

SIMAC

SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO AMBIENTAL DE CALDAS



BOLETÍN CALIDAD DEL AIRE MANIZALES PERIODO ENERO – MARZO 2021

*Angel David Gálvez Serna, *Carlos Mario
González Duque, *Felipe Cifuentes Castaño,
*Beatriz Helena Aristizábal Zuluaga,
**Mauricio Velasco García

***Instituto de Estudios Ambientales,
Universidad Nacional de Colombia Sede
Manizales**

****Subdirección de Evaluación y
Seguimiento Ambiental CORPOCALDAS**

RESUMEN

Se presentan en este informe los resultados del monitoreo de contaminantes atmosféricos realizado en Manizales durante el período de enero a marzo de 2021. Se realizó el seguimiento de material particulado (PM_{10} , $PM_{2.5}$) y los gases: Ozono troposférico (O_3), dióxido de azufre (SO_2) y monóxido de carbono (CO).

Se presentan las gráficas resumen obtenidas y tablas de estadísticos (promedio, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo y percentil 95). Finalmente, se presentan los resultados obtenidos para los índices de calidad del aire (ICA), así como otros análisis complementarios como los son los registros de calidad del aire por imágenes satelitales para emisiones volcánicas y algunos contaminantes en la región.

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).....	25
4.4. Índices de calidad del aire (ICA) para O ₃ , SO ₂ y CO en el SVCA de Manizales....	29
5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS	30
5.1. Equipos manuales: Análisis comparativo de promedios entre PM ₁₀ y PM _{2.5} en la estación Gobernación	30
5.2. Relación entre los equipos automáticos: Estación Gobernación.....	31
5.3. Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz	32
5.4. Imágenes satelitales	33
6. REFERENCIAS	37

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 ($PM_{2.5}$) o 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 2021 en la ciudad de Manizales se cuenta con un SVCA conformado por ocho (8) equipos para el monitoreo de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$: Cinco (5) 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; 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 registros 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, su posible área de influencia y su relación con algunos puntos de interés ambiental, así como la clasificación del suelo de acuerdo con el plan de ordenamiento territorial (POT) del 2018 de la ciudad.

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

Estación	Características y fuentes de contaminantes*	Equipos	Propietario	Año Instalación	Año de óptima operación – histórico	Estado actual	Latitud / Longitud	Altitud msnm
Gobernación	CU, SC – MTV, PAI	PM ₁₀ – Manual ^a	Corpocaldas	2009	2009	Operación óptima.	N 5° 4' 6.53" W 75° 31' 1.54"	2155
		PM _{2.5} - Manual ^a	Corpocaldas	2009	2009	Operación óptima.		
		SO ₂ - Automático	UN	2014	Desde el 2019 – problemas de estabilización previos.	Detenido por fallas entre el 01 de enero al 12 de febrero.		
		O ₃ - Automático	UN	2014	2014 – Sin datos entre los años 2016-2017 por fallas.	Operación óptima.		
		CO - Automático	Corpocaldas	2014	2014 – Múltiples fallas durante sus primeros años.	Operación óptima.		
		PM ₁₀ y PM _{2.5} - Automático ^b	Corpocaldas	2019	2019	Operación óptima.		
Palogrande	ZC, SR – ATV, SAI	PM ₁₀ - Manual ^c	UN	2009	2009	Operación óptima.	N 5° 3' 22.4" W 75° 29' 31.3"	2154
Nubia	ZSE, SR – BTV, AZI	PM ₁₀ - Manual ^c	UN	2009	2017 – En el SVCA	Operación óptima.	N 5° 1' 47.0" W 75° 28' 18"	2091
Liceo	CU, SC – ATV, PAI	PM ₁₀ - Manual ^c	Corpocaldas	2000	2010 – En el SVCA	Operación óptima.	N 5° 4' 5.01" W 75° 30' 37.58"	2156
		PM ₁₀ y PM _{2.5} - Automático ^b	Corpocaldas	2019	2019	Operación óptima.		
Milán	ZC, SR – MAI, MTV	PM ₁₀ - Manual ^c	Corpocaldas	2012	2012	Operación óptima.	N 5° 2' 48.5" W 75° 28' 48.68"	2188

a- Equipo de bajo volumen (Low-Vol)

b- Equipo automático de PM (Técnica nefelométrica)

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.

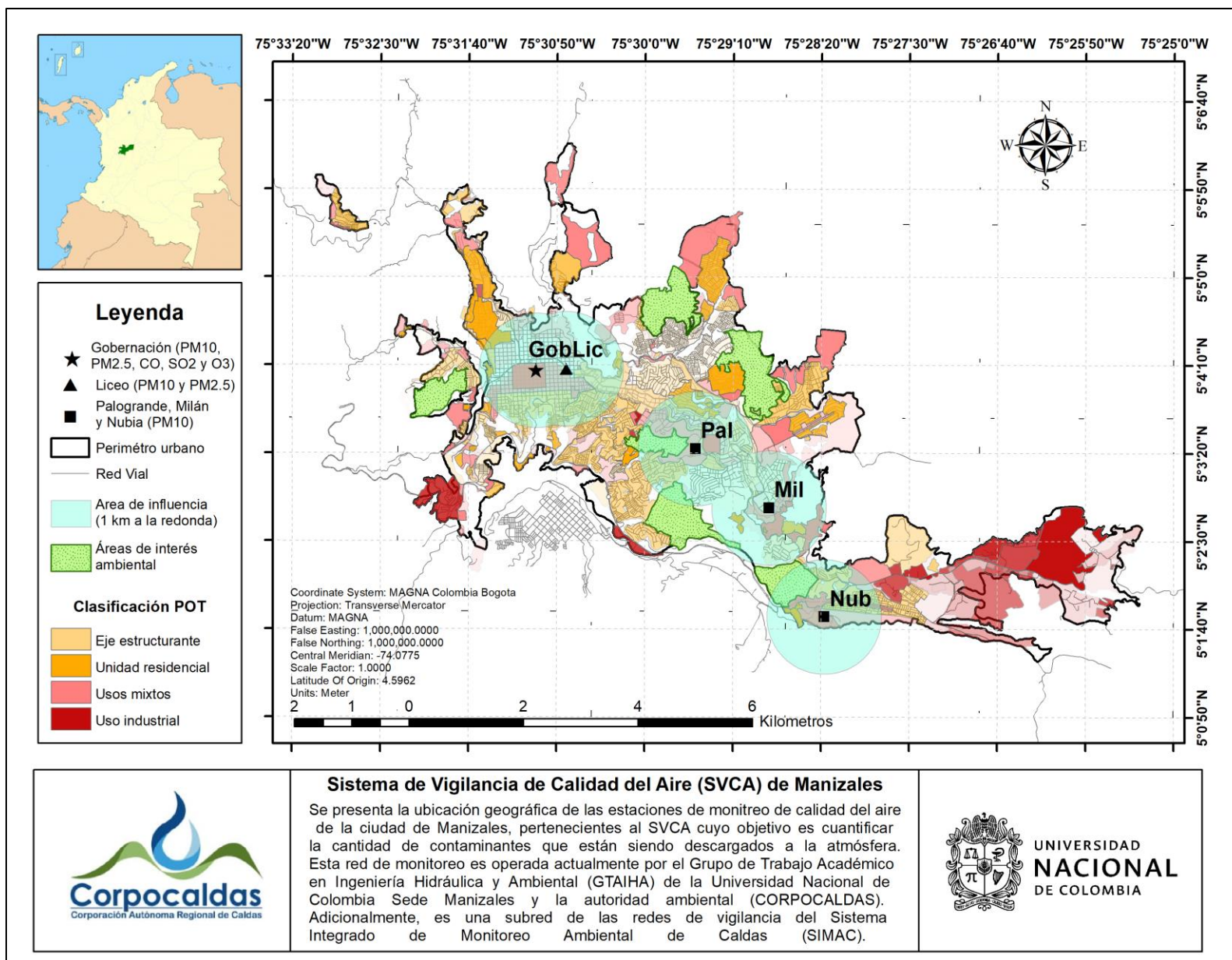


Figura 1. Mapa de Manizales con ubicación de las estaciones de calidad del aire

2. ANÁLISIS METEOROLÓGICO

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 del año 2021. Las estaciones meteorológicas corresponden a Gobernación de Caldas, Liceo, Posgrados, Milán planta Niza y Finca la Paz, esta última tomada debido a su punto de referencia espacial y por motivos de falla de la estación la Nubia. Con la información obtenida en estas estaciones meteorológicas, se estiman las concentraciones a condiciones estándar (25°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 primer trimestre del año 2021, se observó un patrón característico del régimen bimodal de lluvias y la posible influencia del fenómeno de La Niña en la ciudad, marcándose en enero el final de la temporada de bajas precipitaciones (59 mm en promedio) y en febrero una temporada de altas precipitaciones (227 mm en promedio). Al comparar los registros de las estaciones se observa que Liceo obtuvo el mayor registro con 287.4 mm para el mes de febrero y registró un total de precipitación acumulada trimestral de 610.2 mm, mientras que la estación con los menores registros correspondió a Finca La Paz con un valor de precipitación acumulada trimestral de 435.4 mm.

Para el caso de la temperatura ambiente y radiación solar, se observa un comportamiento inverso a las precipitaciones, obteniéndose los mayores registros durante el mes de enero con un valor promedio de 16.7 °C y 265.5 W/m² respectivamente, siendo Milán planta Niza la estación con los registros promedio más altos (18 °C y 330.4 W/m² respectivamente). 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 en el mes de marzo con un valor de 95.1 % en Finca La Paz, mes en el cual se obtuvo la mayor precipitación acumulada (216.8 mm) y la menor temperatura promedio mensual (12.9 °C).

Se destaca además que la ciudad cuenta con patrones de viento 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 periodo de análisis.

Las condiciones climáticas juegan un papel importante en la dinámica de los contaminantes en el aire. Existen contaminantes secundarios como el ozono troposférico (O₃), que 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. La humedad en el aire y la lluvia también tienen una influencia, especialmente en las concentraciones de material particulado.

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 partículas re-suspendidas (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 disminuirá.

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

Mes	Temperatura del Aire [°C]	Velocidad de Viento [m/s]	Dirección Viento [°]	Presión Atmosférica [mm Hg]	Humedad Relativa [%]	Precipitación Acumulada [mm]	Radiación Solar* [W/m ²]	Max. Rad. solar [W/m ²]
Gobernación de Caldas								
Enero	17.6	0.78	267.6	566.9	82.9	54.6	315.7	1183
Febrero	16.8	0.43	273.8	567.6	87.3	199.8	274.3	1293
Marzo	16.3	0.75	281.7	568.1	87.5	264.2	274.4	1397
Liceo								
Enero	16.9	0.55	261.8	588.6	76.2	75.0	183.3	925
Febrero	16.8	0.64	137.9	588.8	77.4	287.4	183.2	1051
Marzo	15.9	0.61	139.6	589.6	81.9	247.8	217.4	1183
Posgrados								
Enero	17.0	0.28	332.1	593.5	83.3	72.6	287.2	1086
Febrero	16.9	0.32	346.1	593.1	85.7	230.0	267.2	1129
Marzo	16.1	0.43	20.9	593.5	87.4	213.0	247.8	1213
Milán planta Niza								
Enero	18.0	0.14	331.1	583.2	78.9	55.4	330.4	1264
Febrero	17.7	0.11	341.5	583.5	77.7	243.8	307.7	1403
Marzo	16.7	0.09	327.6	584.4	77.8	225.6	271.8	1512
Finca La Paz (estación más próxima a La Nubia)								
Enero	13.7	0.12	101.6	559.8	90.3	38.0	210.9	1062
Febrero	13.7	0.09	124.3	561.2	92.7	180.6	185.2	1106
Marzo	12.9	0.07	114.1	561.4	95.1	216.8	157.8	1121

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

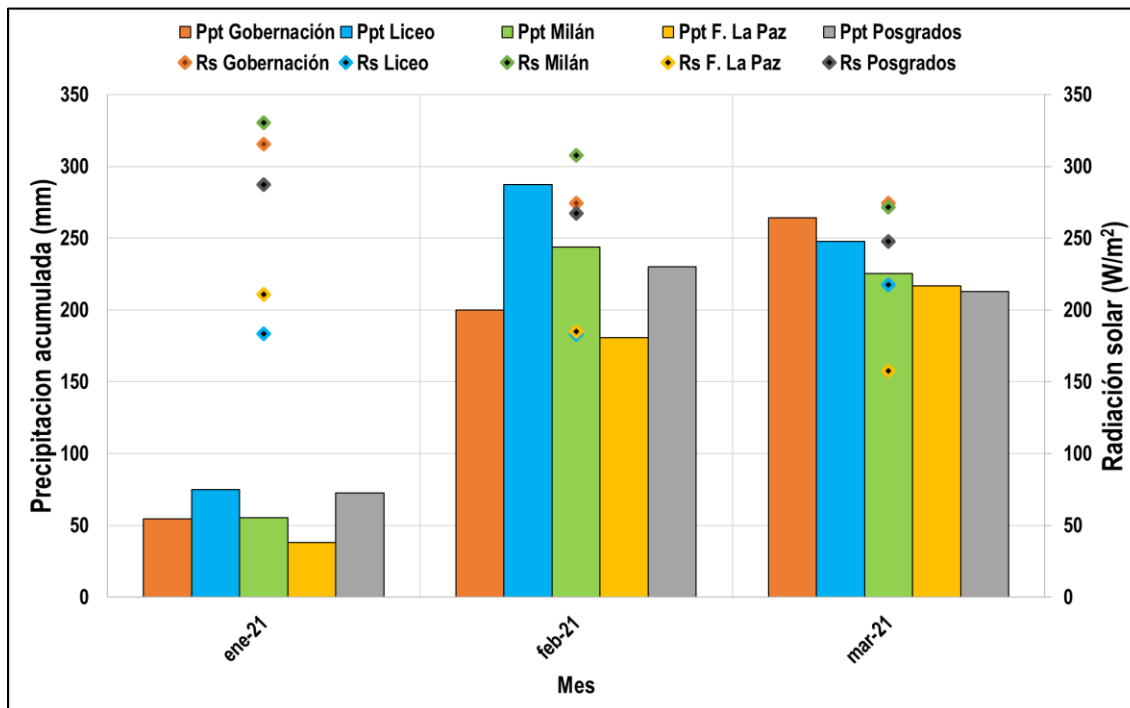


Figura 2. Promedios mensuales de precipitación acumulada (Ppt) y radiación solar (Rs) durante el periodo de análisis

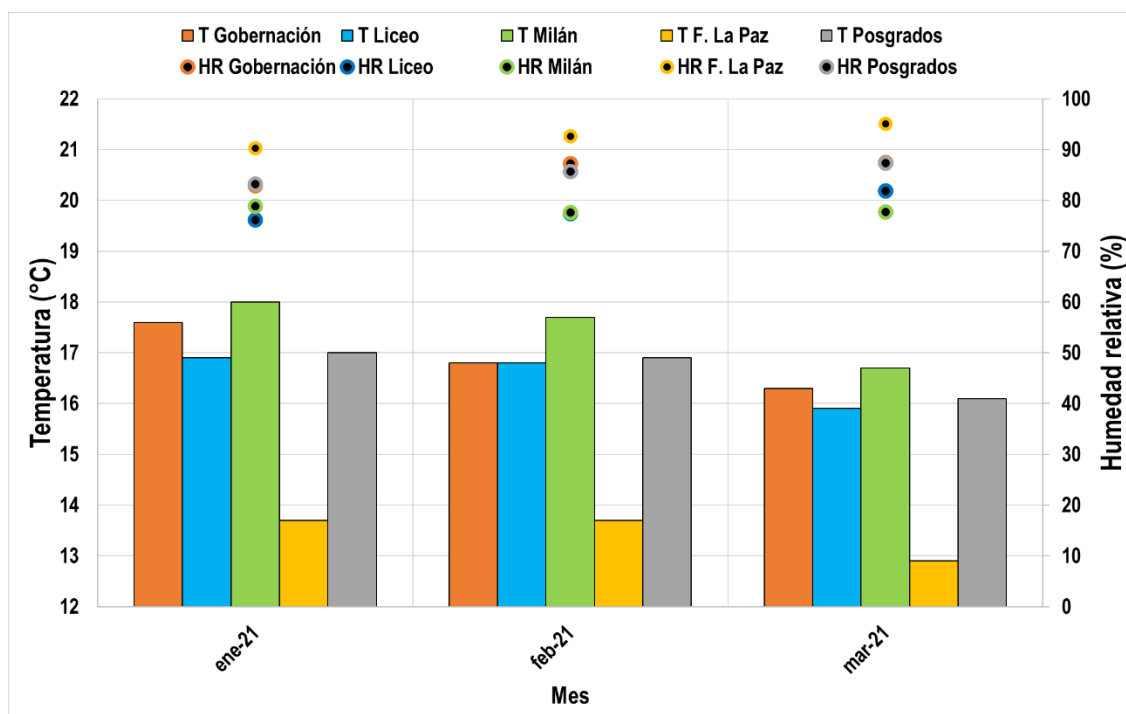


Figura 3. Promedios mensuales de temperatura del aire (T) y humedad relativa (HR) durante el periodo de análisis

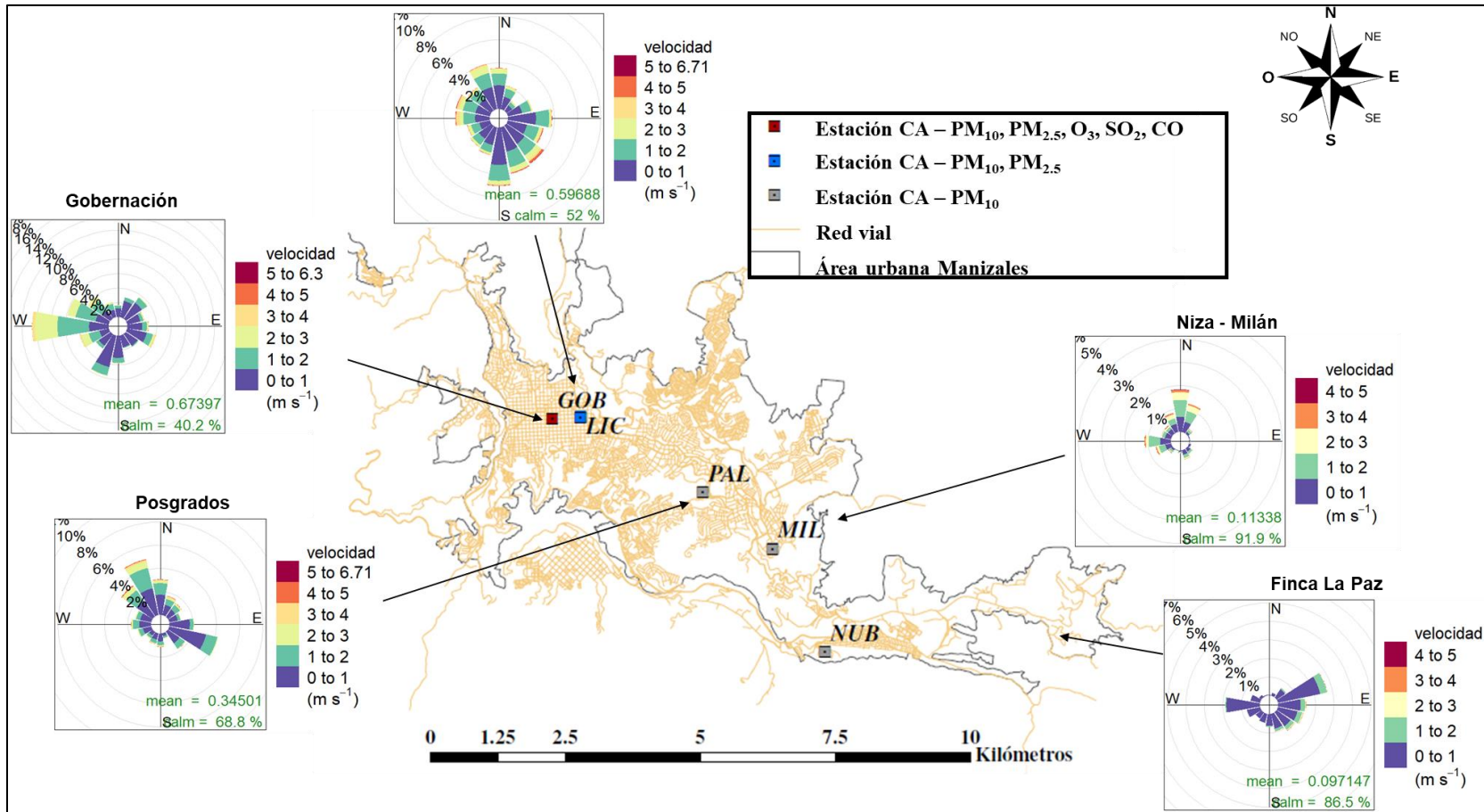


Figura 4. Rosas de viento en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante el periodo de análisis

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 el período de análisis (enero - marzo de 2021). 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 de la Tabla 3 muestran que, durante el período de análisis, las estaciones de Milán y Liceo registraron las concentraciones más altas de PM₁₀ en la ciudad; mientras que Nubia y Palogrande presentaron los registros más bajos. Para el primer trimestre de 2021, la estación Milán presentó los mayores niveles de concentración de PM₁₀ con promedios aritméticos mensuales entre $35 \pm 0.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en enero y $27 \pm 0.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en marzo. De otra parte, la estación Palogrande presentó los menores niveles con promedios mensuales aritméticos entre $21 \pm 0.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en febrero y $15 \pm 1.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en marzo. Se destaca que este patrón en los niveles de concentración también fue observado para el mismo periodo de los años 2020 y 2019, los cuales registraron los valores más altos de PM₁₀ en las estaciones 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 a los $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Al comparar los registros del 2021 con respecto al mismo periodo del 2020, se evidenció una reducción en las concentraciones promedio mensuales de febrero y marzo en todas las estaciones, con valores cercanos al 12% en Gobernación y 50% en Palogrande. Este fenómeno está directamente relacionado con las precipitaciones registradas durante estos meses, las cuales aumentaron para el 2021 alrededor de los 100 mm de lluvia. Los resultados ratifican el fenómeno de lavado atmosférico como uno de los factores clave en la reducción de la contaminación por material particulado en la ciudad de Manizales. Adicionalmente, para la estación de Milán se presentó para febrero y marzo de 2021 una reducción del 29% comparado con el mismo periodo en 2020, debido a la finalización de las obras de construcción en la empresa "Invermec", las cuales contribuyeron al aumento en los niveles de concentración en 2020; se recalca que esta estación es categorizada en el tipo de estación "Industrial".

Para el caso de los promedios aritméticos trimestrales, la estación Milán registró los valores más altos de PM₁₀ con un valor de $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), seguida por las estaciones Liceo con $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Gobernación con $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), Nubia con $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), por último Palogrande con $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Cabe resaltar que todas las estaciones cumplieron con el porcentaje de datos válidos del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010) establecido en 75% (actualmente Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS).

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

Estadístico*	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	19	23	19	20
Mediana	20	26	18	21
Incertidumbre**	1.20	1.20	1.16	1.18
Desviación Estándar	6	6	7	6
Min. – Max.	11-26	12-29	11-32	11-32
Percentil 95%	26	29	28	29
N° Datos - %DV***	10-90	9-100	10-100	29-97
Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	29	25	23	26
Mediana	30	26	23	26
Incertidumbre	0.53	0.53	0.57	0.54
Desviación Estándar	5	5	6	5
Min. – Max.	21-34	15-28	31-33	15-34
Percentil 95%	34	28	31	34
N° Datos - %DV	11-100	8-90	9-90	28-94
Palogrande PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	19	21	15	18
Mediana	20	21	14	18
Incertidumbre	0.53	0.53	1.06	0.71
Desviación Estándar	5	2	5	4
Min. – Max.	13-26	18-23	11-26	11-26
Percentil 95%	25	23	23	25
N° Datos - %DV	9-80	8-90	9-90	23-90

Estadístico*	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Milán PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	35	30	27	31
Mediana	34	30	29	31
Incertidumbre	0.52	0.52	0.57	0.54
Desviación Estándar	6	6	4	5
Min. – Max.	25-45	38-40	17-31	17-45
Percentil 95%	42	38	31	42
N° Datos - %DV	11-100	8-90	9-90	28-94
Nubia PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	20	20	18	19
Mediana	19	19	16	18
Incertidumbre	0.1	0.1	0.04	0.08
Desviación Estándar	6	6	5	6
Min. – Max.	15-27	16-26	26-27	15-27
Percentil 95%	26	26	26	26
N° Datos - %DV	10-90	8-90	8-80	26-87
Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar)				
Promedio	11	19	13	14
Mediana	12	19	12	14
Incertidumbre	1.17	1.17	1.40	1.24
Desviación Estándar	4	4	5	4
Min. – Max.	5-16	12-24	7-24	5-24
Percentil 95%	15	24	21	24
N° Datos - %DV	11-100	8-90	10-100	29-97

* 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 válidos

De manera general, se ha identificado que las estaciones Milán, Liceo y Gobernación se encuentran influenciadas por tráfico vehicular (representado por un flujo importante de buses y camiones de carga). 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 relacionadas con bajas dinámicas de movilidad, debido a la reducida presencialidad en los campus universitarios.

En lo referente al monitoreo de PM_{2.5} de la estación Gobernación, se registró un promedio trimestral de $14 \pm 1.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Se puede observar que febrero presentó el mayor nivel de concentraciones con un promedio mensual de $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras enero presentó el menor valor promedio con $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Los patrones en los niveles de concentraciones son proporcionales a los obtenidos en la fracción de PM₁₀, indicando su relación entre sí. Al comparar los registros del 2021 con respecto al año 2020 se observó una reducción en las concentraciones promedio mensuales con valores del 38% para enero y marzo, mientras febrero no presentó un cambio significativo (<5%). De manera similar a la fracción de PM₁₀, esta reducción se relaciona directamente con los valores de precipitación del presente año, que para el caso específico de Gobernación, se encontró que el aumento en precipitación superó los 120 mm de lluvia.

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

Finalmente, 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 las menores concentraciones se obtienen los fines de semana (específicamente los días domingo) demostrando así la influencia de las emisiones por tráfico vehicular en las cercanías de las zonas de monitoreo. Adicionalmente, se evidencia que en las estaciones Liceo, Milán y Gobernación los sábados tienen un comportamiento similar a los días laborales, con promedios diarios sin cambios significativos; mientras los lunes presentan una concentración media menor a las registradas en los demás días laborales. Este comportamiento se asocia con un efecto de remanente de atmósfera limpia, producto de la disminución de concentración obtenida durante el domingo.

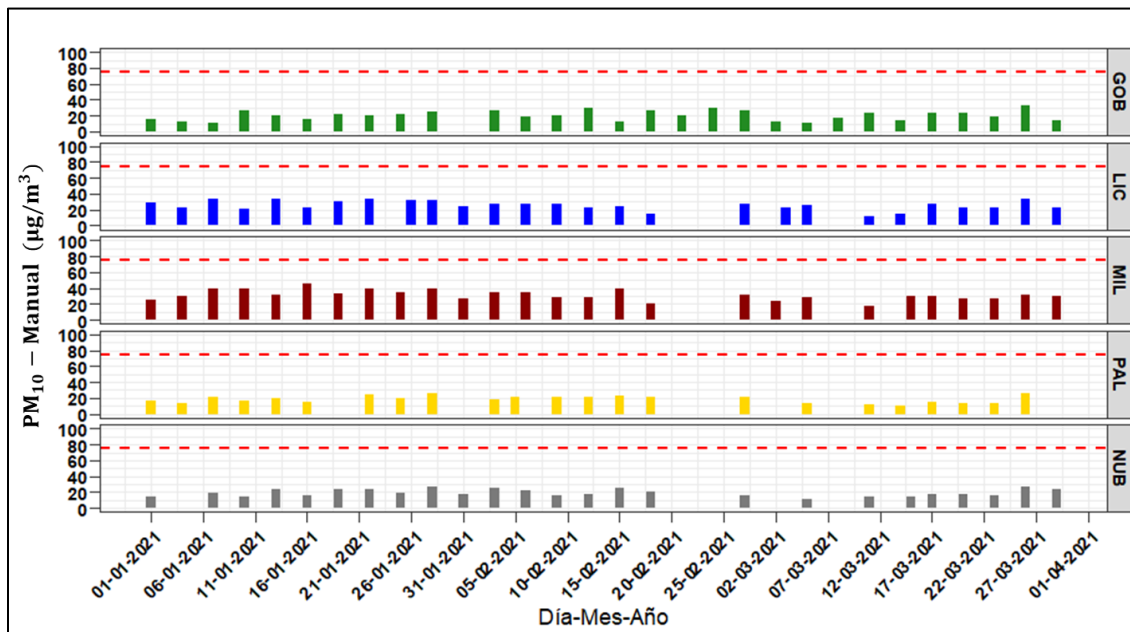


Figura 5. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM₁₀ - Manuales durante el periodo de análisis en el SVCA de Manizales. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM₁₀ establecido en la Resolución 2254 de 2017: 75 µg/m³

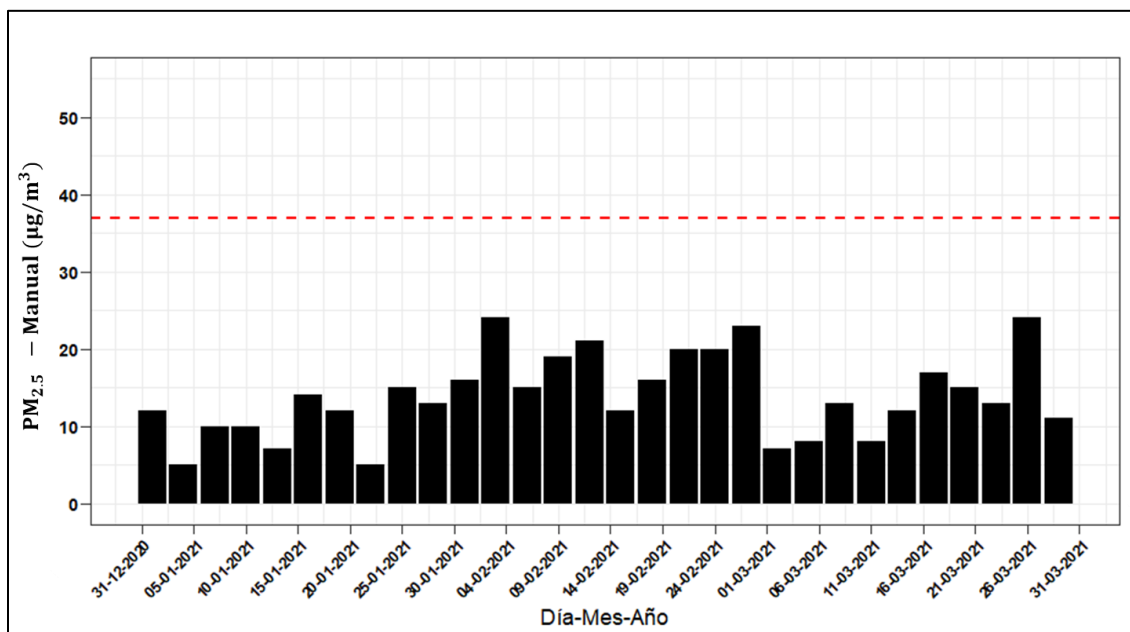


Figura 6. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM_{2.5} - Manual durante el periodo de análisis en el SVCA de Manizales. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM_{2.5} establecido en la Resolución 2254 de 2017: 37 µg/m³

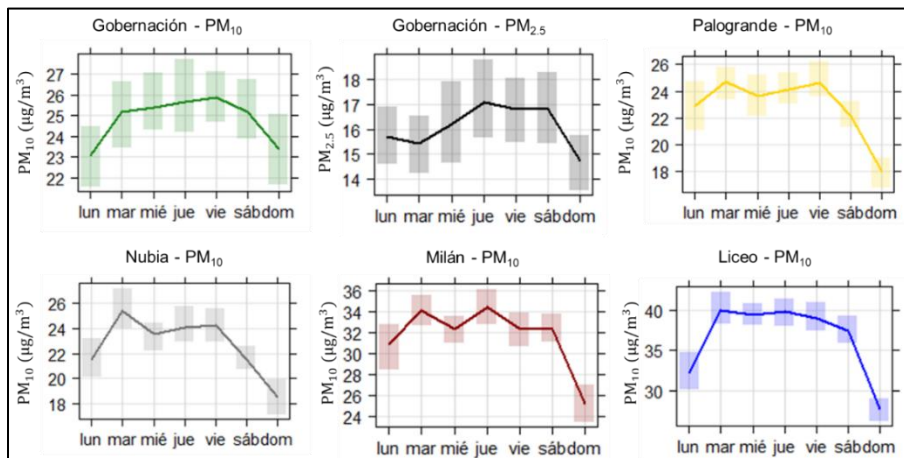


Figura 7. Variación promedio de concentraciones por días de la semana para PM₁₀ y PM_{2.5} - Manuales, durante el periodo de análisis. La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%

3.2. Equipos manuales: Comparación preliminar con la norma anual

Se realizó el ejercicio de comparación del promedio aritmético obtenido para las concentraciones de PM₁₀ (Figura 8) y PM_{2.5} (Figura 9) para el periodo de análisis. Lo anterior con el fin de analizar preliminarmente las diferencias con respecto a los límites normativos anuales, establecidos en la Resolución 2254 de 2017 para PM₁₀ (50 µg/m³) y PM_{2.5} (25 µg/m³). Se observó que en ninguna de las estaciones se ha superado la norma anual colombiana. Finalmente, es importante destacar que los promedios obtenidos en todas las estaciones, tanto para PM₁₀ como para PM_{2.5}, superaron las recomendaciones promedio anual propuestas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 20 µg/m³ para PM₁₀ y 10 µg/m³ para PM_{2.5}.

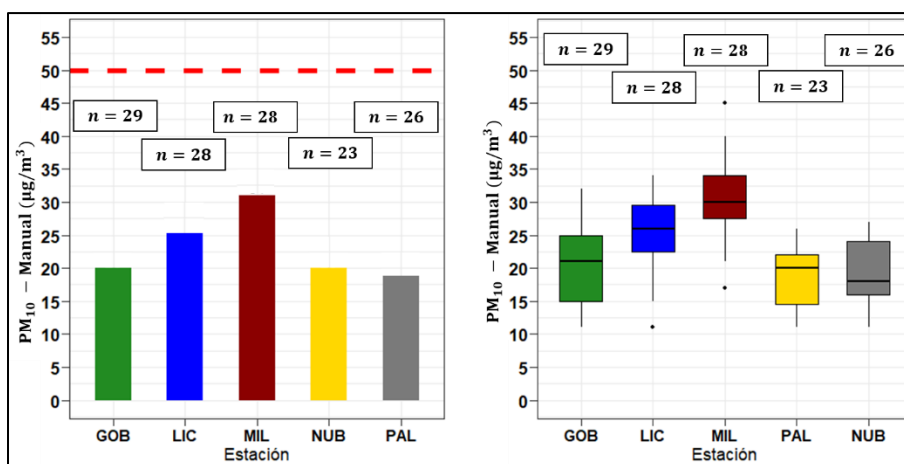


Figura 8. Concentración promedio (izquierda) y diagrama de cajas (derecha) de PM₁₀ - Manuales durante el periodo de análisis. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 del MADS: 50 µg/m³

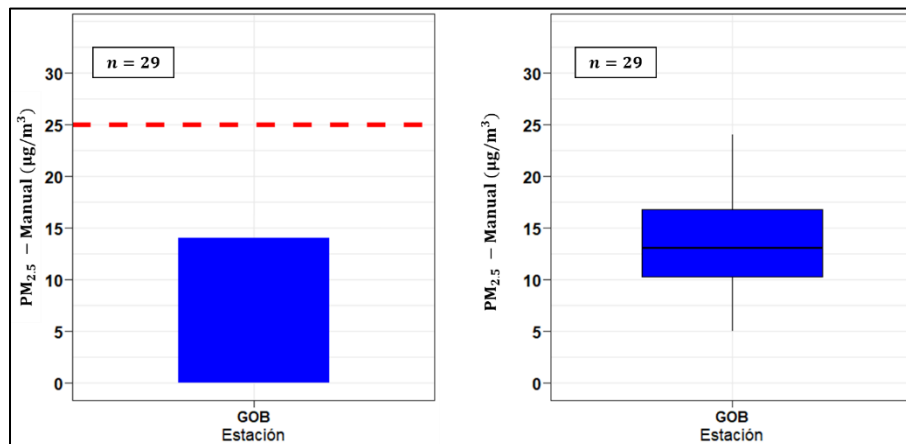


Figura 9. Concentración promedio (izquierda) y diagrama de cajas (derecha) de PM_{2.5} - Manual durante el periodo de análisis. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 del MADS: 25 µg/m³

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 ambas estaciones (Gobernación y Liceo) durante el período de análisis. Se observó que durante el primer trimestre del 2021, las concentraciones promedio medianas¹ de Gobernación para PM₁₀ y PM_{2.5} se encontraron alrededor de los 19.5 µg/m³ (desv. std = 5.9 µg/m³) y 12.4 µg/m³ (desv. std = 4.0 µg/m³) respectivamente. De otra parte, las concentraciones promedio medianas de Liceo para PM₁₀ y PM_{2.5} se encontraron alrededor de los 22.4 µg/m³ (desv. std = 7.8 µg/m³) y 10.4 µg/m³ (desv. std = 4.4 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 a los promedios mensuales, se puede observar que el patrón en los niveles de concentración es similar a los obtenidos en los equipos manuales, indicando la relación inversa entre el material particulado y la precipitación, debido al fenómeno de lavado atmosférico. En este sentido, el máximo promedio obtenido para PM₁₀ fue de 45.2 µg/m³ en Gobernación y 74.1 µg/m³ en Liceo, ambos en enero (mes con las menores precipitaciones). De forma similar sucedió para PM_{2.5} cuyos registros fueron de 35.2 µg/m³ y 46.5 µg/m³ también en enero.

Al comprar el primer trimestre del año 2021 con respecto al mismo periodo en 2020, se presentó una reducción en las concentraciones de PM₁₀ con promedios del 27% para Gobernación y Liceo, mientras que para PM_{2.5} esta reducción estuvo entre el 21% en Gobernación y 39% en Liceo. Estos fenómenos de reducción en las concentraciones de ambos contaminantes y en ambas estaciones se pueden atribuir a los nuevos patrones de movilidad que se presentan en la ciudad debido a la "nueva normalidad", en donde el teletrabajo ha tomado fuerza, reduciendo así las emisiones atmosféricas.

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.

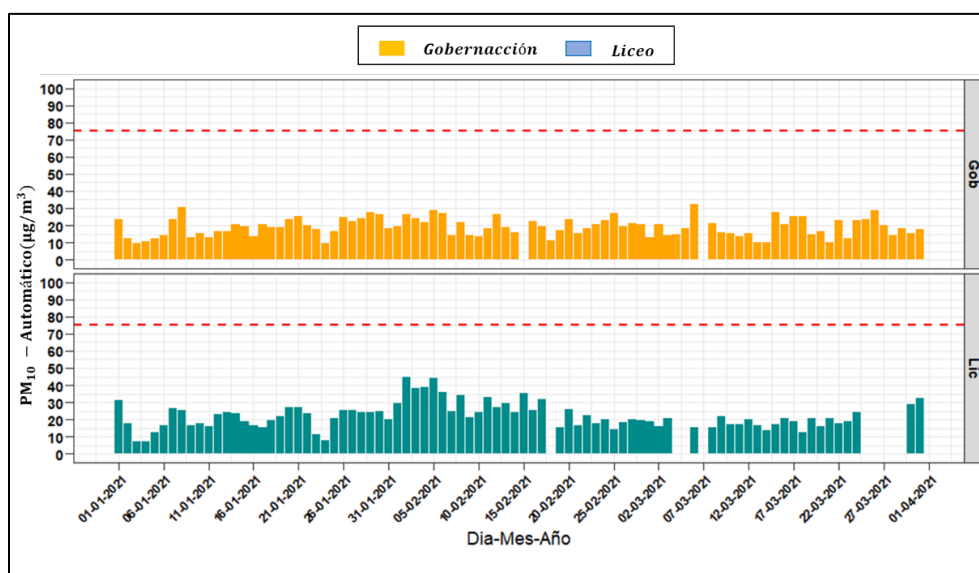
Tabla 4. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automático (µg/m³) durante el periodo de análisis

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	19.5	20.4	18.6	19.5
Mediana	18.9	20.1	17.4	18.8
Desv. Est.	7.3	4.4	5.8	5.9
Min.	9.3	10.8	10.1	9.3
Max.	45.2	28.9	32.1	45.2
Percentil 95	29.1	27.1	28.2	29.1
N° Datos	31	28	30	89
Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar)				
Promedio	21.7	26.9	18.6	22.4
Mediana	22.1	25.1	18.9	22.0
Desv. Est.	11.5	8.5	3.3	7.8
Min.	7.2	14.3	12.1	7.2
Max.	74.1	44.6	26.2	74.1
Percentil 95	29.2	17.3	23.8	29.2
N° Datos	31	28	23	82

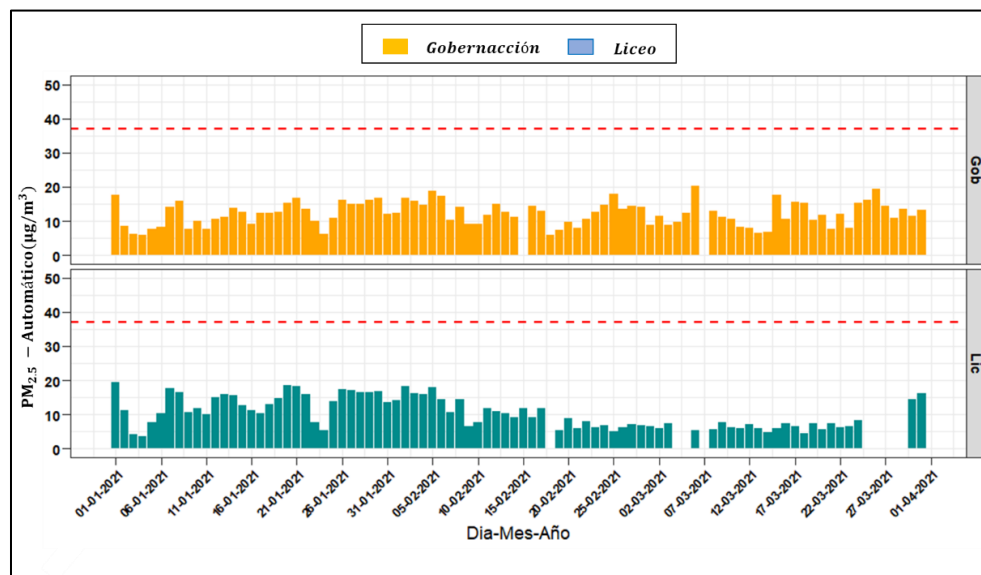
Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar)				
Promedio	12.6	12.8	11.9	12.4
Mediana	12.4	13.2	11.4	12.3
Desv. Est.	5.4	3.2	3.5	4.0
Min.	6.0	5.8	6.5	5.8
Max.	35.2	19.1	20.0	35.2
Percentil 95	17.1	17.6	18.3	18.3
N° Datos	31	28	30	89
Liceo PM_{2.5} (µg/m³ estándar)				
Promedio	14.2	10.5	6.7	10.5
Mediana	14.8	9.9	6.6	10.4
Desv. Est.	7.4	4.0	1.7	4.4
Min.	3.6	5.1	4.4	3.6
Max.	46.5	18.2	13.5	46.5
Percentil 95	18.8	42.2	8.4	42.2
N° Datos	31	28	23	82

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

De manera alternativa, la Figura 10 presenta el comportamiento temporal de las concentraciones de los equipos PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos (promedio diario) durante el periodo de análisis para las estaciones Gobernación y Liceo.



(a)



(b)

Figura 10. Evolución temporal de concentraciones diarias de los equipos PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos durante el periodo de análisis. (a) PM₁₀ (b) PM_{2.5}. La línea punteada roja hace referencia a los límites máximos permisibles de promedio diario de PM₁₀ y PM_{2.5} respectivamente establecidos en la Resolución 2254 de 2017 de MADS: 75 µg/m³ para PM₁₀ y 37 µg/m³ para PM_{2.5}

Finalmente, de manera alternativa se presenta la Figura 11 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 para el período de análisis.

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 cercanos a los 30 µg/m³ para PM₁₀ y 15 µg/m³ para PM_{2.5}. Para el caso particular del medio día, no se observan estos picos de concentración debido a las dinámicas de las masas de aire en la ciudad, que, al calentarse por acción de la radiación solar, cuyo valor máximo supera los 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 otros, 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.

Lo anterior sugiere que tanto el PM_{10} como el $PM_{2.5}$ provienen de la misma fuente de emisión. 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 (5%), indicando que este día se comporta como un día laboral en la ciudad.

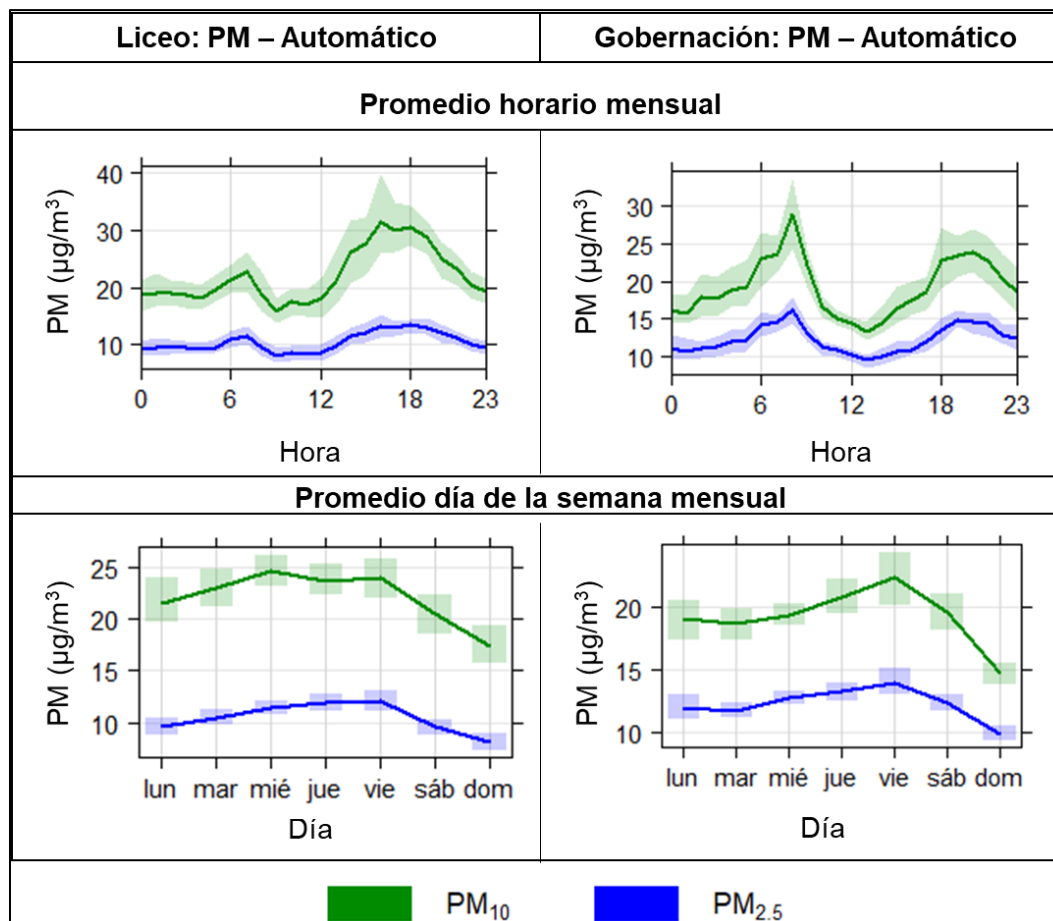


Figura 11. Promedio horario y semanal mensual para PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Automáticos durante el periodo de análisis en las estaciones Gobernación y Liceo

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

La Figura 12 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de PM - Manuales. De forma similar, la Figura 13 presentan 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).

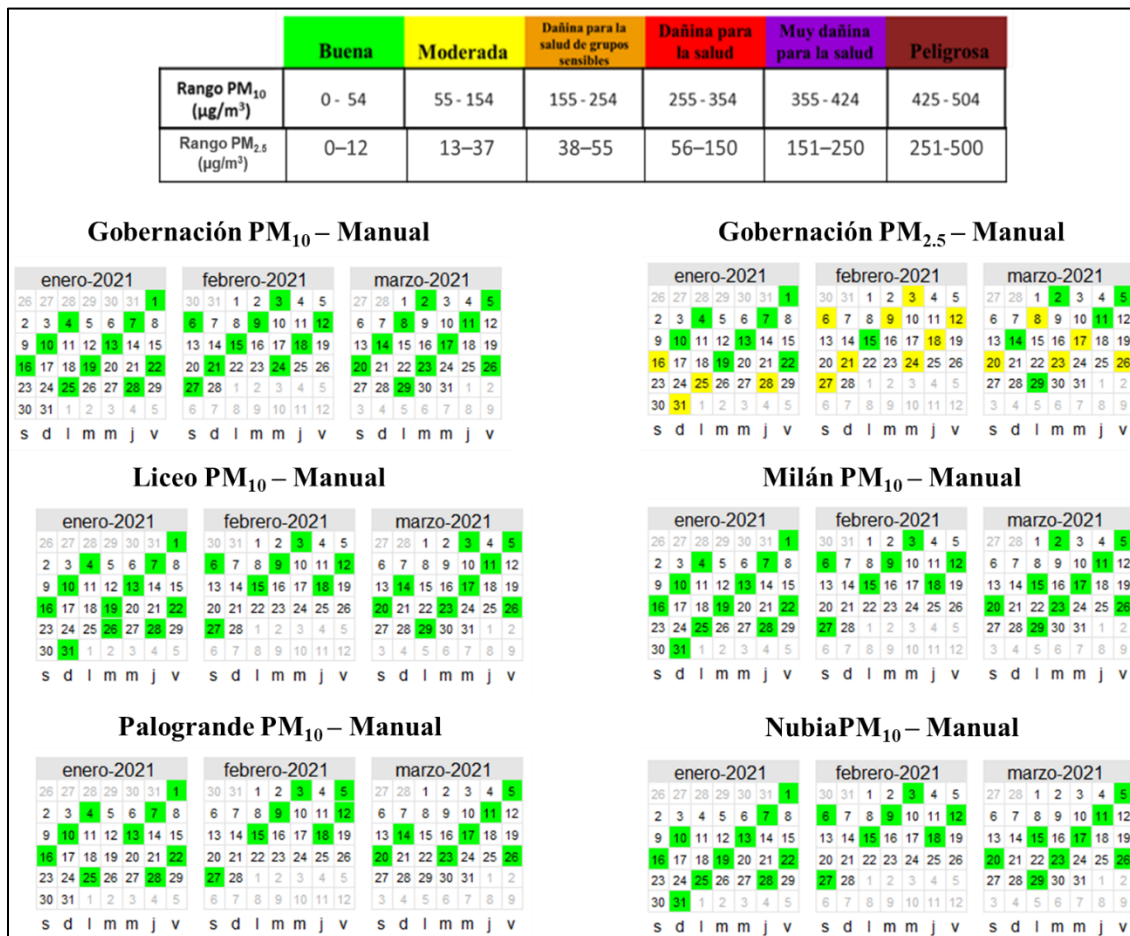


Figura 12. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ y PM_{2.5} – Manual: durante el periodo de análisis. Cálculo según lineamientos de la resolución 2254 de 2017 del MADS

En lo que respecta a la concentración de PM₁₀ – Manual, se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena en las cinco estaciones de monitoreo para todos los días analizados. Para el caso de PM_{2.5} – Manual en la estación Gobernación, un 58% de los días analizados presentaron ICA en estado moderado.

Por otro lado, con base en la concentración de PM₁₀ - Automático, se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena en todos los días en la estación Gobernación y Liceo; mientras que, para el caso de PM_{2.5} – Automático, en ambas estaciones se tuvo un promedio del 40% de los días con ICA en estado moderado.

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

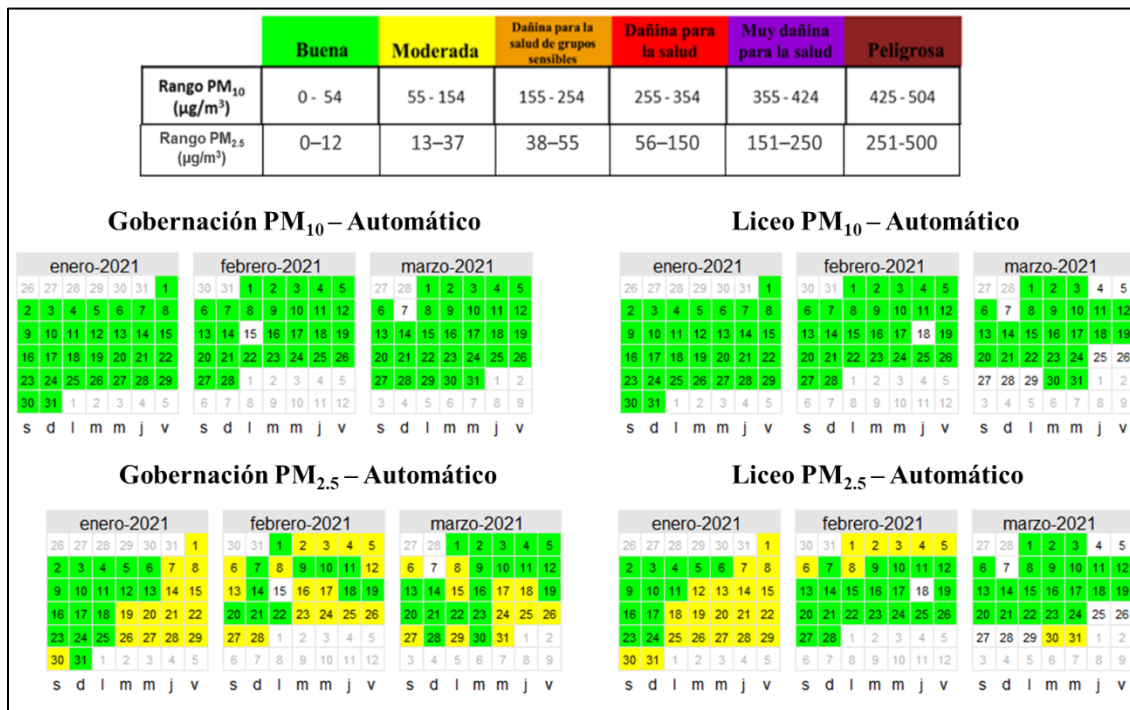


Figura 13. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ y PM_{2,5} – Automático: Gobernación y Liceo en Manizales durante el periodo de análisis. Cálculo según lineamientos de la resolución 2254 de 2017 del MADS

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 periodo de análisis. Se observó que, durante el primer trimestre del 2021 las concentraciones promedio medianas² se encontraron alrededor de 717.3 µg/m³ (desv. std = 383.8 µg/m³), con un valor máximo registrado de 2837.7 µg/m³ obtenido el viernes 05 de febrero. 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 febrero presentó el mayor registro con un valor promedio de 813.7 µg/m³, 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 01 enero con un valor de 151.1 µg/m³, día festivo caracterizado en general por ausencia de fuentes de emisión en toda la ciudad.

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.

Al comparar el trimestre del año 2021 con respecto al mismo periodo del 2020 y 2019, se presentó un aumento en las concentraciones en un 23% con respecto al 2020; y una variabilidad poca significativa comparado con el 2019, por lo que no se presenta una evidencia clara en los patrones de emisión. 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 (Corpocaldas – Unal, 2019).

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

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Promedio	673.0	924.3	875.6	824.3
Mediana	561.0	813.7	777.1	717.3
Incertidumbre**	1.40	1.40	1.40	1.40
Desv. Est.	345.6	407.4	398.4	383.8
Min.	151.1	288.8	246.1	151.1
Max.	2205.9	2837.7	2797.8	2837.7
Percentil 95	1394.3	1714.7	1691.6	1714.7
N° Datos	762	696	768	2226.0

* 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.

De manera complementaria, la Figura 14 presenta la evolución de concentraciones octohorarias de CO durante el periodo 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 (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).

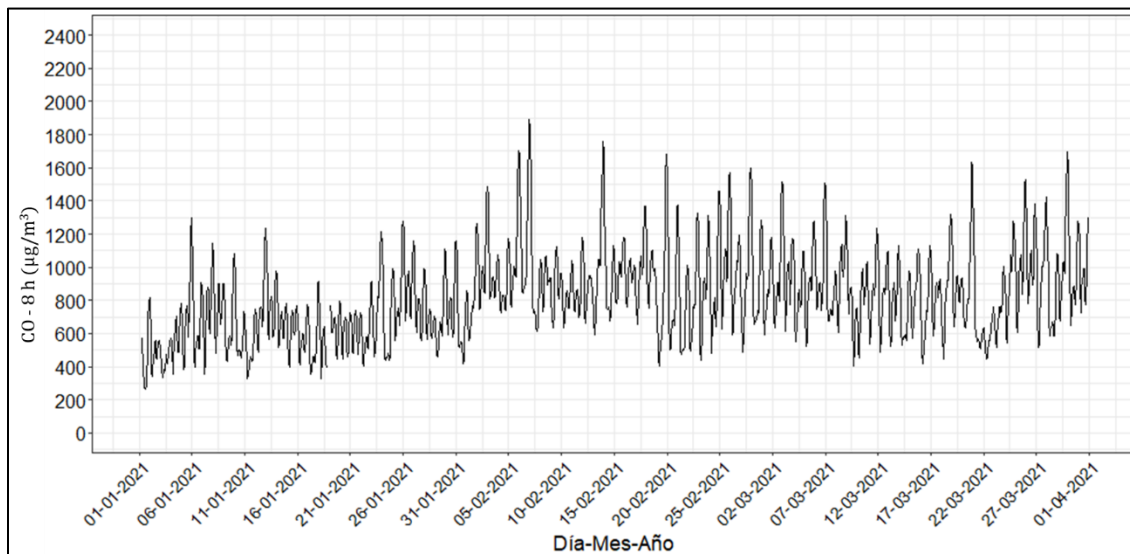


Figura 14 Evolución temporal de concentraciones promedio octohoraria de monóxido de carbono (CO) durante el periodo de análisis. El nivel máximo permisible octohorario de la Resolución 2254 de 2017 equivalente a $5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no fue superado en ningún día

Adicionalmente, la Figura 15 presenta la variación promedio horario 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 de $1200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $1400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. De otra parte, se observan mínimos alrededor de los $380 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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).

Para el caso de la hora pico del medio día se registran concentraciones alrededor de los $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 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 que la concentración máxima se presenta los sábados con un valor promedio alrededor de los $900 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una concentración mínima los domingos (día con la menor actividad económica de la ciudad) con un valor promedio de $680 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este valor es 19% inferior comparado con el promedio semanal, indicando la representatividad del aporte de las fuentes de emisión en las concentraciones de CO observadas.

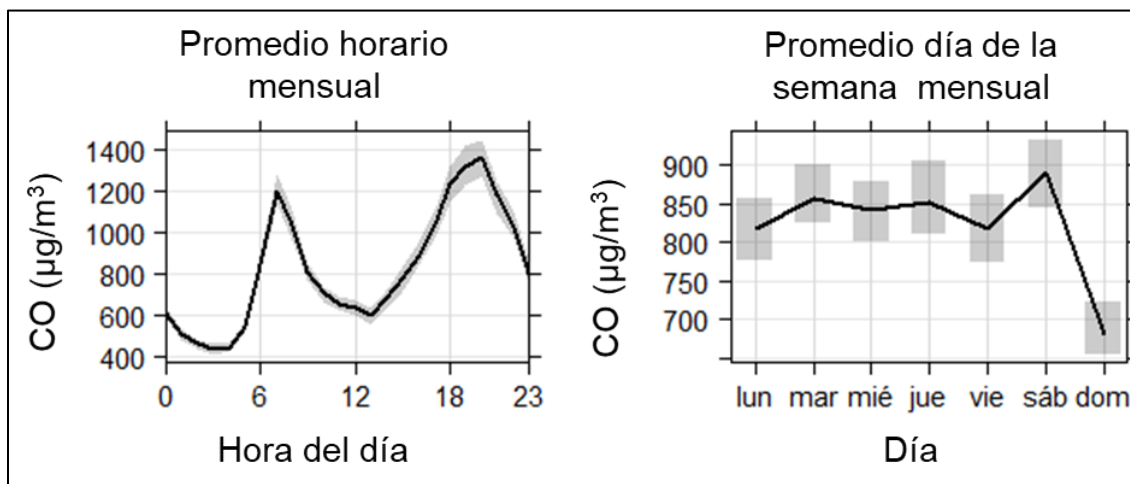


Figura 15. Variación promedio de monóxido de carbono (CO) horario mensual y por día de la semana mensual durante el periodo de análisis

4.2. Monitoreo de dióxido de azufre (SO_2)

La Tabla 6 presenta los estadísticos descriptivos comparativos para SO_2 durante el periodo de análisis. Para este equipo en particular se tienen registros a partir del 12 de febrero, debido a algunas fallas en el sistema de medición. Se observó que, durante el primer trimestre del 2021, las concentraciones promedio medianas³ se encontraron alrededor de $7.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), con un máximo valor registrado de $16.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ obtenido el domingo 14 de febrero, valor sin explicación atribuible. 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 de forma similar al CO, durante febrero se presentó el mayor registro con un valor promedio de $9.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, indicando un posible aumento en la presencia de vehículos en inmediaciones de la estación. Estas fuentes móviles en ruta utilizan combustibles como gasolina y diésel. Para el caso del mínimo promedio registrado, este se presentó el domingo 14 de marzo con un valor de $3.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, día caracterizado por ausencia de fuentes en general en toda la ciudad.

Al comparar marzo y febrero se evidencia una reducción en las concentraciones registradas, esto contrasta con los reportes sobre la actividad volcánica durante el periodo de análisis (ver sección 5.3), en donde se identificó que las mayores emisiones de la columna de gases provenientes del volcán fueron superiores durante marzo, con registros de emisión de gases desde la boca del volcán con alturas superiores a los 1217 m, no obstante, estas emisiones no fueron registradas de manera representativa en el centro de la ciudad.

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.

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

Estadísticos*	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Promedio	---***	9.2	7.1	8.2
Mediana	---	8.6	6.8	7.7
Incertidumbre**	---	0.27	0.27	0.27
Desv. Est.	---	2.4	1.8	2.1
Min.	---	5.4	3.3	3.3
Max.	---	16.9	14.8	16.9
Percentil 95	---	13.5	10.9	13.5
N° Datos	---	395	768	1163.0

* 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 16 presenta la evolución de concentraciones horarias de SO₂ durante el periodo 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 (MAVDT, 2010). Se destaca que todos los registros están dentro de los límites permitidos por la normatividad vigente (100 µg/m³ para 1 hora).

Adicionalmente, la Figura 17 presenta la variación promedio horaria y por día de la semana mensual. Se observa un comportamiento horario mensual 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 de 6.1 µg/m³ y 5.1 µg/m³ respectivamente. Asimismo, se observan mínimos alrededor de los 2.5 µg/m³ al medio día (entre las 11 am y 1 pm). Al comparar el promedio por día de la semana mensual, no se observa un comportamiento definido, con máximos de concentración los lunes y sábados, así como con un valor alrededor de los 4.3 µg/m³ y mínimos los domingos alrededor de los 4 µg/m³.

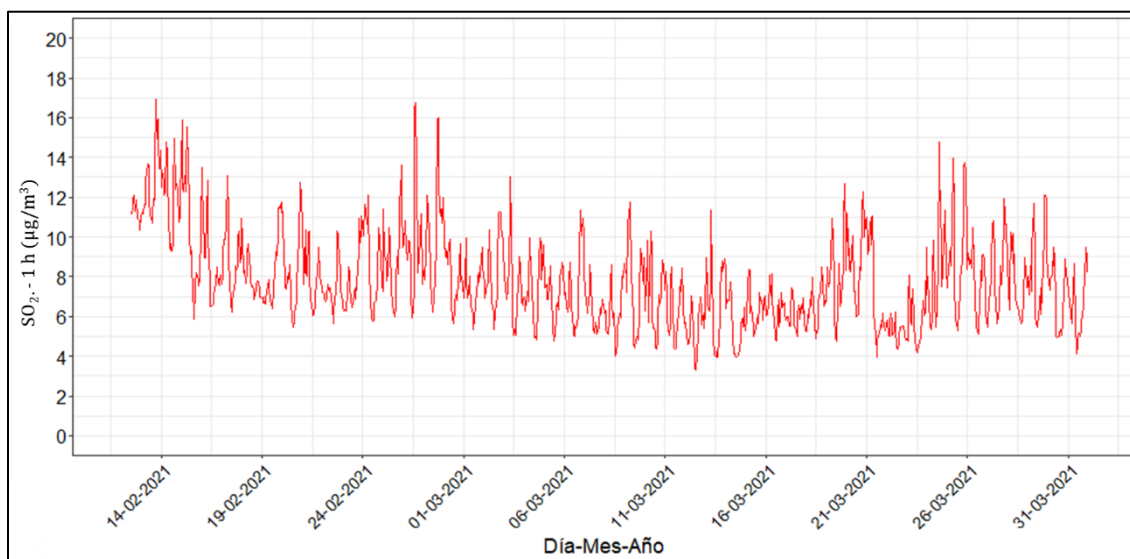


Figura 16. Evolución temporal de concentraciones promedio horario de dióxido de azufre (SO₂) durante el periodo de análisis. El nivel máximo permisible horario de la Resolución 2254 de 2017 equivalente a 100 µg/m³ no fue superado en ningún día

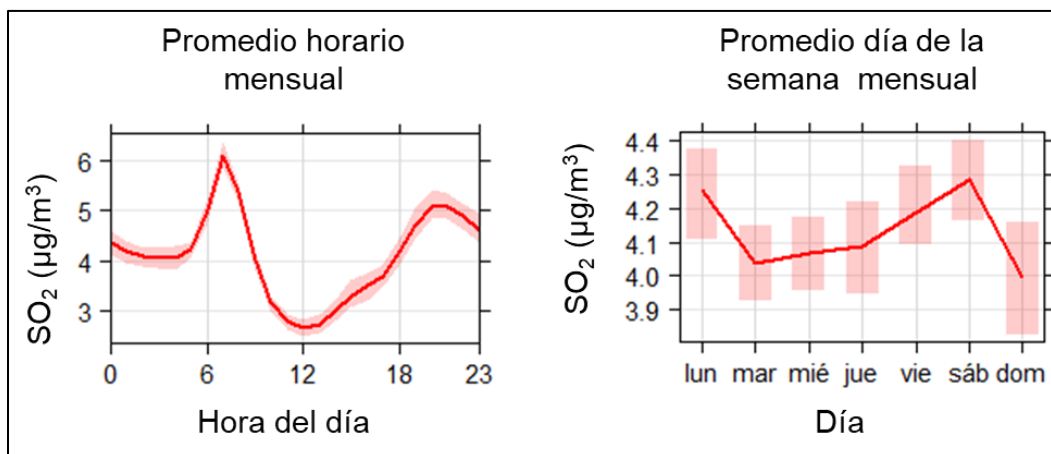


Figura 17. Variación promedio horaria mensual y por día de la semana mensual de dióxido de azufre SO₂ durante el periodo de análisis

4.3. Monitoreo de ozono troposférico (O₃)

La Tabla 7 presenta los estadísticos descriptivos comparativos para O₃ durante el periodo de análisis, así como la subclasificación entre las concentraciones del día (diurnas) y la noche (nocturno). Se observó que durante el primer trimestre del 2021, las concentraciones promedio medianas⁴ se encontraron alrededor de 10 µg/m³ para el día completo, 18.1 µg/m³ para la jornada diurna y 6.6 µg/m³ para la jornada nocturna. 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 febrero se presentó el menor registro con un valor promedio de 11.5 µg/m³ para el día y durante marzo se registró el mayor promedio mensual con un valor de 13.7 µg/m³ para el día. Al comprar la mediada del trimestre del año 2021 con respecto al mismo periodo del 2020 y 2019, se presentó una reducción en las concentraciones en un 26% con respecto al 2020 y un 100% con el 2019, esta reducción histórica evidencia un posible cambio en los patrones de emisión de algunos precursores o en las dinámicas de formación del ozono en la ciudad de Manizales.

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 (Corpocaldas – Unal, 2019). 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 OH· reaccionarán mayoritariamente con los COVs para generar moléculas de agua, NO₂ y especies de aldehídos (ver reacciones 1, 2 y 3). Por otro lado, con una baja relación de COVs/NO_x las reacciones de NO_x serán predominantes (ver reacciones 3, 4, 5 y 6) y removerán los radicales OH· del sistema, generando consumo de O₃ mediante la reacción de titulación (ver reacción 6); para finalmente inducir la producción de especies como ácido nítrico que posteriormente precipitan en forma seca o húmeda (Sengel y otros, 2020; Fabián y Dameris, 2014).

En este sentido, la disminución de emisiones de contaminantes primarios puede ser interpretadas 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 O₃, debido a que los radicales (OH·) tenderán hacia la reacción con COVs y favorecerán la producción neta de NO₂ (reacciones 1, 2 y 3).

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.

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

Tabla 7. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de O₃ (µg/m³) durante el periodo de análisis y su comparativo entre horarios

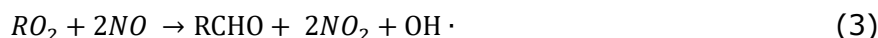
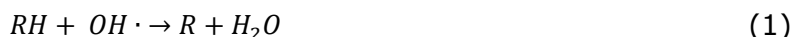
Estadísticos	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Promedio	12.8	11.5	13.7	12.7
Mediana	10	8.9	11.3	10.0
Incertidumbre**	1.18	1.18	1.18	1.18
Min.	1.4	0.4	0.9	0.4
Max.	44.2	39.1	45.1	45.1
Percentil 95	30.6	29	32.5	32.5
N° Datos	639	696	697	2032
Promedio diurno	18.1	16.1	19.1	17.8
Mediana diurna	18.3	16.5	19.4	18.1

Estadísticos	Ene.	Feb.	Mar.	Total
Desv. Est.	10	9.3	10	9.8
Max.	44.2	39.1	45.1	45.1
N° Datos	315	348	349	1012
Promedio nocturno	7.8	6.9	8.2	7.6
Mediana nocturna	6.8	5.5	7.6	6.6
Desv. Est.	4.8	4.7	5.1	4.9
Max.	29.9	21.7	27.7	29.9
N° Datos	324	348	348	1020

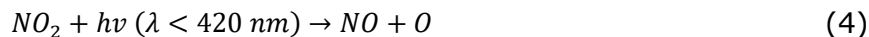
* Estadísticos estimados a partir de datos promedios horarios del equipo.

** 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.

*** Porcentaje comparativo de cada etapa respecto al periodo de normalidad al inicio del año 2020.



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



Dónde: *hν* 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 O₃, por consiguiente, una reducción de las concentraciones observadas. En este sentido se podría sugerir que las concentraciones de O₃ en la ciudad de Manizales se encuentran dominadas por la presencia de COVs en la atmósfera (Li, 201; Sengel y otros, 2020).

De manera complementaria, la Figura 18 presenta la evolución de concentraciones octohorarias de O₃ durante el periodo 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 (MAVDT, 2010). Se resalta que las concentraciones octohorarias de O₃ se encontraron entre 1.3 µg/m³ y 88.9 µg/m³, valores que están dentro de los límites permitidos por la normatividad vigente (100 µg/m³ para 8 horas).

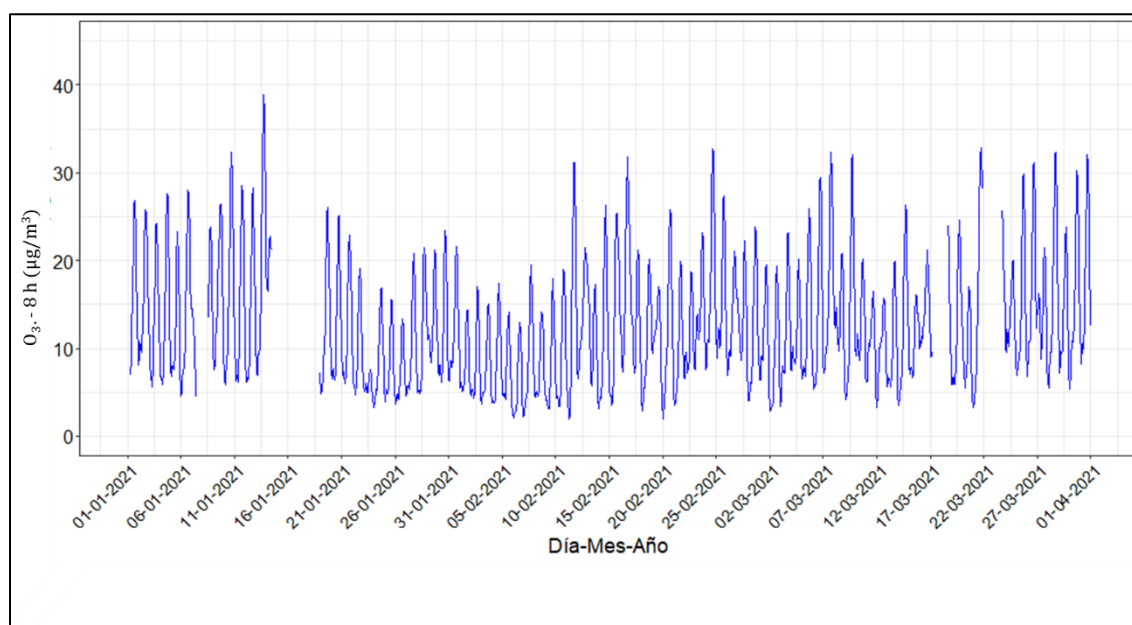
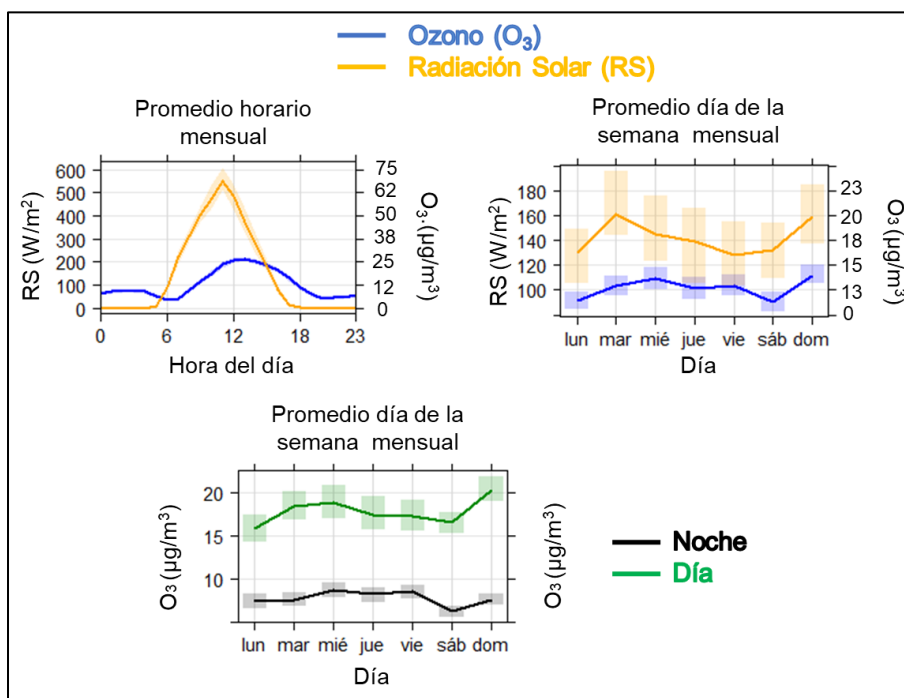


Figura 18. Evolución temporal de concentraciones promedio octohorario de O₃ durante el periodo de análisis. El nivel máximo permisible octohorario de la Resolución 2254 de 2017 equivalente a 100 µg/m³ no fue superado

De manera alternativa la Figura 19 presenta el resumen de la variación de O₃ 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 una relación directa entre el ozono y la radiación solar, los picos máximos en las concentraciones de ozono y radiación solar ocurren durante las 11:30 am y 3:00 pm del día, alcanzando concentraciones promedio cercana a los 27 µg/m³ y niveles de radiación promedio cercanos a los 560 W/m².

Para el período nocturno, sin presencia de radiación solar, la concentración de ozono disminuye aproximadamente el doble. Adicionalmente, se presenta un pico de ozono entre la 1:00 am y 3:00 am con valores cercanos a los 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 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 disminuirá 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, impidiendo así la libre dispersión de contaminantes en la atmósfera. De otra parte, se identifica que las concentraciones diurnas son aproximadamente 2.7 veces más elevadas que en las noches, con una mediana diurna de 18.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y una nocturna de 6.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

De manera general se evidencia que los promedios nocturnos no presentan relación clara con los días de la semana, esto se asocia a que en la noche no existe radiación solar y por tanto no hay generación de O_3 y el registrado será producto de la acumulación del O_3 generado durante el día. Por otra parte, los promedios diurnos y semanales evidencian que las variaciones de O_3 tienen relación directa con la radiación solar, y para el caso de sábados y domingos se presenta un aumento en concentraciones de O_3 , lo que se asocia al remanente del generado durante los días de mayor actividad de las fuentes de emisión (lunes a viernes). Además, la posible influencia en la disminución de emisiones de precursores como el NO_x debido al bajo tráfico vehicular de estos dos días, alterando así las reacciones de titulación que generan O_3 , y desplazando el equilibrio hacia una mayor producción de este contaminante.



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

La Figura 20 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de CO, SO₂ y O₃. El ICA representa mediante un indicador de color, el estado de la calidad del aire de acuerdo con la concentración de cada contaminante y su posible afectación a la salud. Para el cálculo de este indicador tanto en O₃, SO₂ y CO 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 periodo analizado para los contaminantes mencionados.

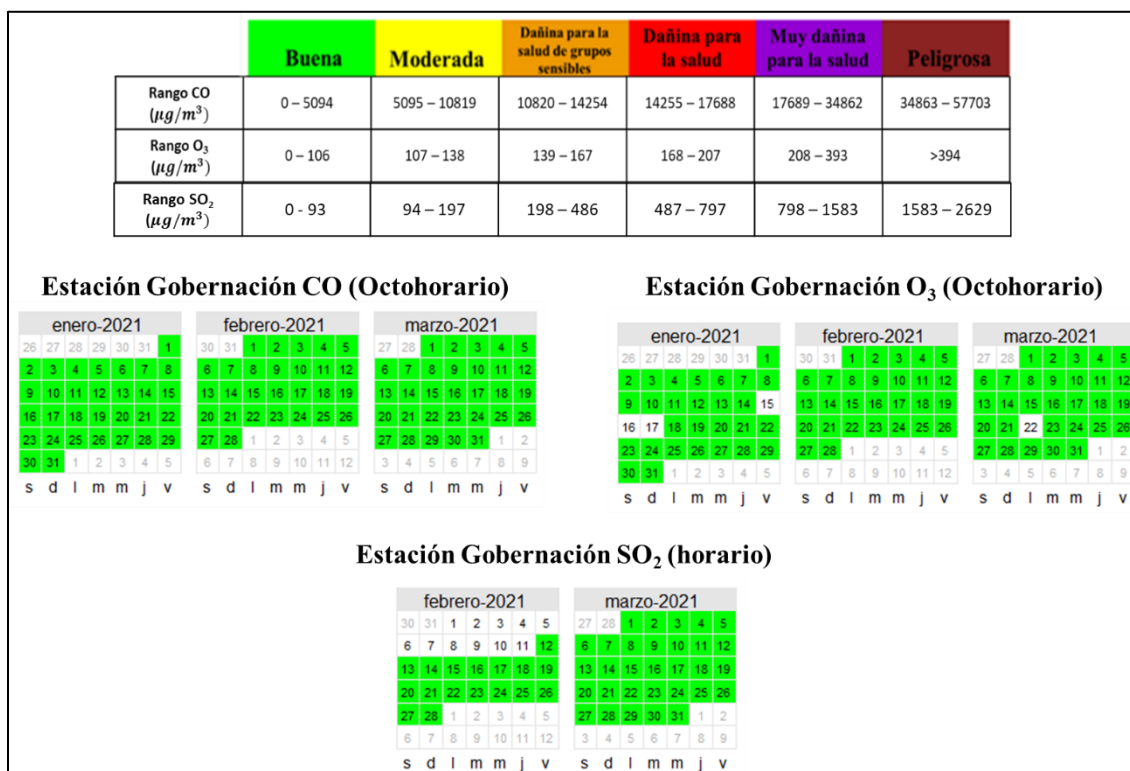


Figura 20. Índice de calidad del aire (ICA) para CO, SO₂ y O₃ en Manizales durante el periodo de análisis. Cálculo según lineamientos de la resolución 2254 de MADS

5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS

5.1. Equipos manuales: Análisis comparativo de promedios entre PM₁₀ y PM_{2.5} en la estación Gobernación

Actualmente, en la estación Gobernación se encuentran juntos los equipos manuales de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}. Esto permite analizar la distribución en tamaño de las partículas inferiores a 10 µm de diámetro. Dentro de la fracción respirable, se consideran partículas gruesas aquellas con un diámetro aerodinámico entre 2.5 y 10 µm; las partículas finas tienen diámetro menor que 2.5 µm. Es importante destacar que el PM_{2.5} es una parte del PM₁₀. La Figura 21 presenta la relación entre las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} obtenidas en la estación Gobernación para el periodo de análisis. Se identifica que en todos los casos, la concentración de PM_{2.5} es menor que la de PM₁₀, resultado coherente y que coincide con lo descrito anteriormente.

Se identificó que en la mayoría de los casos la concentración de PM_{2.5} (partículas finas) representa más de la mitad de la concentración de PM₁₀, con una contribución promedio del 70%, por lo tanto, el porcentaje restante se refiere a la fracción de partículas con un diámetro entre 10 µm y 2.5 µm (fracción gruesa). Estos resultados son un indicativo de que ambos contaminantes PM₁₀ y PM_{2.5} pueden estar relacionados con el mismo tipo de fuente de emisión y la generación de PM_{2.5} no está fuertemente influenciada por reacciones en la atmósfera que caracterizan a los contaminantes secundarios (Berkeley L. Laboratory, 2013).

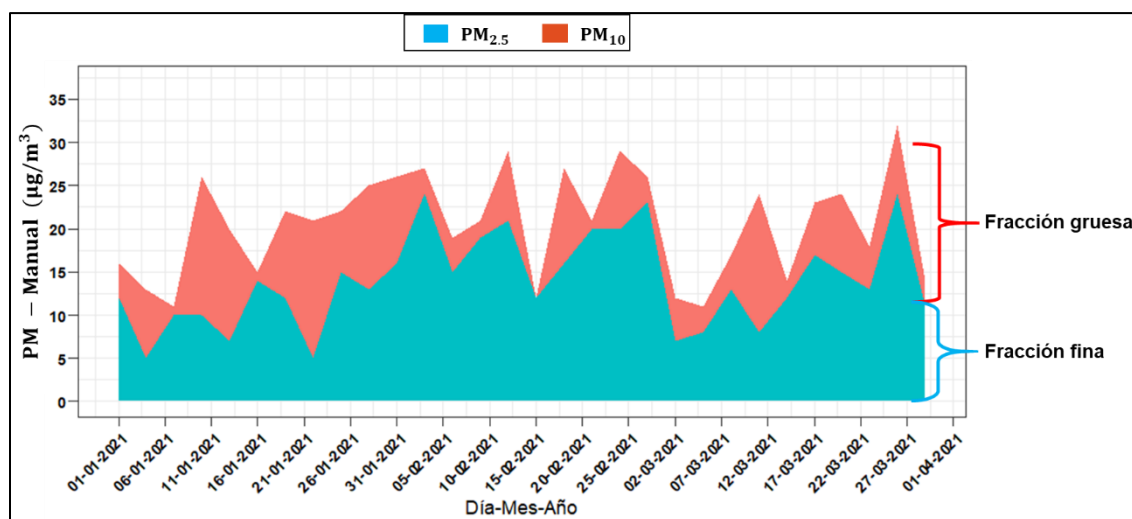


Figura 21. Relación entre el material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales en la estación Gobernación durante el periodo de análisis

5.2. Relación entre los equipos automáticos: Estación Gobernación

La Figura 22 presenta la variación promedio horaria para los contaminantes SO_2 , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$ - Automático y CO en la estación Gobernación para el periodo de análisis. Se observa que el SO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ y CO poseen un comportamiento similar a lo largo del día, presentando picos de máxima concentración en las mismas franjas horarias características de horas de alto tráfico vehicular, comportamiento asociado directamente con las fuentes de emisión cercanas a la estación. Las fuentes móviles son las de mayor contribución de la zona, resultados que sugieren que en Manizales estos son contaminantes primarios producto de la actividad de las fuentes vehiculares.

Por su parte, el O_3 presenta un comportamiento diferente a los contaminantes anteriormente analizados, ya que las mayores concentraciones de O_3 se presentan alrededor del mediodía, horas en que se presenta la mayor radiación solar lo que favorece las reacciones de formación de O_3 . Este comportamiento inverso ha sido observado por otros autores y se le atribuye este fenómeno a las dinámicas de los contaminantes en las reacciones con los precursores del O_3 como los NO_x y COVs , ya sea de manera directa o indirecta (Sharma y colaboradores, 2017; Özbay y colaboradores, 2011).

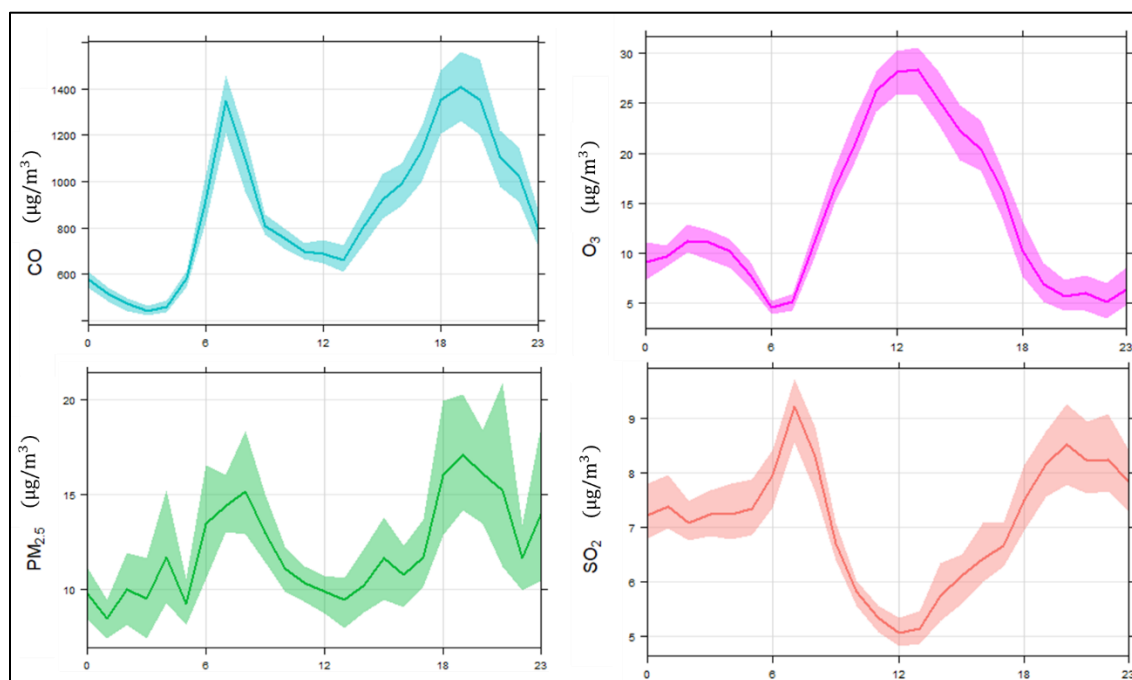


Figura 22. Comparación de perfiles promedio horarios de concentración de CO , O_3 , SO_2 y $\text{PM}_{2.5}$ - Automático en la estación Gobernación (Enero - marzo 2021)

5.3. Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz

Durante el año 2021 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 1100 metros). De estos días se destaca que el 100% de los reportes presentaron predominancia de vientos hacía el occidente y/o noroccidente, ubicación de Manizales, generando una posible afectación a la calidad del aire por esta fuente en la ciudad. Este efecto fue notorio durante febrero, en donde se registraron bajas humedades relativas (77.7 a 87.3%), condiciones que favorecen el transporte de material particulado, como sucedió para los días 27 y 19 de febrero, días que registraron concentraciones diarias de PM_{2.5} de 23 y 19 µg/m³ respectivamente. De manera alternativa, la Figura 23 presenta un ejemplo de imagen satelital tomada por el proyecto "Sentinel 5P/TROPOMI" de la European Space Agency (ESA), para el día 06 de marzo, donde se observa el comportamiento de la pluma del volcán y las altas concentraciones para la columna atmosférica de SO₂ con valores alrededor de las 2 unidades Dobson.

Tabla 8. Resumen de emisiones volcánicas significativas (Altura de la columna de gases superiores a los 1100 m) y posible afectación en concentraciones de PM_{2.5} – Manual Gobernación, durante el periodo de análisis (SGC, 2020).

Fecha	Altura de la columna (m)	Predominancia del viento	Concentración promedio de PM _{2.5} (µg/m ³) – Día posterior de monitoreo (dd/mm)
3-ene	1256	Noroccidente	5 – 04/01
7-ene	1108	Occidente - Noroccidente	10 – 07/01
30-ene	1520	Noroccidente - Suroccidente	16 – 31/01
7-feb	1149	Noroccidente - Occidente	19 – 09/02
26-feb	1154	Noroccidente - Suroccidente	23 – 27/03
6-mar	1328	Occidente	13 – 08/03
14-mar	1217	Occidente - Suroccidente	12 – 14/03
20-mar	2140	Occidente - Suroccidente	15 – 20/03
29-mar	2572	Occidente - Suroccidente	11 – 29/03

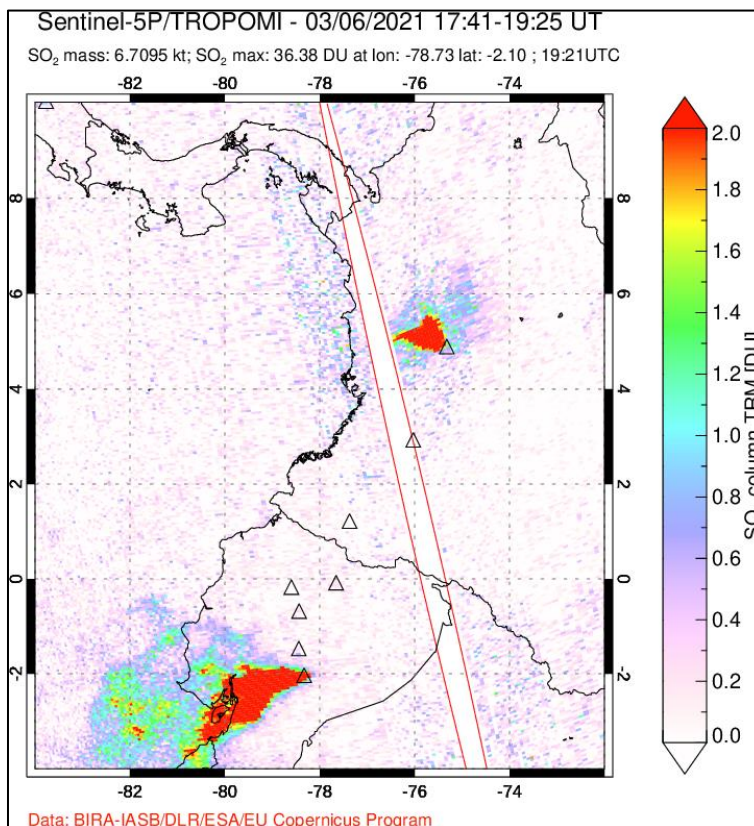


Figura 23. Ejemplo: Comportamiento de columna de SO₂ registradas por el satélite TROPOMI. Sábado 06-Mar-2021

5.4. Imágenes satelitales

De manera similar a los registros de emisiones volcánicas provenientes de imágenes satelitales del dispositivo TROPOMI de la European Space Agency (ESA), se ha explorado la alternativa de visualización de contaminantes criterio mediante el uso de imágenes satelitales. Esta alternativa permite visualizar el panorama sobre el comportamiento de los contaminantes para grandes áreas de interés. El satélite utilizado es nuevamente TROPOMI cuyas imágenes son descargadas del repositorio de la NASA en línea "disc.gsfc.nasa.gov".

La Figura 24 presenta el promedio mensual de la columna atmosférica de CO, NO₂ y O₃ sobre el departamento de Caldas durante los meses de enero y febrero. No se incluye marzo debido al retraso en la disponibilidad de la información correspondiente. De manera general se puede observar que las mayores concentraciones de NO₂, O₃ y CO se presentan hacia la zona oriente del departamento de Caldas, mientras los menores registros son obtenidos para las zonas montañosas, como el parque nacional natural de los nevados. Similarmente a los registros obtenidos en superficie, se identificó un leve aumento en las concentraciones de CO en la región de Manizales. Este hecho también se respalda mediante las mediciones en superficie obtenidas en la estación gobernación, ya que se pasa de una concentración media de 561.0 µg/m³ en el mes de enero, a 813.7 µg/m³ en febrero.

De manera similar la Figura 25 presenta el comportamiento promedio mensual de la columna atmosférica de CO, NO₂ y O₃ sobre el país durante enero y febrero. Se puede identificar allí que el valor medio de la columna atmosférica de CO durante febrero disminuyó, mientras que NO₂ y O₃ aumentaron. Para el caso particular del NO₂, se evidencia la aparición de nuevos focos de contaminación en la zona sur del país, mientras la zona norte presentó una intensificación.

El aumento de las concentraciones de NO₂ en la zona norte del país, y la aparición de nuevos focos en la zona sur (principalmente en los departamentos de Caquetá, Guaviare y meta), se puede explicar por el incremento de incendios en las mencionadas áreas, tal como lo muestran los focos de calor presentados en la Figura 26. De hecho, el norte del país paso de presentar 3333 puntos de calor durante el mes de enero, a 12480 puntos de calor en el mes de febrero. De manera similar, la zona sur del país presenta un elevado número de puntos de calor para el mes de febrero, con alrededor de 22622 focos en los departamentos de Caquetá, Guaviare y Meta.

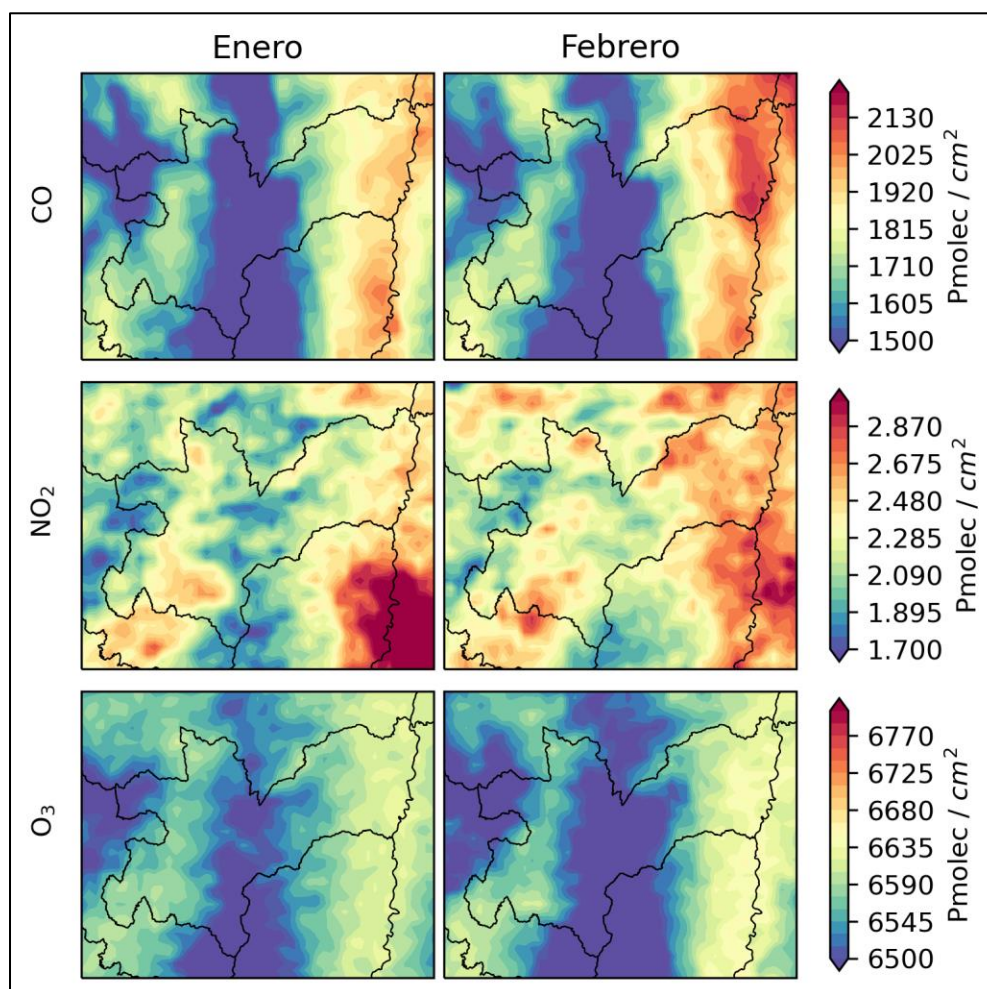


Figura 24. Imágenes satelitales relacionadas al comportamiento de la columna atmosférica promedio de contaminantes: CO, NO₂ y O₃ sobre el departamento de Caldas durante enero y febrero de 2021. Satelite TROPOMI

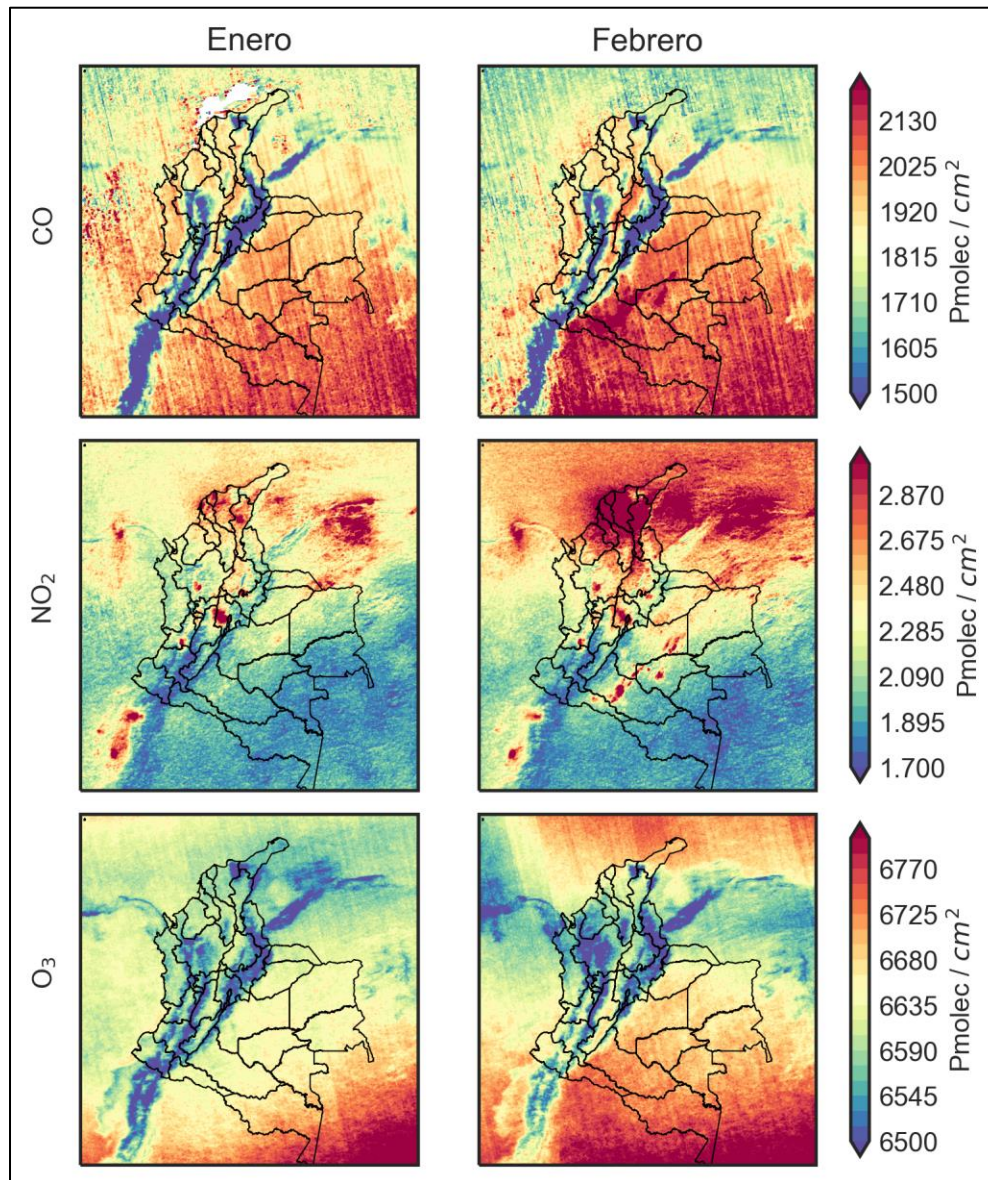


Figura 25. Imágenes satelitales relacionadas al comportamiento de la columna atmosférica promedio de contaminantes CO, NO₂ y O₃ sobre Colombia durante enero y febrero de 2021. Satelite TROPOMI

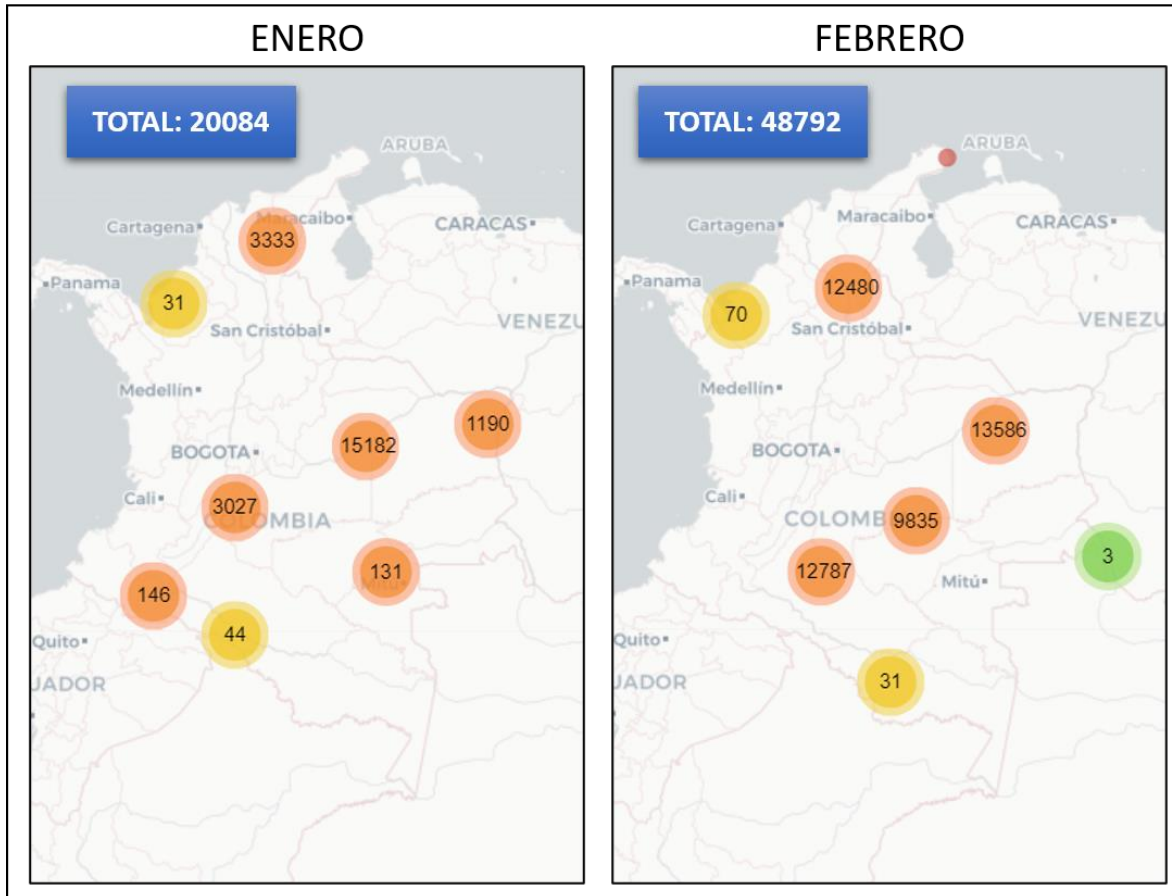


Figura 26. Incendios en Colombia durante los meses de enero y febrero de 2021.
 Tomado de <http://puntosdecalor.ideam.gov.co/>

6. REFERENCIAS

- Berkeley L. Laboratory, 2013. Improving the understanding of PM_{2.5} and ozone chemistry from air quality monitoring for more accurate prediction of power generation impacts. California Energy Commission. California. USA.
- Carslaw, D.C. y Ropkins K., 2015. The openair manual – open source tools for analysing air pollution data. Manual for version 1.1-4. King's college London.
- Cortés, Johana, y otros. 2015. Análisis de datos de calidad del aire en la ciudad de Manizales utilizando Matlab y Operair. [aut. libro] Beatriz Aristizabal, y otros. *Entendimiento de fenómenos ambientales mediante análisis de datos*. Manizales : Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, 2015, págs. 73 - 108.
- 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>.
- González, C.M., Gómez, C.D., Rojas, N.Y., Acevedo, H., Aristizábal, B.H., 2017. Relative impact of on-road vehicular and point-source industrial emissions of air pollutants in a medium-sized Andean city. *Atmospheric Environment*. Vol 152, pp. 279-289. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.12.048>.
- 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 y Desarrollo Sostenible (MADS), 2013. 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.
- Nasa, 2018. *Global sulfur dioxide monitoring home page*. Fuente en línea: [consultado el 02/03/2019]. *Imágenes satelitales tomada de*: <https://so2.gsfc.nasa.gov/>
- 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)
- 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].
- Özbay B., Keskin G., Dogruparmak S., Ayberk S., 2011. Multivariable methods for ground-level ozone modeling. *Atmospheric Reserch*. Vol 105, pp 57-65. DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.06.005
- Servicio geológico colombiano (SGC), 2019. Boletín semanal de actividad del volcán Nevado del Ruiz. Manizales, Caldas. Dirección de geoamenazas.
- Shama A., Mandal T., Shama S., Shukla D., Singh S., 2017. Relationships of surface ozone with its precursors, particulate matter and meteorology over Dheli. *Atmospheric Chemistry*. 74, pp. 451-474. DOI: 10.1007/s10874-016-9351-7
- 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, 2019. 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>
- Zapata C., Gálvez A., González C., Aristizábal B., Velasco M., 2019. Boletín de calidad del aire en Manizales periodo Enero – marzo 2019, [Fuente en línea]. Disponible en: <http://www.corpocaldas.gov.co/publicaciones/543/Informe%20SVCA%20enero-marzo%202019.pdf>