56.8	16.1	17.2
	Desv. Est.	11.7	11.3	11.5	11.6
	Max.	66.7	56.8	57.7	66.7
	N° Datos	339	307	360	1030

* 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.

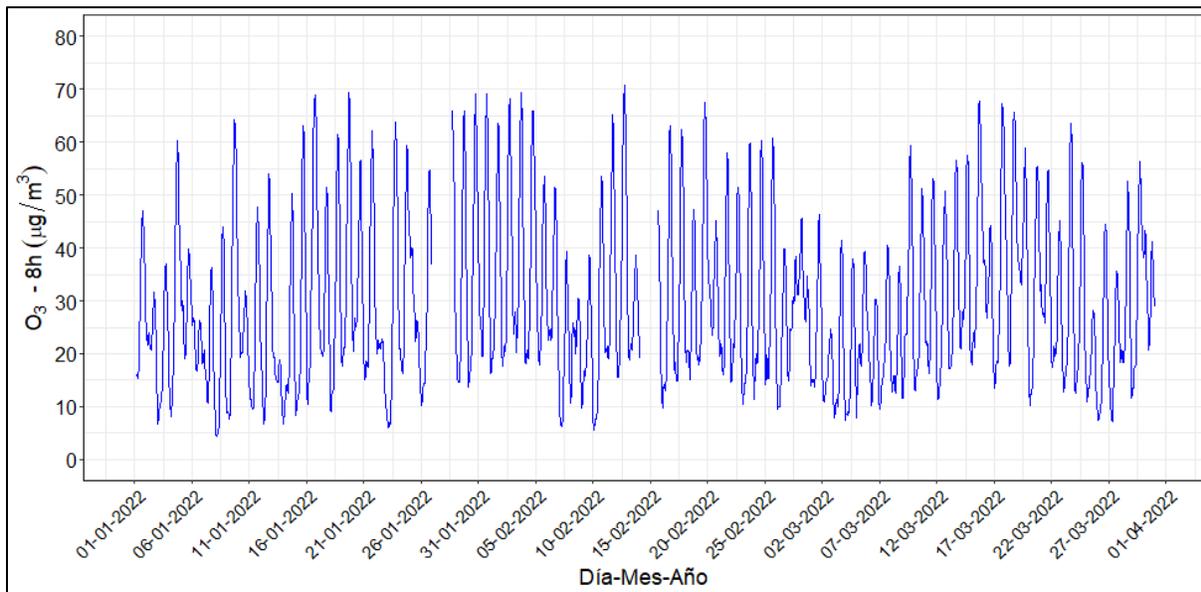
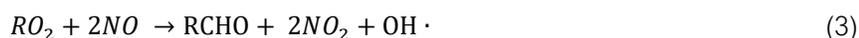


Figura 17. Evolución temporal de concentraciones promedio octohorario de O₃ durante el período de análisis

El nivel máximo permisible octohorario de la Res. 2254 de 2017 equivalente a 100 µg/m³ no fue superado

En este sentido, la disminución de emisiones de contaminantes primarios puede ser interpretada como una reducción de emisiones de precursores como los NO_x , debido al bajo tráfico vehicular. Este fenómeno altera las reacciones fotoquímicas induciendo una mayor generación de O_3 , debido a que los radicales ($\text{OH}\cdot$) tenderán hacia la reacción con COVs y favorecerán la producción neta de NO_2 (reacciones 1, 2 y 3).

Posteriormente, la fotólisis del NO_2 (reacción 4) favorecerá la generación de O_3 (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 O_3 durante la noche (reacción 7), generando así un remanente atmosférico de O_3 que puede aumentar los niveles de concentración para el día siguiente (Sengel y colaboradores, 2020).



Dónde: R representa una cadena de hidrocarburos (Ej. Etano (C_2H_6)) el grupo R representara la cadena C_2H_5); 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.

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 O_3 , por consiguiente, una reducción de las concentraciones observadas. En este sentido se podría sugerir que las concentraciones de O_3 en la ciudad de Manizales se encuentran dominadas por la presencia de COVs en la atmósfera (Li, 201; Sengel y otros, 2020).

La Figura 18 presenta el resumen de la variación de O_3 y radiación solar promedio horaria mensual y promedio día de la semana 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 cercana a los $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones diurnas son aproximadamente 2 veces más elevadas que en las noches, con una mediana diurna de $39.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una nocturna de $19.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para el período nocturno, se presenta un pico de ozono entre la 1:00 am y 3:00 am con valores cercanos a los $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 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 límite. Este fenómeno impide la libre dispersión de contaminantes en la atmósfera. De otra parte, se evidencia que los promedios obtenidos no presentan relación clara con los días de la semana.

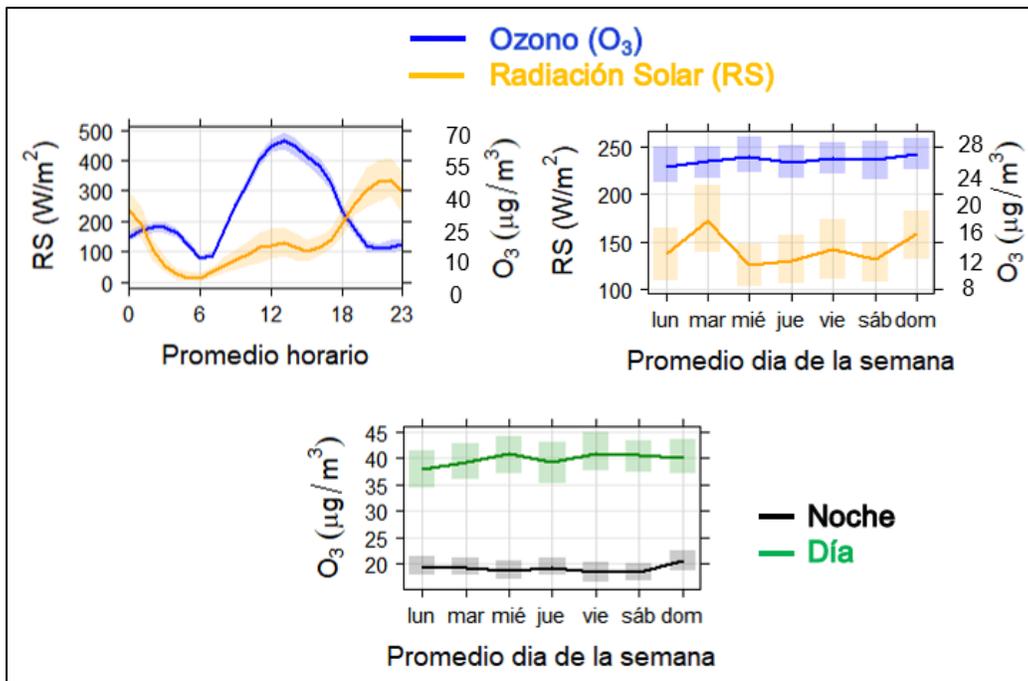


Figura 18. Variación promedio horaria y por día de la semana de O_3 – Radiación solar. Se incluye además el comportamiento promedio semanal entre las horas diurnas y nocturnas durante período de análisis

4.4. Índices de calidad del aire (ICA) para O_3 , SO_2 y CO en el SVCA de Manizales

La Figura 19 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de CO , SO_2 y O_3 . 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 durante todo el año 2022 para los contaminantes mencionados.

	Buena	Moderada	Dañina para la salud de grupos sensibles	Dañina para la salud	Muy dañina para la salud	Peligrosa
Rango CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0 – 5094	5095 – 10819	10820 – 14254	14255 – 17688	17689 – 34862	34863 – 57703
Rango O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0 – 106	107 – 138	139 – 167	168 – 207	208 – 393	>394
Rango SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0 - 93	94 – 197	198 – 486	487 – 797	798 – 1583	1583 – 2629

Estación Gobernación CO (Octohorario)



Estación Gobernación SO₂ (horario)



Estación Gobernación O₃ (Octohorario)



Figura 19. Índice de calidad del aire (ICA) para CO, SO₂ y O₃ en Manizales durante el período de análisis

Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS

5.1. Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz

Durante el año 2022 se realizó además 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 emisión asociadas a ceniza volcánica y SO₂ en la atmósfera por parte de esta fuente puntual natural. La Tabla 8 presenta un resumen con algunos de los días que tuvieron alturas significativas para la columna de gases (superiores a los 1400 metros). De estos días se destaca que el 50% de los reportes presentaron predominancia de vientos hacia el occidente y/o noroccidente, ubicación de Manizales, generando una posible afectación a la calidad del aire por esta fuente en la ciudad principalmente durante febrero y marzo.

El efecto de esta columna de gases fue notorio para algunas concentraciones de cada mes bajo condiciones que favorecen el transporte a meso escala de contaminantes, como sucedió por ejemplo el 03 de febrero, cuyos registros de concentraciones diarias de PM_{2.5} fueron de 24.1 µg/m³ y de SO₂ de 8.8 µg/m³ respectivamente.

Tabla 8. Resumen de emisiones volcánicas significativas (Altura de la columna de gases superiores a los 1400 m), posible afectación en concentraciones diarias de PM_{2.5} – Automático y SO₂ en la estación Gobernación (SGC, 2022)

Fecha (dd-mm)	Altura de la columna (m)	Predominancia del viento	PM _{2.5} – Automático (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)
3-ene	1781	Suroriente	13	7.4
8-ene	1650	Suroriente	17.7	9.3
17-ene	1523	Suroriente - Nororiente	15.5	7.7
24-ene	2196	Occidente - Suroccidente	19.1	6.9
26-ene	1800	Suroriente - Oriente	19.3	7.3
3-feb	2518	Suroriente - Occidente	24.1	8.8
8-feb	2426	Noroccidente	15.6	4.1
19-feb	2094	Oriente	9.1	4.1
23-feb	2916	Variable	21.3	6.3
3-mar	1870	Occidente - Noroccidente	17.5	5.6
13-mar	2226	Nororiente - Suroriente	13.3	5.8
17-mar	2000	Occidente - Noroccidente	13.9	5
26-mar	1490	Occidente - Noroccidente	17.7	6.3
31-mar	2000	Nororiente - Noroccidente	16.8	6.1

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.
- M. Akyüz y H. Cabuk, 2009. Meteorological variations of PM_{2.5}/PM₁₀ concentrations and particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Zonguldak. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 170, pp. 13-21.
- 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, 11 2019. [En línea]. Disponible en: <https://ourworldindata.org/indoor-air-pollution>. [Último acceso: 23/10/2020].
- Servicio geológico colombiano (SGC), 2022. 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>
- Unal – Corpocaldas, 2019b. Boletín CA Manizales año 2019. Disponible en: http://cdiac.manizales.unal.edu.co/inicio/publicaciones/Bolet%C3%ADn_CA_Manizales_a%C3%B1o_2020.pdf
- Unal – Corpocaldas, 2020. Boletín CA Manizales año 2020. Disponible en: https://cdiac.manizales.unal.edu.co/publicaciones/Boletin_calidad_aire_Manizales_a%C3%B1o_2019.pdf