



SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO AMBIENTAL DE CALDAS



BOLETÍN CALIDAD DEL AIRE MANIZALES PERÍODO ENERO - MARZO DE 2020

*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 2020. En el mismo sentido, se presentan los análisis comparativos para los datos registrados durante los primeros días del período de confinamiento por COVID-19. Se realizó el seguimiento de material particulado (PM₁₀, PM_{2.5}) y los gases ozono troposférico (O₃), dióxido de azufre y monóxido de carbono (CO). Se muestran las gráficas resumen obtenidas y tablas de estadísticos básicos (promedio, mínimo, máximo y desviación estándar). Asimismo, se muestran los resultados obtenidos para los índices de calidad del aire.

***Angel David Gálvez Serna, *Jesús Alberto Angulo Cuero, *Carlos Mario González Duque, *Beatriz Helena Aristizábal Zuluaga, **Mauricio Velasco García.**

TABLA DE CONTENIDO

1.	EL SISTEMA DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE EN MANIZALES (SVCA)	2
2.	ANÁLISIS METEOROLÓGICO	4
3.	RESULTADOS MONITOREO DE MATERIAL PARTICULADO: PM₁₀ Y PM_{2.5}.....	8
3.1.	Equipos manuales: análisis de promedios diarios entre enero y febrero del año 2020	8
3.2.	Equipos manuales análisis de promedios entre enero y febrero del año 2020 y comparación preliminar con norma anual	12
3.3.	Análisis comparativo entre promedios de PM ₁₀ y PM _{2.5} en la estación Gobernación.....	14
3.4.	Equipos automáticos: Análisis de promedios entre enero y marzo del año 2020 y comparación de eventos relacionados con días de confinamiento por pandemia del covid-19.....	15
3.5.	Índice de calidad del aire (ICA) para PM ₁₀ y PM _{2.5} en el SVCA de Manizales	19
4.	RESULTADOS MONITOREO DE GASES.....	21
4.1.	Monitoreo de monóxido de carbono (CO)	21
4.2.	Monitoreo de dióxido de azufre (SO ₂).....	23
4.3.	Monitoreo de ozono troposférico (O ₃).....	25
4.4.	índices de calidad del aire (ICA) para CO, SO ₂ y O ₃	27
5.	ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS	28
5.1.	Emissiones volcánicas	28
5.2.	Incendio forestales	29
5.3.	Relación entre los equipos automáticos, ejemplo estación gobernación.....	29
6.	REFERENCIAS	30

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

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 por sus impactos en el recurso aire en zonas urbanas y ecosistemas naturales, se destacan el material particulado (PM), además de gases como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y ozono troposférico (O₃).

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 un insumo para establecer medidas de prevención donde la calidad del aire sea catalogada como perjudicial para la salud. Los datos obtenidos en la red de monitoreo de calidad del aire alimentan las bases de datos del CDIAC (Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas) y el SISAIRE del IDEAM. El CDIAC, por medio de la página web **<http://cdiac.manizales.unal.edu.co/indicadores/public/index>**, 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.

Actualmente en la ciudad de Manizales se cuenta con un SVCA conformado por ocho (8) equipos para el monitoreo de material particulado aplicando técnicas de monitoreo activo: Cinco (5) equipos manuales de PM₁₀, uno (1) de PM_{2.5} y dos (2) equipos automáticos (nefelómetros) que miden simultáneamente PM₁₀ y PM_{2.5}. El SVCA de Manizales también cuenta con una estación automática para el monitoreo de los gases SO₂, O₃ y CO. Esta red es operada actualmente 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 Figura 1 muestra la ubicación de las estaciones de monitoreo sobre el área urbana de la ciudad y la Tabla 1 presenta las características principales de cada estación.

El seguimiento de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) en Manizales se realiza mediante técnicas de monitoreo activas. En el caso de los equipos activos manuales, éstos permiten 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, los equipos activos automáticos de PM₁₀ y PM_{2.5}; y para el seguimiento de gases (O₃ y CO), permiten la obtención de registros cincominutales 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, actualmente la Resolución 2254 de 2017 (MADS, 2017).

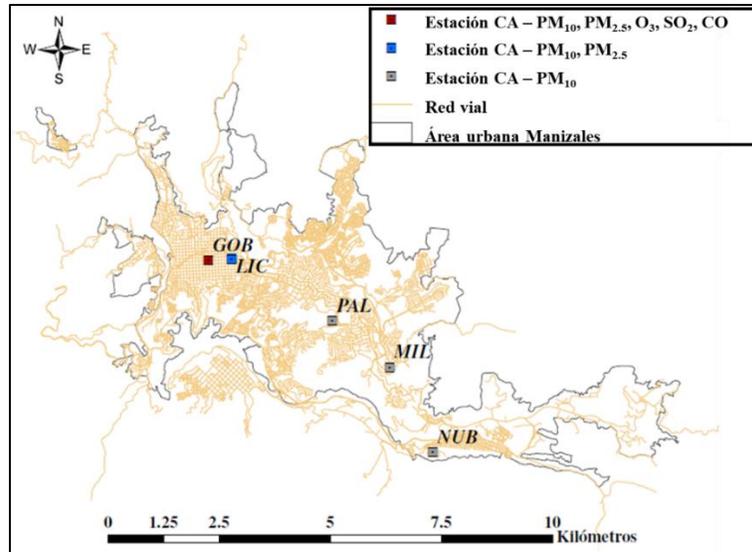


Figura 1. Mapa de Manizales con ubicación de las estaciones de calidad del aire.

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	Detenido tras cuarentena.	N 5° 4' 6.53" W 75° 31' 1.54"	2155
		PM _{2.5} - Manual ^a	Corpocaldas	2009	2009	Detenido tras cuarentena.		
		SO ₂ - Automático	UN	2014	Desde el 2020, problemas de estabilización.	Operación óptima.		
		O ₃ - Automático	UN	2014	Salió de operación durante los años 2016-2017 por fallas.	Operación óptima.		
		CO - Automático	Corpocaldas	2014	2018 – 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	Detenido tras cuarentena.	N 5° 3' 22.4" W 75° 29' 31.3"	2154
Nubia	ZSE, SR – BTV, AZI	PM ₁₀ - Manual ^c	UN	2009	2017 – En la red.	Detenido tras cuarentena.	N 5° 1' 47.0" W 75° 28' 18"	2091
Liceo	CU, SC – ATV, PAI	PM ₁₀ - Manual ^c	Corpocaldas	2000	2010 – En la red.	Detenido tras cuarentena.	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	Detenido tras cuarentena.	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.

2. ANÁLISIS METEOROLÓGICO

La Tabla 2 presenta los consolidados meteorológicos de la estación Hospital de Caldas de la ciudad de Manizales para los meses de enero a marzo de 2020, así como los promedios consolidados para el primer trimestre de los años 2019 y 2020, con el fin de realizar un análisis comparativo con el año anterior. Esta estación es elegida como punto de referencia debido a que es una estación que ha presentado registros estables durante el tiempo de medición, además de que su ubicación en el centro geográfico de Manizales y una altura de más de 10m (sobre la terraza del edificio del Hospital de Caldas). Estas características permiten considerarla como una estación de tipo mesoescala representativa para la mayoría de las variables meteorológicas. No obstante, se aclara que todas las concentraciones estimadas para las estaciones de calidad del aire de la red se calculan con base en los datos de las estaciones meteorológicas más cercanas.

Durante el primer trimestre del 2020 se observa de enero a marzo el incremento mensual en los niveles de precipitación, indicando el final de la primera temporada de bajas precipitaciones (período seco), y registrando para todo el trimestre una precipitación acumulada de 292 mm. Para el caso de la temperatura del aire y los máximos de radiación solar, se registraron los mayores promedios en el mes de febrero con 19.1° y 1202 W/m² respectivamente. Por su parte la humedad relativa se relaciona de forma directa con las precipitaciones e inversa con la temperatura y radiación solar. Al comparar el primer trimestre del año 2020 con el mismo período del 2019, se presentó un incremento en la temperatura del aire de 0.5° y una reducción de la precipitación acumulada con un valor del 60%, representando una diferencia de precipitaciones de 232.4 mm.

De manera alternativa se presentan las Figura 2 y Figura 3 con el comportamiento promedio mensual de algunas variables meteorológicas de las estaciones más cercanas a las estaciones de calidad del aire, allí se aprecia como el comportamiento de las variables a lo largo de la ciudad es estable. Se destaca además que la ciudad cuenta con patrones de viento definidos y velocidades de viento bajas que impiden una rápida dispersión de los contaminantes. En la Figura 4 se presentan las rosas de vientos diarias observadas a lo largo de la ciudad para lo corrido del año 2020.

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 NO_x), emitidos directamente por fuentes antropogénicas y naturales. La humedad en el aire y la lluvia también tiene una influencia especialmente con el material particulado, el aumento de la humedad relativa se asocia al aumento en la humedad de las partículas, por consiguiente, el aumento de 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 influencia la concentración de contaminantes de forma inversa, ya 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 para las variables de la estación meteorológica Hospital de Caldas

Período (Año)	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 Radiación Solar (W/m ²)
Ene. - (2020)	18.8	1.4	156.1	594.7	77.0	61.8	364.9	1164
Feb. - (2020)	19.1	1.3	146.1	594.4	77.6	86.2	328.5	1202
Mar. (2020)	18.7	1.4	164.7	595.4	79.7	144.0	334.5	985
Ene. - Mar. (2020)*	18.9	1.4	155.6	594.8	78.1	292.0	342.6	1117.0
Ene. - Mar. (2019)*	18.4	1.3	141.5	594.7	80.4	524.4	258.2	1110.0

*Correspondiente al promedio entre el 1 de enero y el 30 de marzo de 2019 y 2020.

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

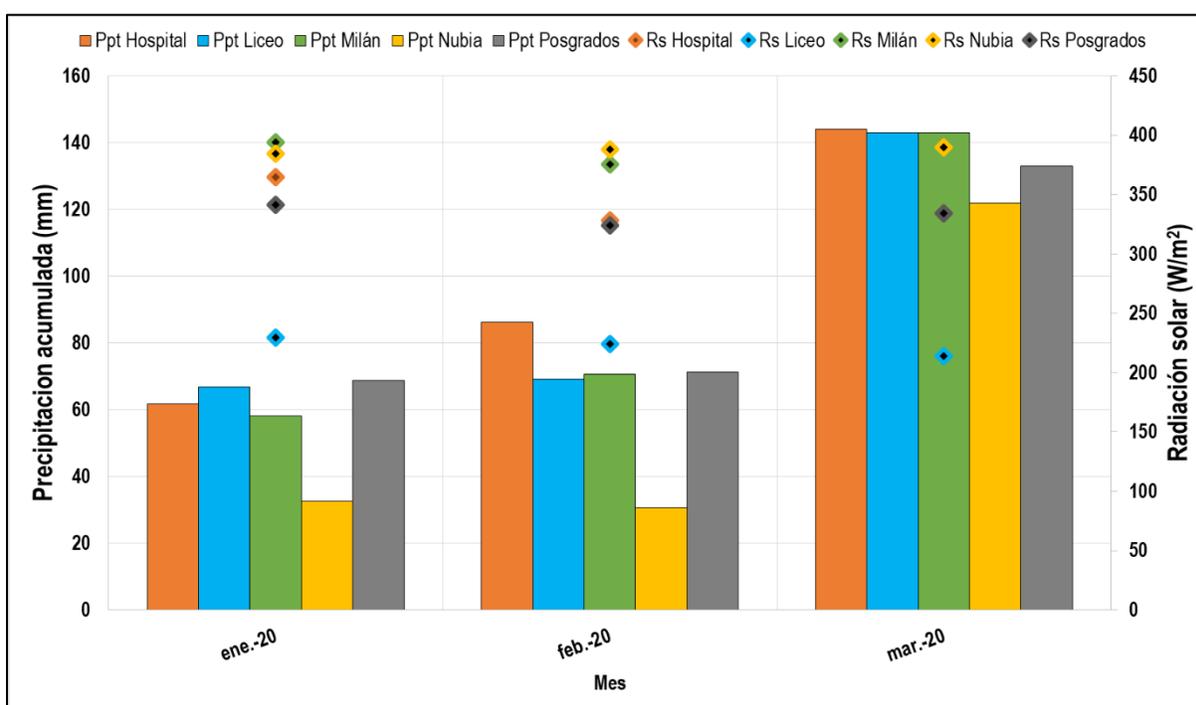


Figura 2. Promedios mensuales de precipitación y radiación solar en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante el año 2020.

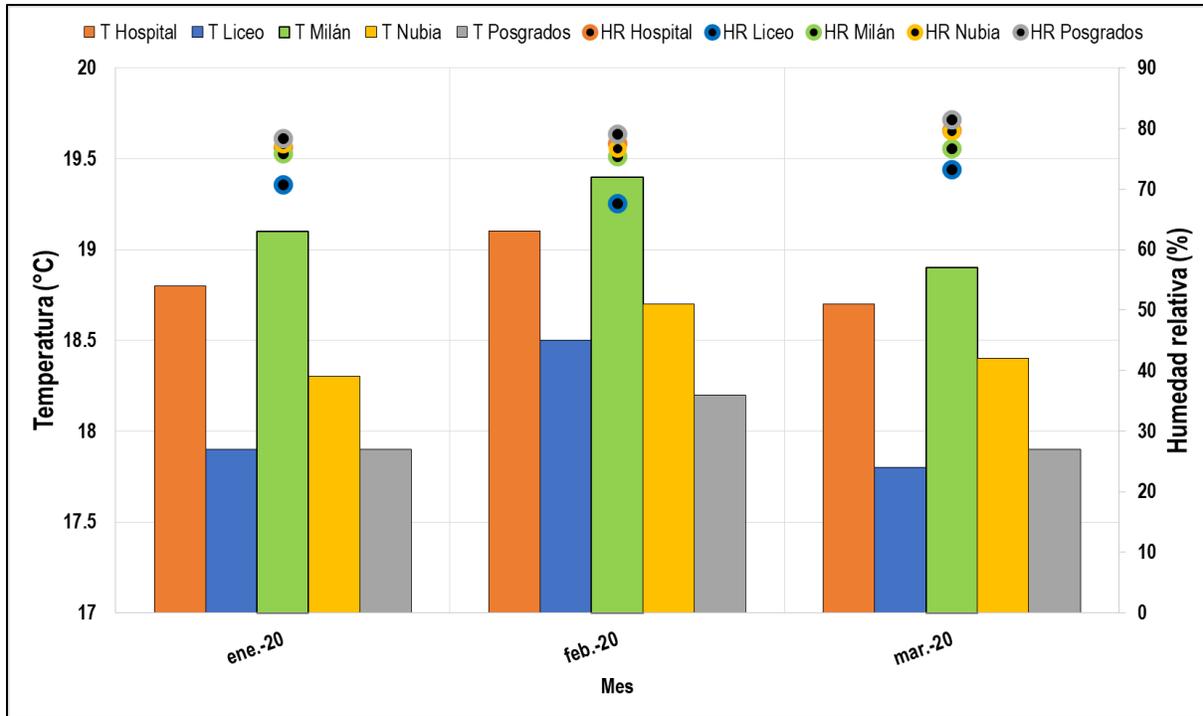


Figura 3. Promedios mensuales de temperatura del aire y humedad relativa en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante el año 2020.

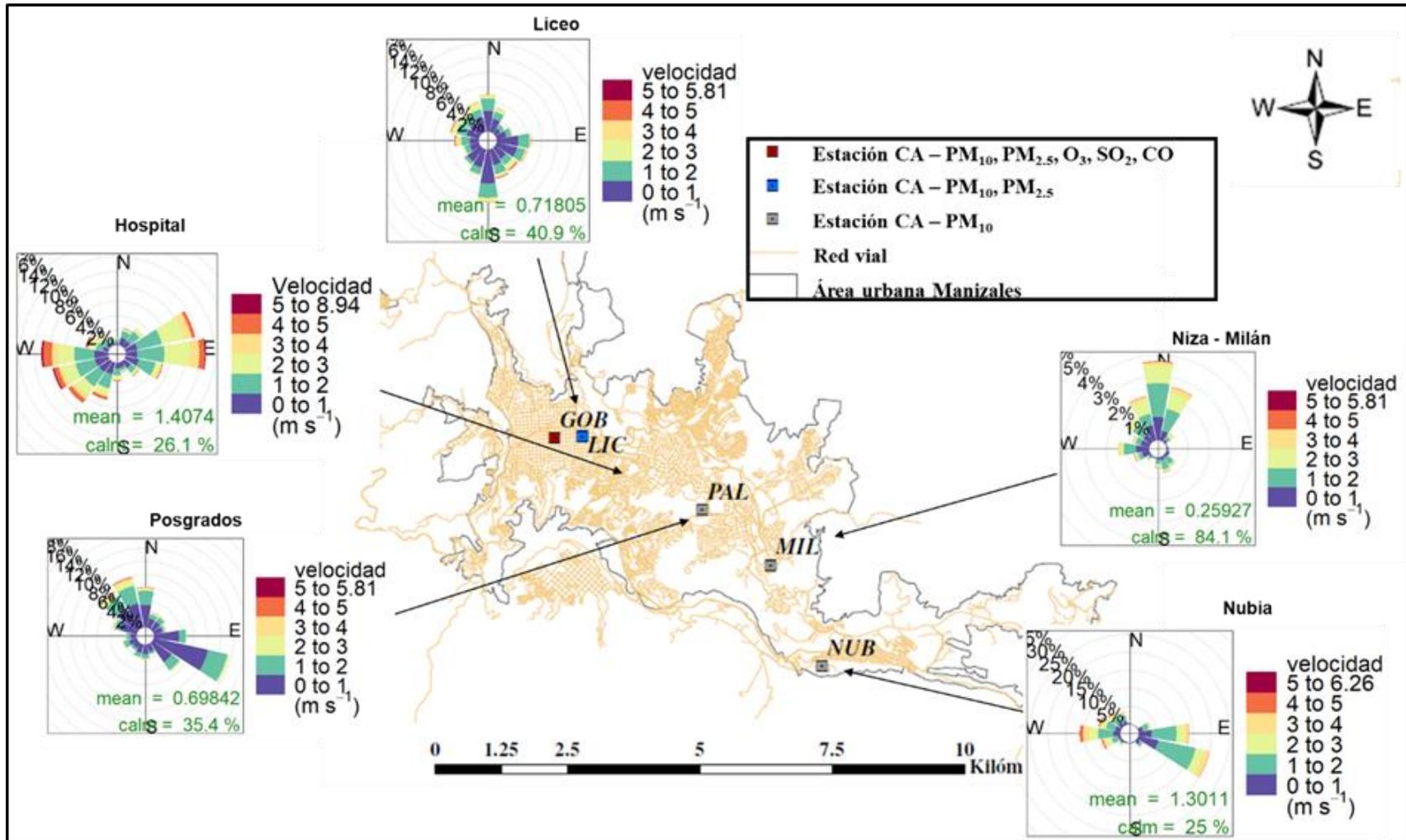


Figura 4. Ubicación de las estaciones meteorológicas más próximas a las estaciones de calidad del aire y sus respectivas rosas de vientos diarias durante el año 2020.

3. RESULTADOS MONITOREO DE MATERIAL PARTICULADO: PM₁₀ y PM_{2.5}

3.1. Equipos manuales: análisis de promedios diarios entre enero y febrero del año 2020

En la Tabla 3 se presentan los estadísticos descriptivos para las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} manuales obtenidas durante el período de análisis (enero-febrero de 2020) y su comparativo con el mismo período de los años 2018 y 2019. Se muestra el promedio aritmético con su respectiva incertidumbre asociada, desviación estándar, concentración mínima, concentración máxima, el percentil 95 y el número de datos obtenidos. 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 equipos de PM – Manuales operaron durante el mes de marzo con normalidad hasta el 18 de marzo, no obstante, debido a las medidas de cuarentena no se pudo llevar a cabo el procedimiento necesario para el cálculo de la concentración de PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales, motivo por el cual no serán presentados resultados para ese mes en el presente boletín.

Los resultados de la Tabla 3 muestran que para los meses de enero y febrero del año 2020 las estaciones de Milán y Liceo registraron las concentraciones más altas de PM₁₀ en toda la ciudad, el mismo comportamiento que se ha observado para los años 2018 y 2019. En el año 2020 la estación Milán presentó los mayores niveles de concentración de PM₁₀ con promedios aritméticos de 32 µg/m³ (desv. std = 7 µg/m³) y 42 µg/m³ (desv. std = 7 µg/m³) en enero y febrero respectivamente; seguida por la estación Liceo con valores de 24 µg/m³ (desv. std = 3 µg/m³) y 37 µg/m³ (desv. std = 8 µg/m³) para los mismos meses. En el año 2019 los valores más altos los presentó la estación Liceo con promedios de 30 µg/m³ (desv. std = 7 µg/m³) y 33 µg/m³ (desv. std = 9 µg/m³) para enero y febrero respectivamente, al igual que en el 2018 en donde se obtuvieron para la misma estación promedios aritméticos con valores de 32 µg/m³ (desv. std = 6 µg/m³) y 28 µg/m³ (desv. std = 8 µg/m³) para el mismo período. Por su parte Milán aumentó en 2020 con respecto al 2019 con promedios de 28 µg/m³ (desv. std = 7 µg/m³) y 32 µg/m³ (desv. std = 7 µg/m³) para enero y febrero respectivamente, como posible causa se presentan las múltiples tareas de construcción que se realizan en la zona industrial de la zona.

Históricamente el SVCA de Manizales ha registrado valores más altos de contaminación en la estación Liceo (Zapata y colaboradores, 2019), posiblemente influenciados por el tráfico vehicular característico de esta zona, con un flujo importante de buses y camiones que tienen un uso en 100% de diésel como combustible, asociado directamente a la emisión del contaminante PM₁₀. Sin embargo, para los dos primeros meses del año 2020 se han presentado los mayores niveles de contaminación en la estación Milán, los cuales pueden ser ocasionados por la influencia de la actividad industrial y el tráfico vehicular presentado en este sector, principalmente por la Avenida Kevin Ángel, caracterizado por alto flujo de vehículos particulares, así como de buses y camiones, estos últimos tienen especial importancia en la zona por la actividad industrial del sector. A pesar de que la flota de buses y camiones corresponde al 3.2% del total de vehículos de la ciudad, este tipo de vehículos que empleandíesel como combustible, son responsables del 47% (362 ton/año) y 25% (192 ton/año) respectivamente del total de emisiones de PM₁₀ producto de la actividad de la flota vehicular en la ciudad (González y colaboradores, 2017).

Tabla 3. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio de PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales (µg/m³) durante el período enero y febrero del año 2020 y su comparativo con 2019 y 2018.

Estadístico*	Año 2020		Año 2019		Año 2018		Año 2020		Año 2019		Año 2018	
	Ene.	Feb.	Ene.	Feb.	Ene.	Feb.	Ene.	Feb.	Ene.	Feb.	Ene.	Feb.
Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar)							Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar)					
Promedio ± Incertidumbre**	21	26	20	20	26	22	16	18	13	13	15	9
Desviación Estándar	8	6	6	4	8	9	3	4	5	3	3	4
Min. – Max.	12-41	19-37	10-28	13-29	13-33	9-41	11-21	12-26	7-15	10-18	11-19	5-14
Percentil 95%	33	35	28	27	33	38	---	---	---	---	---	---
N° Datos	10	7	10	10	10	10	10	10	10	10	9	10
Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar)							Milán PM₁₀ (µg/m³ estándar)					
Promedio ± Incertidumbre**	24	37	30	33	46	39	32	42	28	32	32	28
Desviación Estándar	3	8	7	9	9	15	7	7	8	9	6	8
Min. – Max.	15-34	24-49	18-40	17-41	27-56	15-57	21-37	33-53	17-40	14-45	24-42	17-43
Percentil 95%	33	48	38	41	56	56	37	51	39	42	41	39
N° Datos	10	8	9	8	10	9	5	7	10	10	10	9
Palogrande PM₁₀ (µg/m³ estándar)							Nubia PM₁₀ (µg/m³ estándar)					
Promedio ± Incertidumbre**	22	28	19	24	21	20	20	27	19	25	22	23
Desviación Estándar	4	7	5	7	3	7	7	6	6	7	5	8
Min. – Max.	16-29	18-39	11-25	14-33	16-27	8-31	9-30	17-37	9-28	15-35	16-30	11-34
Percentil 95%	28	37	25	32	25	30	28	35	27	35	28	32
N° Datos	9	8	10	10	10	10	9	8	10	10	10	10

* 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.

En las estaciones de PM₁₀ La Nubia, Gobernación y Palogrande, se observó que en general registraron menores concentraciones durante el período evaluado, con promedios respectivamente para enero y febrero de 21 µg/m³ (desv. std = 8 µg/m³) y 26 µg/m³ (desv. std = 6 µg/m³) en Gobernación, 20 µg/m³ (desv. std = 7 µg/m³) y 27 µg/m³ (desv. std = 6 µg/m³) en La Nubia y, 22 µg/m³ (desv. std = 4 µg/m³) y 28 µg/m³ (desv. std = 7 µg/m³) en Palogrande; siendo además la estación de La Nubia

la que registró la mínima concentración en toda la red con valores de $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ los días jueves 02 de enero y domingo 26 de enero. El primer día (02 de enero) se registraron concentraciones bajas en todas las estaciones con $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Gobernación y $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Liceo, valores posiblemente asociados a los eventos de lluvia del 31 de diciembre del 2019, donde la atmósfera es lavada y las partículas suspendidas en el aire son llevadas a tierra con el agua, este fenómeno es conocido como *Scavenging*, además, el día 01 de enero es festivo, por lo tanto, el flujo vehicular es bajo lo que genera al día siguiente baja carga de contaminantes; el segundo día (26 de enero) también se registraron bajas concentraciones en las demás estaciones con valores de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Liceo y $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Palogrande, valores posiblemente relacionados a que esa fecha corresponde a un día domingo, en donde las concentraciones disminuyen producto del bajo flujo vehicular.

En lo referente al monitoreo de $\text{PM}_{2.5}$, se registró un promedio de $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para enero y febrero respectivamente, un mínimo de $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un máximo de $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ presentado el sábado 13 de febrero, día en el cual se obtuvo una alta concentración en la estación Gobernación PM_{10} con un valor de $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$, razón por la cual no se descarta la posible influencia por aumento del tráfico vehicular para esta estación, en especial de vehículos pesados (buses y camiones) relacionados con emisiones de estos contaminantes. Se observó que los valores promedio de $\text{PM}_{2.5}$ para enero y febrero de 2020 se encuentran por encima en un 7% y 50% de los valores promedio para los mismos meses de los años 2018 y 2019 respectivamente, lo cual es posiblemente causado por la disminución de la precipitación acumulada, la cual para los tres primeros meses del año 2020 disminuyó 44.5 % con respecto al mismo período del año 2019.

Si se comparan los promedios obtenidos para el período analizado del presente año con el mismo período para años anteriores, la estación de Milán presentó para febrero de 2020 un aumento de 50% y 31% con respecto a los años 2018 y 2019 respectivamente, lo cual puede ser derivado de las obras de construcción en la empresa "Invermec" que pueden estar alterando los niveles de concentración, por lo que se hace necesario aclarar el tipo de estación considerándose ésta como "Industrial". Las demás estaciones presentaron también un ligero aumento en el 2020 con respecto a los años 2018 y 2019, por lo tanto no se descarta además el posible efecto de un fenómeno a escala regional relacionado con los incendios forestales que han ocurrido desde el mes de febrero en la Orinoquía Colombo-Venezolana, el Sumapaz y la zona caribe Colombiana, acrecentados por la temporada de bajas lluvias, los cuales han afectado la calidad de aire en otras ciudades como Bogotá y Medellín durante los primeros meses del año 2020, ver sección 5.2.

Finalmente, con la información observada se puede inferir que en lo corrido del año 2020 la mayoría de las estaciones presentaron un aumento con respecto al año 2019, posiblemente relacionado con la disminución en los niveles de precipitación, el cual de enero-marzo del año 2020 tuvo un valor promedio de 292.2 mm decreciendo un 44% comparado con el período de enero-marzo del año 2019 (524.4 mm), además, los incendios forestales previamente descritos pudieron aumentar las concentraciones registradas.

Se presentan las figuras de evolución temporal de concentraciones diarias presentadas para PM₁₀ (Figura 5) y PM_{2.5} (Figura 6), destacando 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).

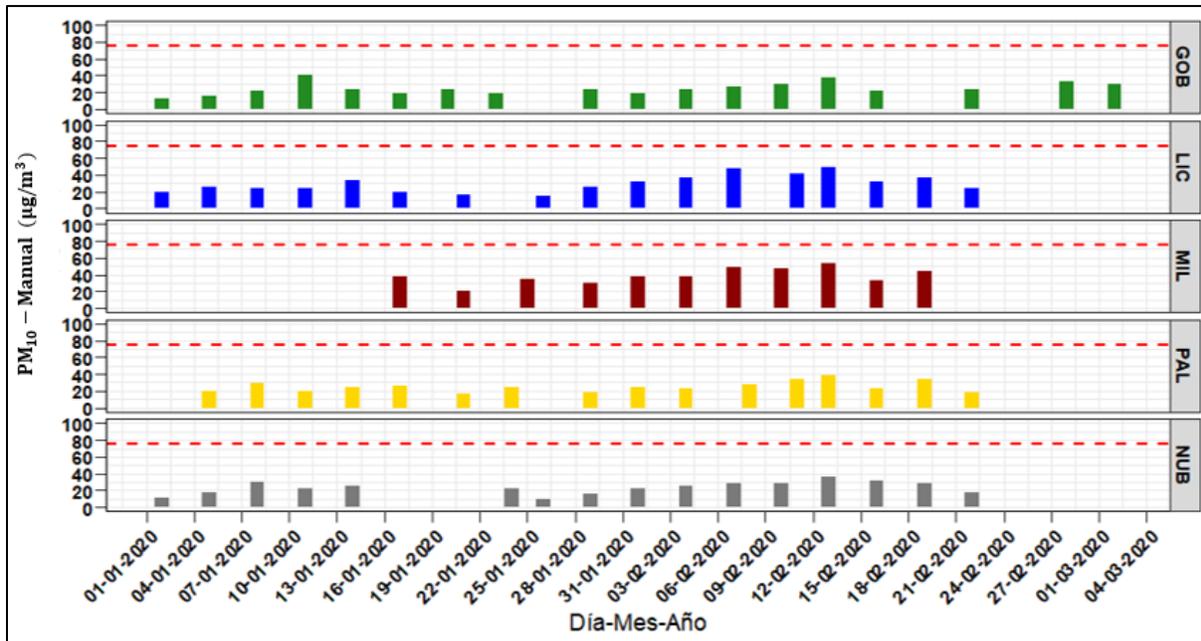


Figura 5. Evolución temporal de concentraciones de PM₁₀ - Manual durante el período enero y marzo del año 2020. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM₁₀ establecido en la Resolución 2254 de 2017 = 75 µg/m³.

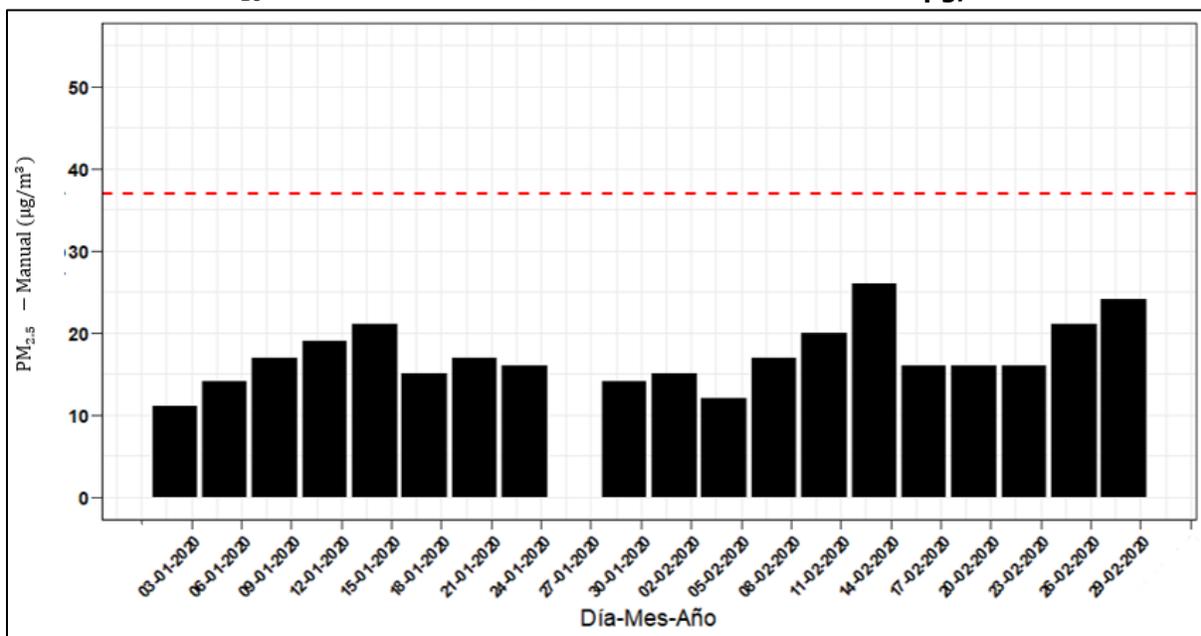


Figura 6. Evolución temporal de concentraciones de PM_{2.5} - Manual durante el período enero y febrero del año 2020. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM_{2.5} establecido en la Resolución 2254 de 2017 = 37 µg/m³.

3.2. Equipos manuales análisis de promedios entre enero y febrero del año 2020 y comparación preliminar con norma anual

Se realizó un ejercicio de comparación del promedio aritmético obtenido para las concentraciones de PM_{10} (Figura 7) y $PM_{2.5}$ (Figura 8) para el período de análisis (enero – febrero de 2020). Lo anterior con el fin de analizar de forma preliminar las diferencias con respecto a los límites normativos anuales establecidos en la Resolución 2254 de 2017 para PM_{10} ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y $PM_{2.5}$ ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). En ninguna de las estaciones se ha superado la norma anual colombiana. Sin embargo, es importante destacar que en el caso de PM_{10} , los promedios obtenidos en todas las estaciones superan la recomendación propuesta por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedio anual. Lo mismo sucedió con el $PM_{2.5}$, para el cual se supera la recomendación de promedio anual de la OMS establecida en $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

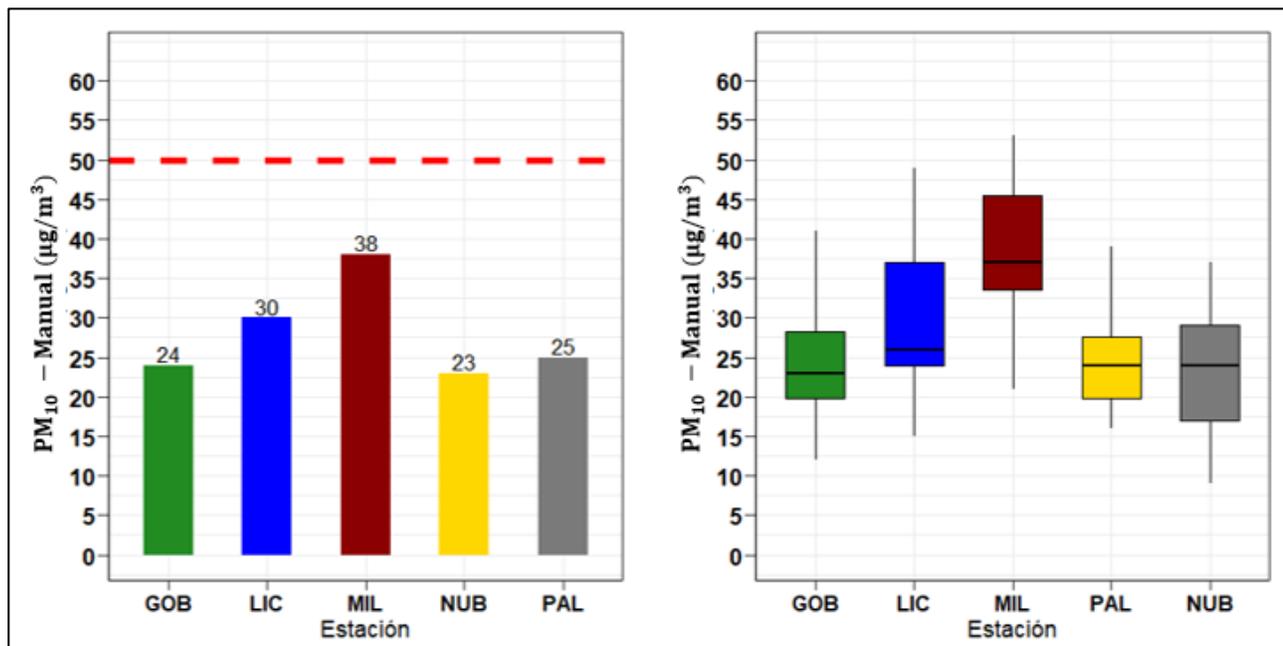


Figura 7. Diagrama de cajas (derecha) y concentración promedio de estaciones de PM_{10} - Manual (izquierda) durante el período enero y febrero del 2019. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS = $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En la Figura 9 se presenta la variación promedio de concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ por días de la semana en las estaciones de la ciudad. En ésta se observa 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. En las estaciones Liceo y Gobernación, los días lunes presentan una concentración media menor a las registradas en los demás días laborales, comportamiento que se asocia al efecto de un remanente de atmósfera limpia producto de la disminución de concentración obtenida durante el domingo. Por su parte las estaciones Nubia y Palogrande presentan esta disminución los sábados y domingos, fenómeno asociado a la zona de influencia de cada estación, siendo ambas zonas Universitarias, cuya actividad disminuye los fines de semana. Finalmente, la estación Milán presenta únicamente una disminución notable para el día domingo, asociado directamente a la actividad industrial del sector y disminución del tráfico vehicular.

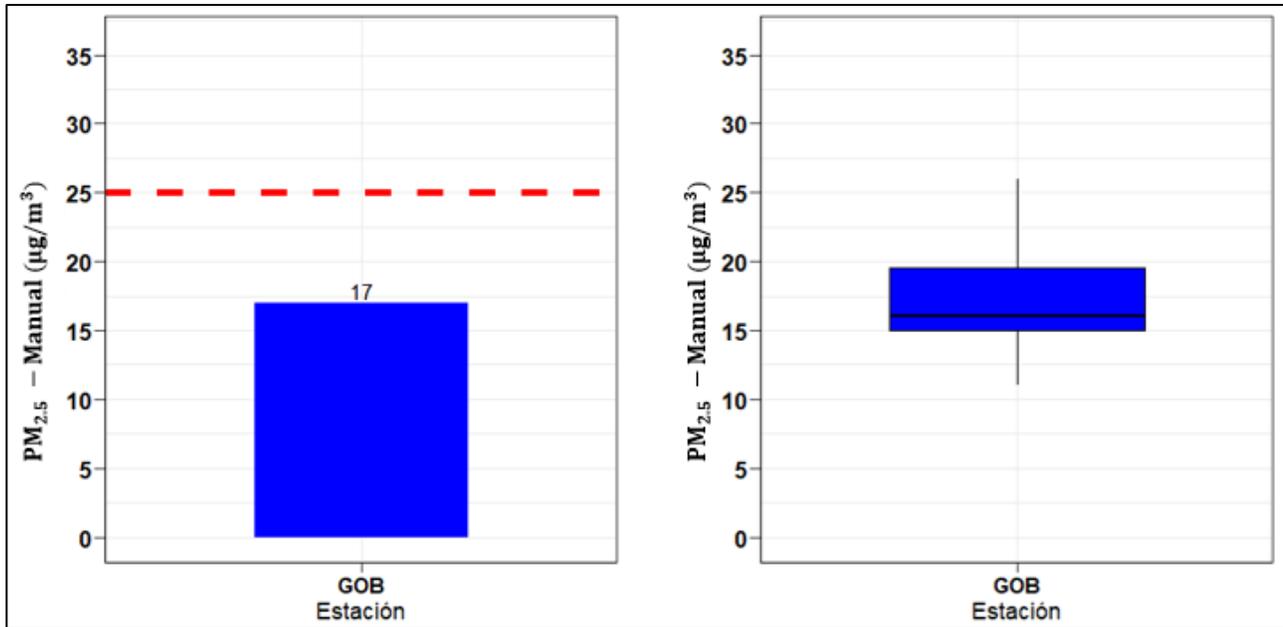


Figura 8. Diagrama de cajas (derecha) y concentración promedio de estaciones de $PM_{2.5}$ - Manual (izquierda) durante el período enero y febrero del 2020. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS = $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

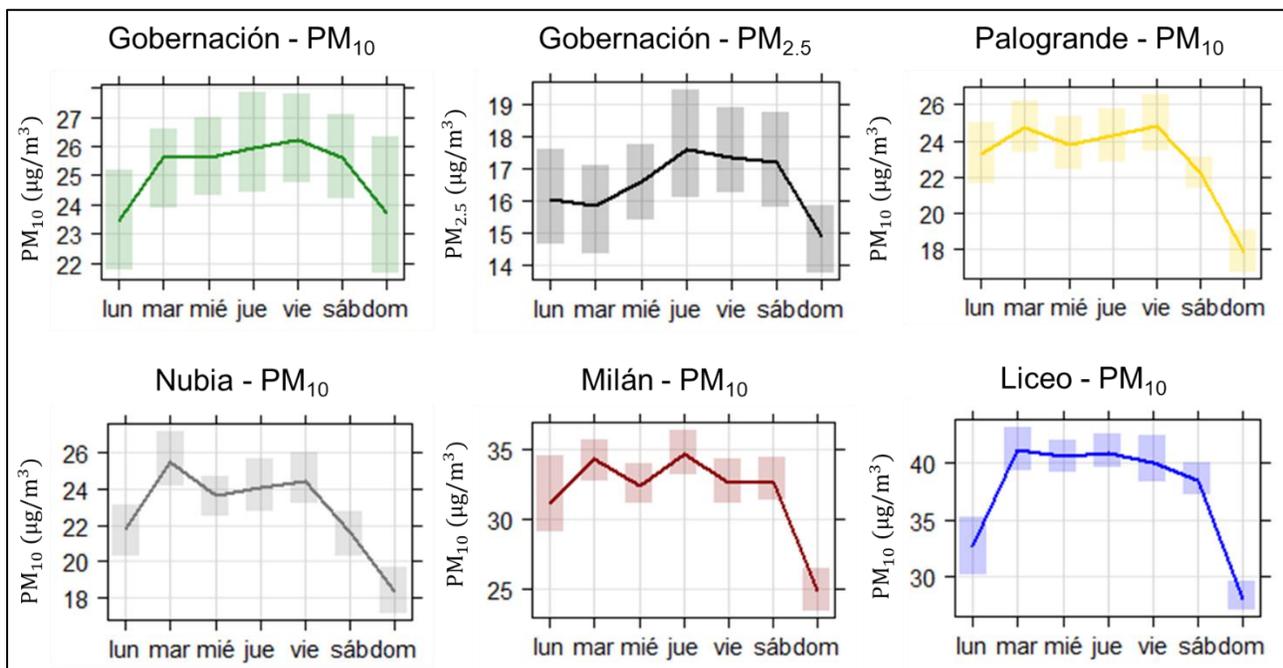


Figura 9. Variación por días de la semana de concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ - Manuales durante el período enero y febrero del 2020. La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%.

3.3. Análisis comparativo entre promedios de PM₁₀ y PM_{2.5} en la estación Gobernación

Actualmente, en la estación Gobernación se encuentran juntos los equipos de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} - Manuales, 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 a aquellas con un diámetro aerodinámico entre 2.5 y 10 µm; las partículas finas tienen diámetro menor que 2.5 µm. Es importante observar que el PM_{2.5} es una parte del PM₁₀.

En la Figura 10 se presentan la relación entre las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} - Manuales obtenidas en la estación Gobernación en enero y febrero del año 2020. 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 un promedio del 66%, 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).

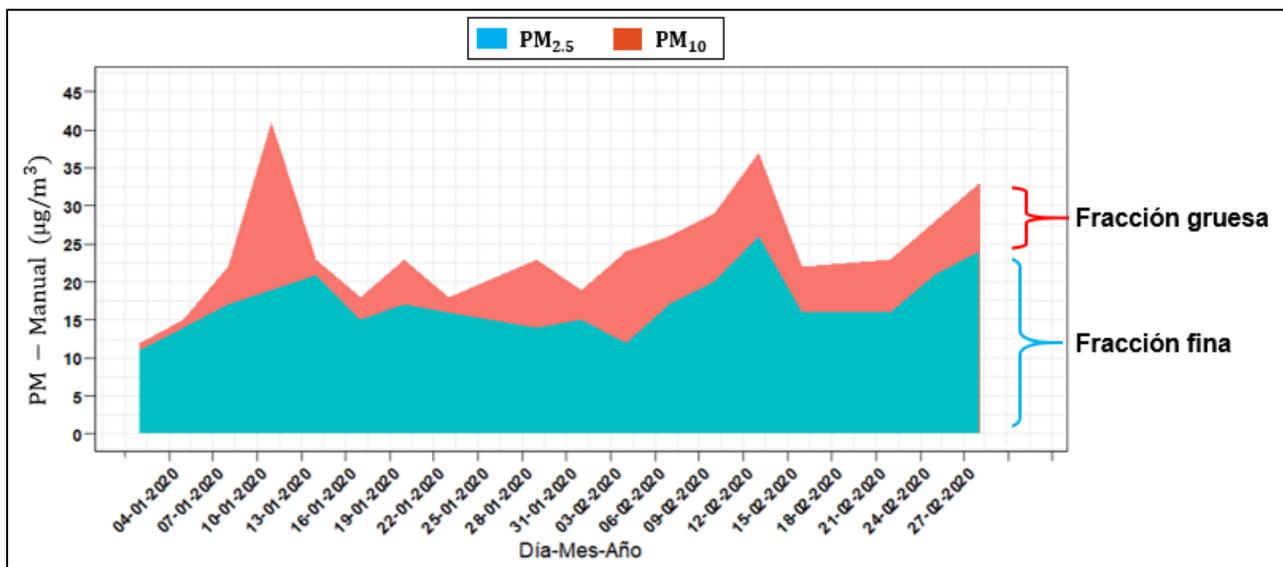


Figura 10. Relación entre el material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} - Manuales en la estación Gobernación durante el período enero y febrero del 2020.

3.4. Equipos automáticos: Análisis de promedios entre enero y marzo del año 2020 y comparación de eventos relacionados con días de confinamiento por pandemia del covid-19

Cabe resaltar los cambios en las dinámicas de la ciudad que ha provocado la pandemia del COVID-19 durante el mes de marzo del presente año, en donde se presentó una normalidad económica hasta el lunes 16 de marzo. A partir de la noche del 16 se decretó una medida de restricción de movilidad nocturna que impedía a las personas salir después de las 7 de la noche, esta medida continuó hasta el viernes 20 día en el que se modificó la orden de restricción a un toque de queda obligatorio hasta la madrugada del martes 24. Esta medida se complementó con la cuarentena obligatoria del gobierno nacional, en donde se restringió la libre movilidad durante todo el día con algunas excepciones contempladas como la circulación de algunos vehículos de carga, transporte público y vehículos particulares que aplican a personal de salud, distribución de bienes básicos, prestación de servicios básicos, entre otros. Se resalta que para el fin de semana comprendido entre el 21 y 23 de marzo a diferencia de los demás días del mes, existió una ausencia casi total de los medios de transporte motorizados como vehículos particulares, camiones y buses del transporte público.

En la Tabla 4 y Tabla 5 se presentan los estadísticos descriptivos comparativos de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos de las estaciones Gobernación y Liceo durante el período de análisis, siendo este dividido además entre las diferentes dinámicas presentadas a lo largo del mes de marzo con el objetivo de identificar los posibles impactos asociados a cada condición de movilidad. Se evidenció como las concentraciones en aire ambiente de ambos contaminantes venían en aumento desde enero hasta los primeros quince días de marzo. Se identificó que durante el cese total de las actividades entre el 21 y 23 de marzo, se registraron las menores concentraciones del año con promedios menores en un 62% (11.6 µg/m³) y 58% (16.4 µg/m³) para PM₁₀ en las estaciones Gobernación y Liceo, comparados con el promedio anual de cada estación. Para PM_{2.5} esta reducción fue del 60% (7.4 µg/m³) y 58% (8.3 µg/m³) en Gobernación y Liceo respectivamente. Para la primera medida de restricción de movilidad nocturna entre el 16 y 20 de marzo, no se observó un cambio significativo en las concentraciones registradas comparado con los primeros quince días del mes de marzo de libre movilidad.

Desde el 24 de marzo cuando inició la cuarentena nacional (con transporte público movilizándose en la ciudad), las concentraciones registradas regresaron a promedios cercanos a los que se observaron durante febrero y los primeros quince días de marzo donde se tenía normalidad. Se observa entonces que las concentraciones en aire ambiente de este contaminante en la ciudad están fuertemente asociadas al servicio de transporte público (buses, colectivos y busetas), que desde el 24 de marzo han ofrecido su servicio desplegando un 20% de la flota disponible en tres horarios del día comprendidos entre las 5:00 - 8:00 am, 11:30 am - 2:00 pm y 4:30 - 7:00 pm, mientras el transporte público individual (taxi) ha ofrecido su servicio durante las 24 horas (BC noticias, 2020); y sumado a ello las condiciones de baja precipitación acumulada (17.6 mm) potencian este fenómeno. Se aclara que el 65% de las lluvias mencionadas anteriormente se concentraron en un evento de lluvia de gran intensidad ocurrido el 29 de marzo que registró una precipitación acumulada de 11.4 mm.

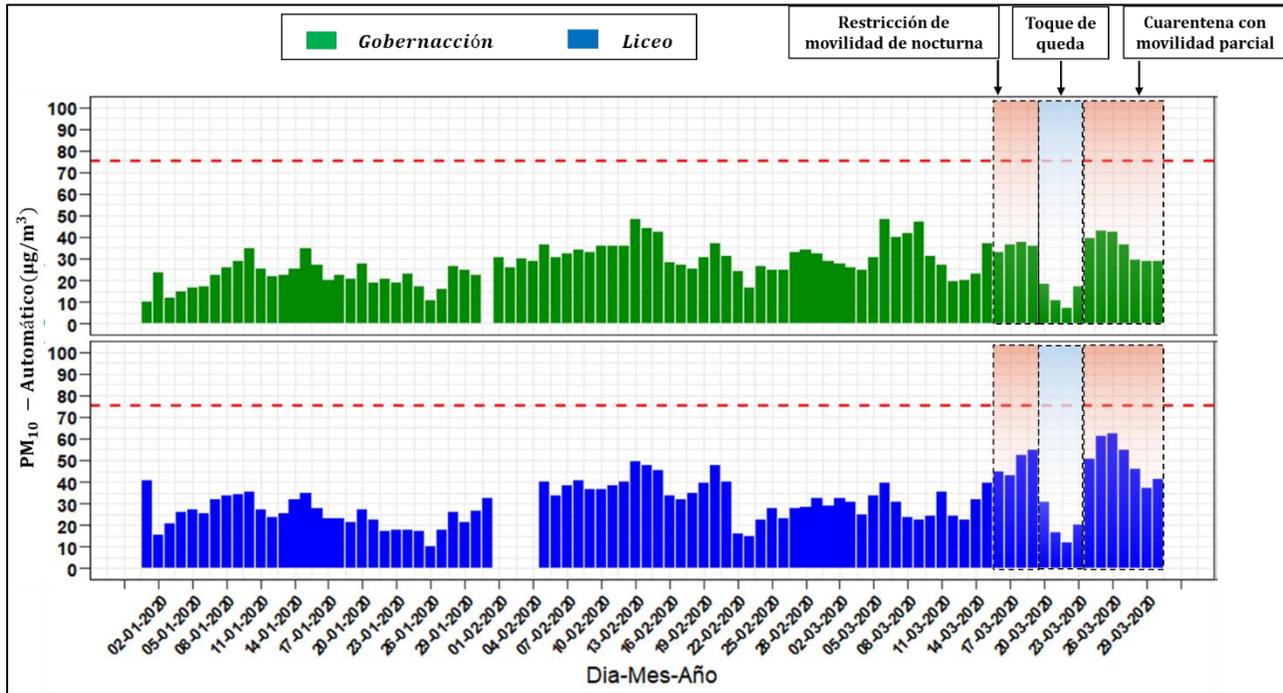
Tabla 4. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio de PM₁₀ – Automático (µg/m³) durante el año 2020 y la relación de algunos eventos de movilidad asociados al COVID-19.

Estadísticos	Enero	Febrero	Marzo – Eventos			
			Normalidad entre el 1 y 15	Restricción de movilidad nocturna entre el 16 y 20	Toque de queda entre el 21 y 23	Cuarentena nacional movilidad parcial entre el 24 y 30
Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar)						
Promedio*	21.3	31.7	31.5	32.2	11.6	35.5
Desv. Est.	6.2	6.5	9.2	7.9	4.9	6.4
Mín.	10.2	16.3	19.7	18.4	7.3	28.8
Máx.	35.5	47.6	47.9	37.3	16.9	43.2
N° de días	31	29	15	5	3	7
Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar)						
Promedio*	19.5	34.7	29.6	45.1	16.4	50.5
Desv. Est.	6.6	9.1	5.9	9.49	4.1	9.7
Mín.	15.7	14.8	22.3	30.6	12.2	37.1
Máx.	45.4	49.6	39.7	54.7	20.3	62.4
N° de días	31	26	15	5	3	7

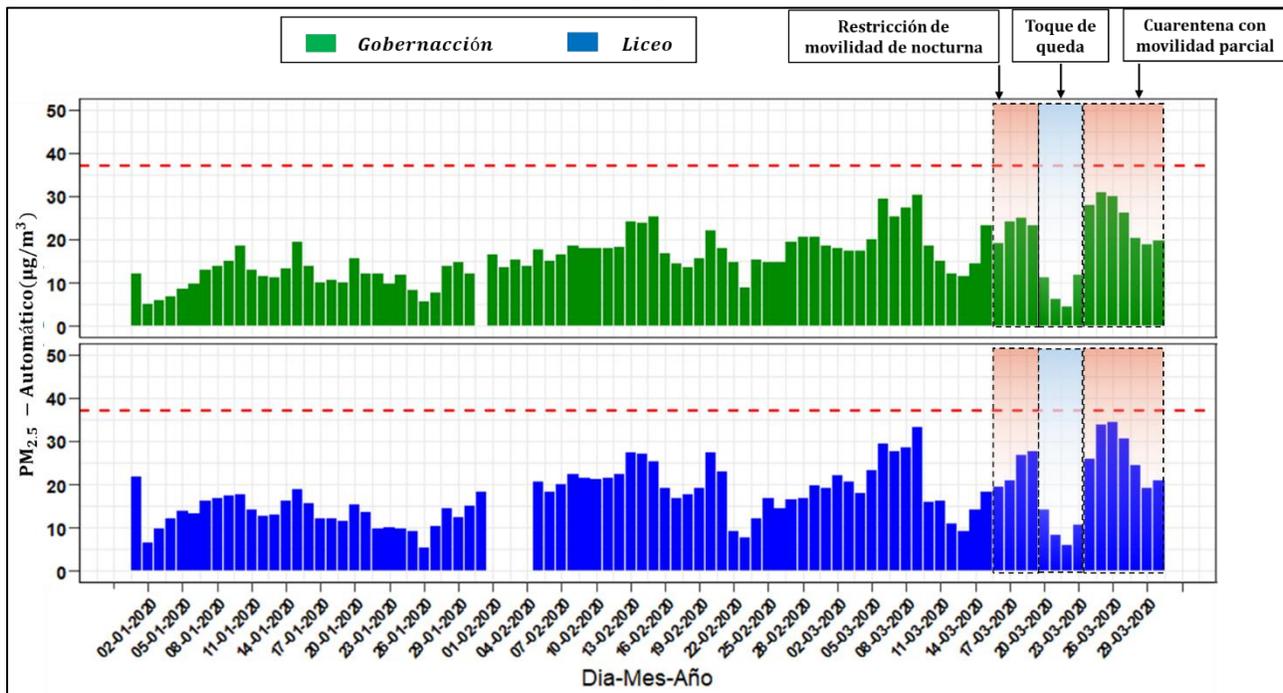
Tabla 5. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio de PM_{2.5} – Automático (µg/m³) durante el año 2020 y la relación de algunos eventos de movilidad asociados al COVID-19.

Estadísticos	Enero	Febrero	Marzo – Eventos			
			Marzo entre el 1 y 15	Restricción de movilidad nocturna entre el 16 y 20	Toque de queda entre el 21 y 23	Cuarentena nacional movilidad parcial entre el 24 y 30
Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar)						
Promedio*	11.6	17.2	19.8	20.5	7.4	24.8
Desv. Est.	3.5	3.5	6.0	5.8	3.8	5.2
Mín.	4.9	8.8	11.4	11.1	4.5	18.7
Máx.	19.0	24.7	30.2	25.1	11.6	30.7
N° de días	31	29	15	5	3	7
Liceo PM_{2.5} (µg/m³ estándar)						
Promedio*	9.9	19.4	20.4	21.8	8.3	27.0
Desv. Est.	4.1	4.9	7.0	5.6	2.4	6.0
Mín.	6.7	7.7	9.3	14.3	5.8	19.2
Max.	25.8	27.3	33.2	27.7	10.7	34.4
N° de días	31	26	15	5	3	7

Para dar una mejor visualización de las diferencias observadas se presenta la Figura 11 con los promedios diarios para ambos contaminantes a lo largo del 2020.



(a)



(b)

Figura 11. Promedios diarios para (a) PM₁₀ - Automático y (b) PM_{2.5} - Automático de las estaciones Gobernación y Liceo durante el período enero y marzo del 2020. La línea roja punteada indica el límite normativo diario establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS: PM₁₀ = 75 µg/m³; PM_{2.5} = 37 µg/m³.

La Figura 12 presenta la evolución horaria de las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticas en las estaciones Gobernación y Liceo para el período de análisis. Se observan máximos de concentración horarios 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 cual 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 la estación Liceo registraron valores cercanos a los 43 µg/m³ para PM₁₀ y 24 µg/m³ para PM_{2.5}. Por su parte la estación Gobernación registró valores de 38 µg/m³ para PM₁₀ y 23 µg/m³ para PM_{2.5} en ambos horarios de movilidad. Además, se observa de manera general el perfil promedio para los días de la semana, donde se nota una disminución del promedio diario para ambas estaciones los fines de semana, especialmente para el domingo cuya reducción es aproximadamente del 30% respecto al promedio semanal para ambas estaciones y para ambos contaminantes, indicando que tanto el PM₁₀ como el PM_{2.5} pueden provenir de la misma fuente de emisión.

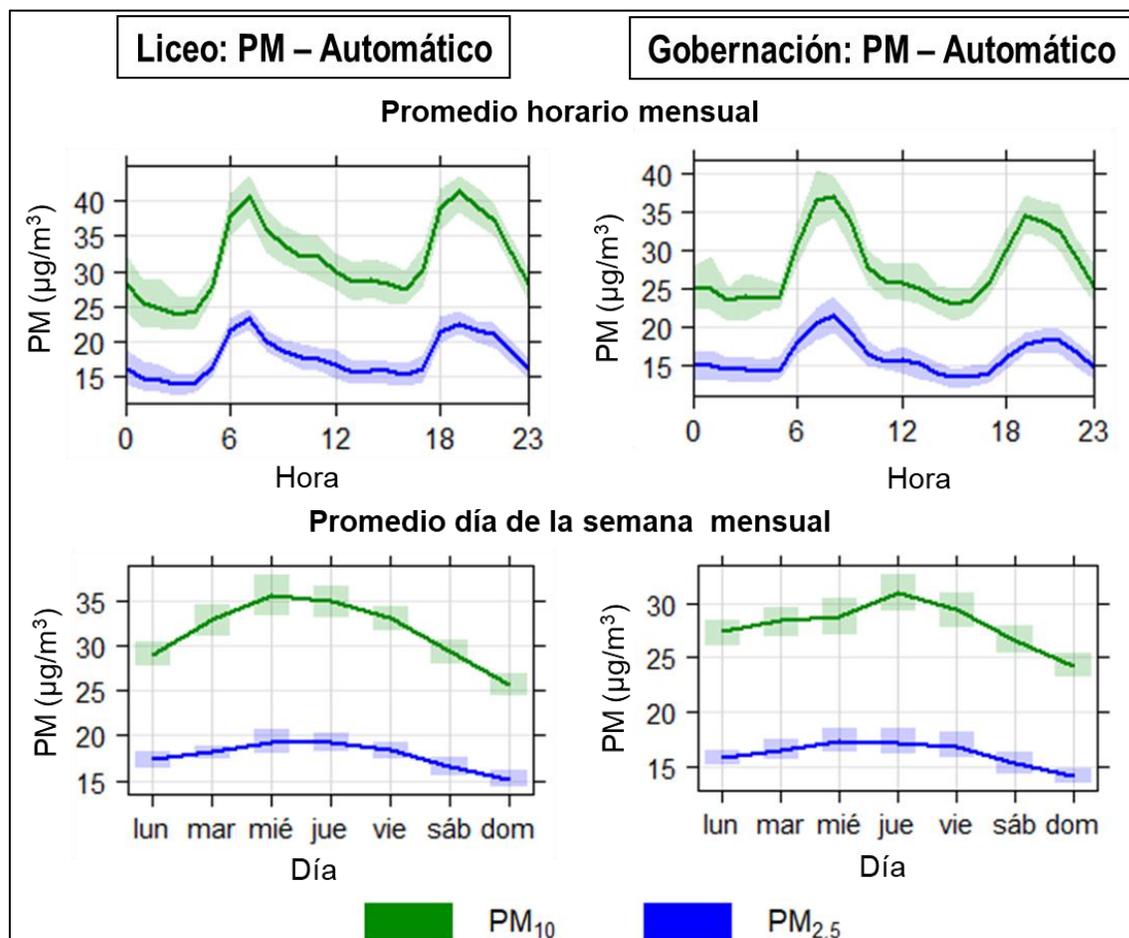


Figura 12. Promedio horario y semanal mensuales para PM₁₀ y PM_{2.5} - Manuales durante el período enero y marzo del 2020 en las estaciones Gobernación y Liceo.

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

La Figura 13 y Figura 14 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de PM manuales y automáticas. El ICA representa mediante un indicador de color, el estado de la calidad del aire de acuerdo a la concentración de material particulado y su posible afectación a la salud. Para el cálculo de este indicador (ICA) 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 para el caso de PM₁₀ tanto manual como automático, la calidad del aire se clasificó como buena en la mayoría de las estaciones con cuatro (4) días con calidad de aire moderada el 19, 25, 26 y 27 de marzo en la estación Liceo – automática. La medición de PM_{2.5} presentó calidad del aire moderada promedio del 80% de los días medidos. Al ser el PM_{2.5} una fracción del PM más pequeña y de mayor afectación a la salud humana, se destaca la importancia de continuar con medidas que permitan identificar escenarios de riesgo para la ciudadanía y generar políticas de control a las fuentes principales de emisión.

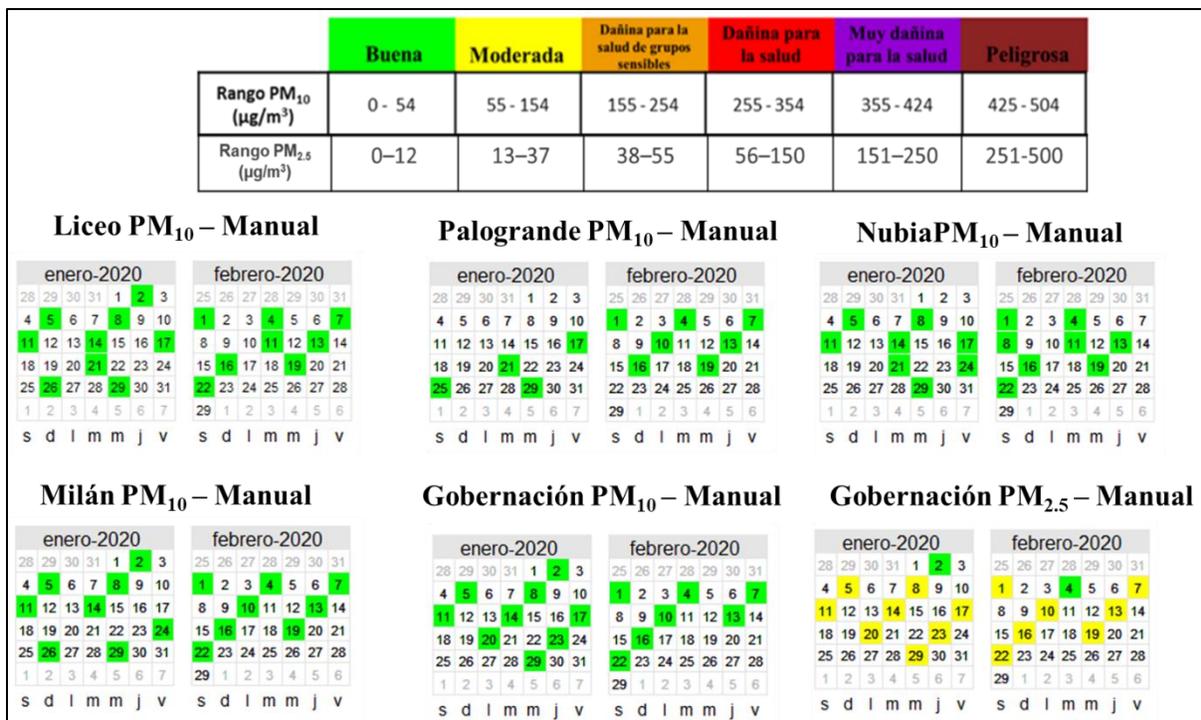


Figura 13. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ y PM_{2.5} - Manual en Manizales durante el período enero y febrero del 2020. Basado en la resolución 2254 de 2017 de MADS.

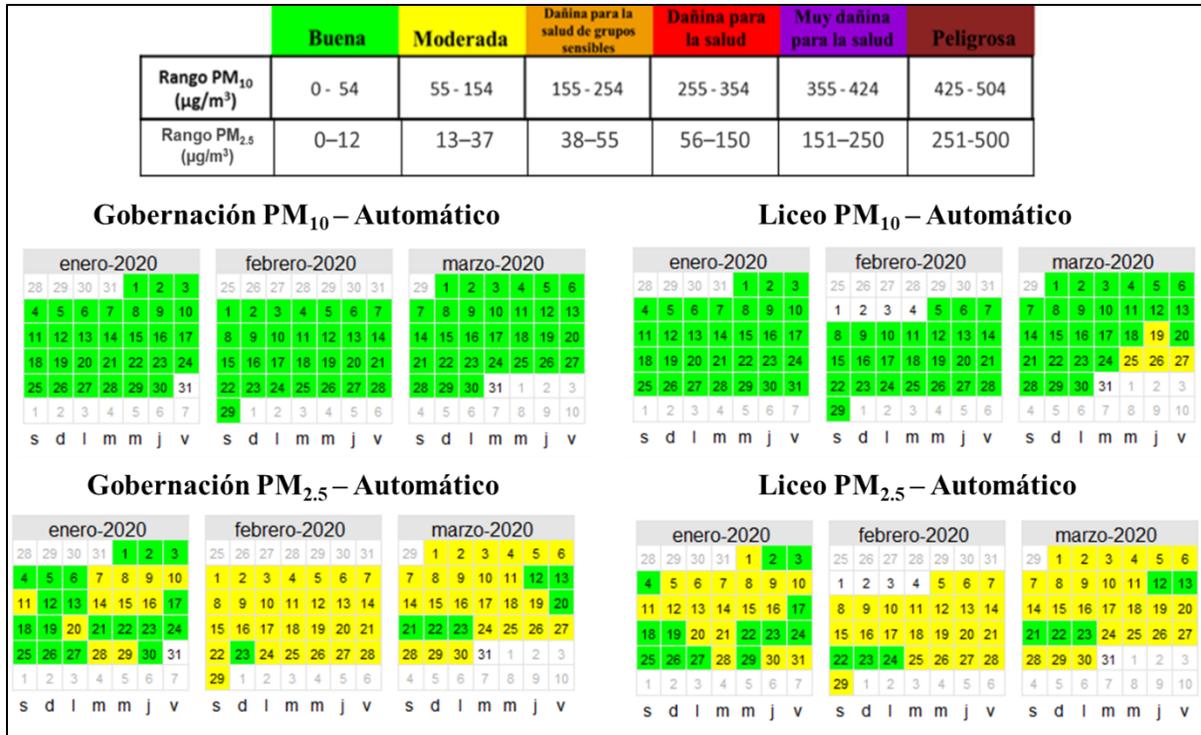


Figura 14. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos en Manizales durante el período enero y marzo del 2020. Basado en la resolución 2254 de 2017 de MADS.

4. RESULTADOS MONITOREO DE GASES

4.1. Monitoreo de monóxido de carbono (CO)

En la Tabla 6 se presentan los estadísticos descriptivos comparativos para CO durante el período de análisis y la relación entre las diferentes dinámicas presentadas a lo largo del mes marzo. Se identificó que de manera similar a PM₁₀ y PM_{2.5} – Automático, con el cese total de las actividades del toque de queda entre el 21 y 23 de marzo se registraron las menores concentraciones con un promedio 49% (327.8 µg/m³) menor comparado con el promedio anual; y un mínimo de 213.8 µg/m³, que no correspondió al mínimo anual y por el contrario este fue observado el domingo 26 de febrero. Para la primera medida de restricción de movilidad nocturna se observó un aumento del 26% (745.3 µg/m³) comparado con el promedio anual y un aumento del 52% comparado con los primeros quince (15) días del mes de marzo. Finalmente, desde la cuarentena nacional con movilidad parcial las concentraciones registradas a diferencia del toque de queda obligatorio, regresaron a promedios cercanos a los que se observaron durante los primeros quince (15) días del mes, permitiendo inferir que las concentraciones en aire ambiente de este contaminante de la ciudad se encuentran fuertemente relacionadas con la circulación de vehículos particulares.

Tabla 6. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio de CO (µg/m³) durante el año 2020 y la relación de algunos eventos de movilidad asociados al COVID-19.

Estadísticos	Enero	Febrero	Marzo – Eventos			
			Marzo entre el 1 y 15	Restricción de movilidad nocturna entre el 16 y 20	Toque de queda entre el 21 y 23	Cuarentena nacional movilidad parcial entre el 24 y 30
Promedio*	735.1	600.8	556.3	745.3	327.8	566.7
Desv. Est.	308.5	334.9	334.6	366.6	74.0	116.0
Mín.	152.3	49.7	57.0	196.7	213.8	332.5
Máx.	1783.2	1956.1	1865.8	2044.4	552.0	1043.1
Nº de datos	718	695	360	116	72	168

En la Figura 15 se muestra la evolución de concentraciones octohorarias de CO durante el 2020, 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 MADS (MADS, 2010). Se observaron concentraciones horarias promedio mensual de 566.4 µg/m³. 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 µg/m³ para promedio de ocho (8) horas y 35000 µg/m³ para promedio horario).

Adicionalmente, en la Figura 16 se presenta la variación promedio horaria mensual y por día de la semana para el 2020. Se observa que los máximos de concentración ocurren en las horas pico de tráfico vehicular al inicio y fin de la jornada laboral alrededor de las 7 am y las 6 pm, con promedios horarios de 1000 µg/m³ y 1100 µg/m³ respectivamente; se observan mínimos alrededor de los 250 µg/m³ en horas de la madrugada (entre la 3 y 5 am, hora de menor actividad vehicular).

Al comparar el promedio mensual entre los días de semana se observa que la concentración máxima se presenta los lunes con un valor promedio alrededor de los $680 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una concentración mínima los domingos con un valor promedio de $460 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De otra parte, se destaca el comportamiento de los fines de semana (sábado y domingo), donde se observa que ambos días presentan los menores niveles de concentración.

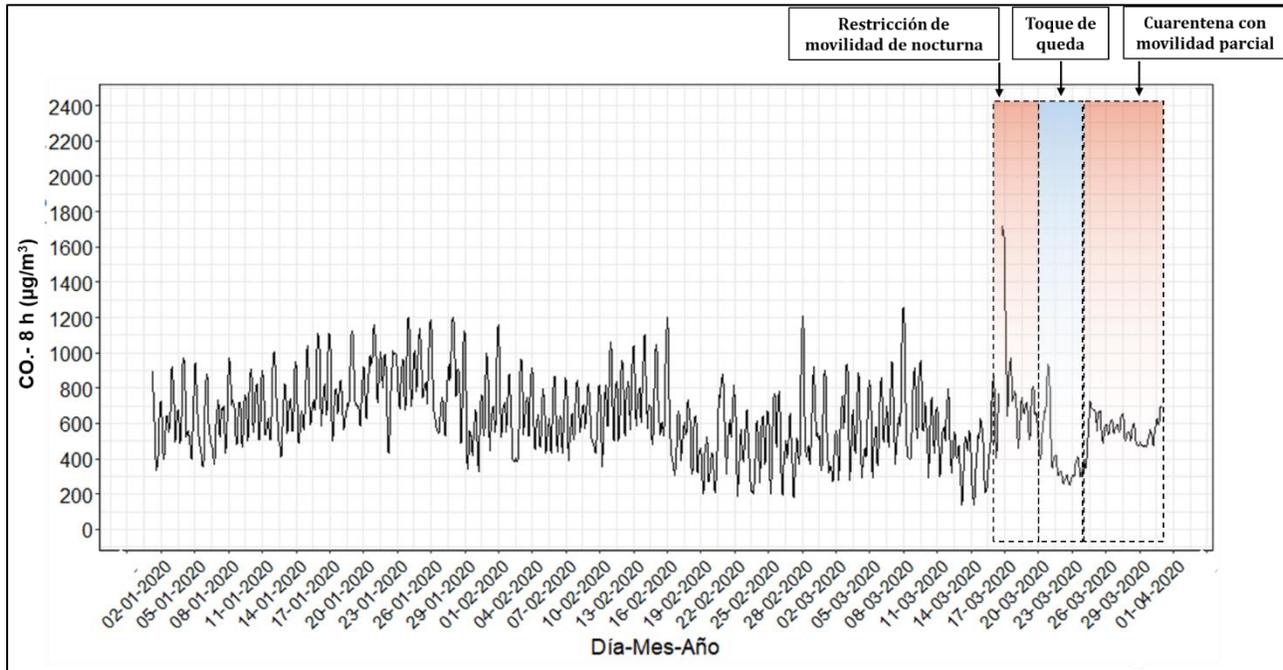


Figura 15. Variación de concentración promedio octohoraria de monóxido de carbono (CO) durante el período enero y marzo del 2020. El nivel máximo permisible horario de la Resolución 2254 de 2017 = $35000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no fue superado en ningún día.

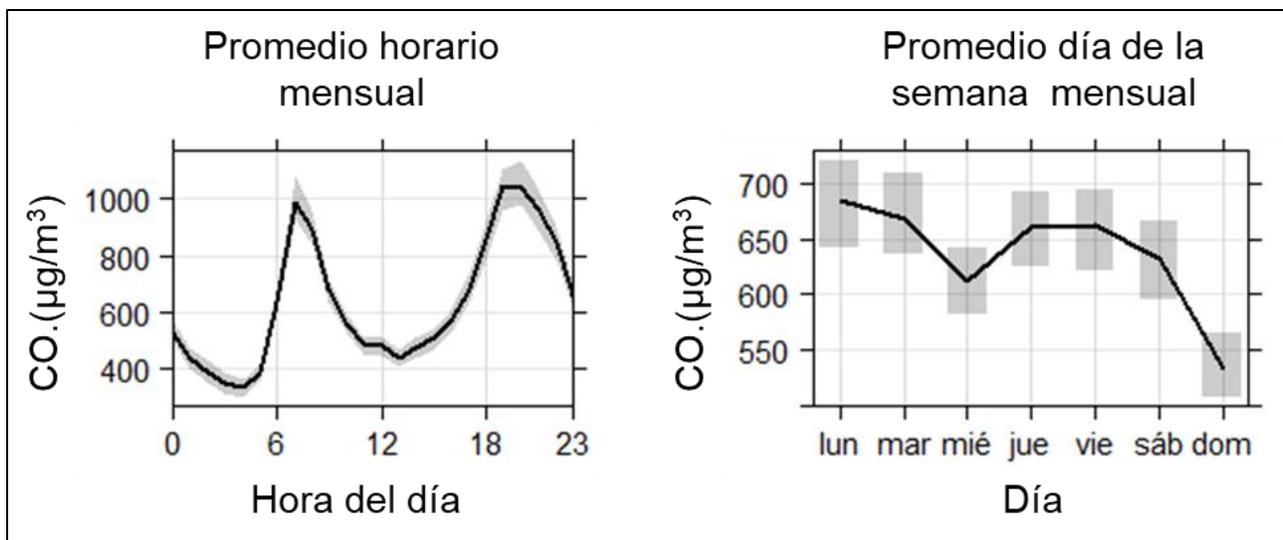


Figura 16. Variación promedio de monóxido de carbono (CO) horario mensual y por día de la semana mensual para el período enero y marzo del 2020.

4.2. Monitoreo de dióxido de azufre (SO₂)

En la Tabla 7 se presentan los estadísticos descriptivos comparativos para SO₂ durante el período de análisis y la relación entre las diferentes dinámicas presentadas a lo largo del mes. Se identificó que, para este contaminante en particular, desde la restricción de movilidad nocturna las concentraciones promedio registradas han sido estables con valores 82% (2.5 µg/m³) menores respecto al promedio anual y máximos horarios entre los 6 y 7 µg/m³. Para el caso de las concentraciones máximas observadas se identificó una relación directa con la actividad volcánica del mes (ver sección 5.1), ocurriendo un evento atípico para el día 9 de marzo, donde se registró una emisión volcánica por parte del servicio geológico colombiano (SGC). Particularmente cuando estos eventos superan los 1200 metros de altura desde la boca del volcán y la dirección del viento predominante se dirige hacia el occidente y noroccidente, son observados en la ciudad como posible efecto de contaminación natural.

Tabla 7. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio de SO₂ (µg/m³) durante el año 2020 y la relación de algunos eventos de movilidad asociados al COVID-19.

Estadísticos	Enero	Febrero	Marzo – Eventos			
			Marzo entre el 1 y 15	Restricción de movilidad nocturna entre el 16 y 20	Toque de queda entre el 21 y 23	Cuarentena nacional movilidad parcial entre el 24 y 30
Promedio*	4.1	4.1	4.0	2.6	2.6	2.4
Desv. Est.	1.9	1.8	1.3	1.3	1.3	0.8
Mín.	0.5	1.3	0.03	0.1	1.0	1.0
Máx.	10.8	14.2	32.0	6.9	6.4	7.2
Nº de datos	714	632	338	116	72	168

La Figura 17 muestra la evolución de concentraciones horarias de SO₂ durante el 2020, el promedio aritmético es estimado a partir de los datos cincominutales del equipo con base en lo estipulado en el por el “Manual de operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire” del MADS (MADS, 2010). Se observaron concentraciones horarias promedio de 3.5 µg/m³. Se registraron concentraciones promedio mínimas de 0.03 µg/m³ y máximas de 32 µg/m³ estos valores están dentro de los límites permitidos por la normatividad vigente (100 µg/m³ para 1 hora).

Adicionalmente, en la Figura 18 se presenta la variación promedio horaria mensual y por día de la semana para el mes de marzo 2020. 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 6.8 µg/m³ y 5.8 µg/m³ respectivamente. Se observan mínimos alrededor de los 2.5 µg/m³ al medio día (entre la 11 am y 1 pm). Al comparar el promedio por día de la semana mensual, no se observa un comportamiento definido observándose máximos de concentración los lunes con un valor alrededor de los 4.4 µg/m³ y mínimos los domingos alrededor de los 4.2 µg/m³.

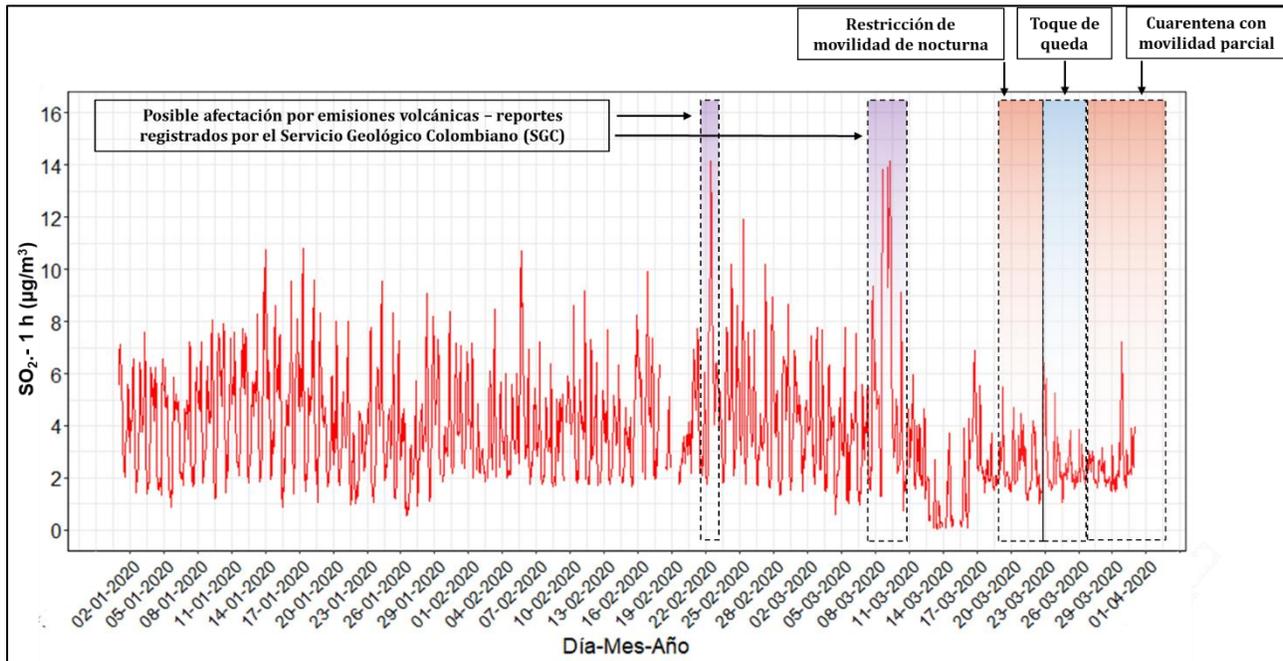


Figura 17. Variación de concentración promedio horario de dióxido de azufre (SO₂) durante el período enero y marzo del 2020. El nivel máximo permisible horario de la Resolución 2254 de 2017 = 100 µg/m³ no fue superado en ningún día.

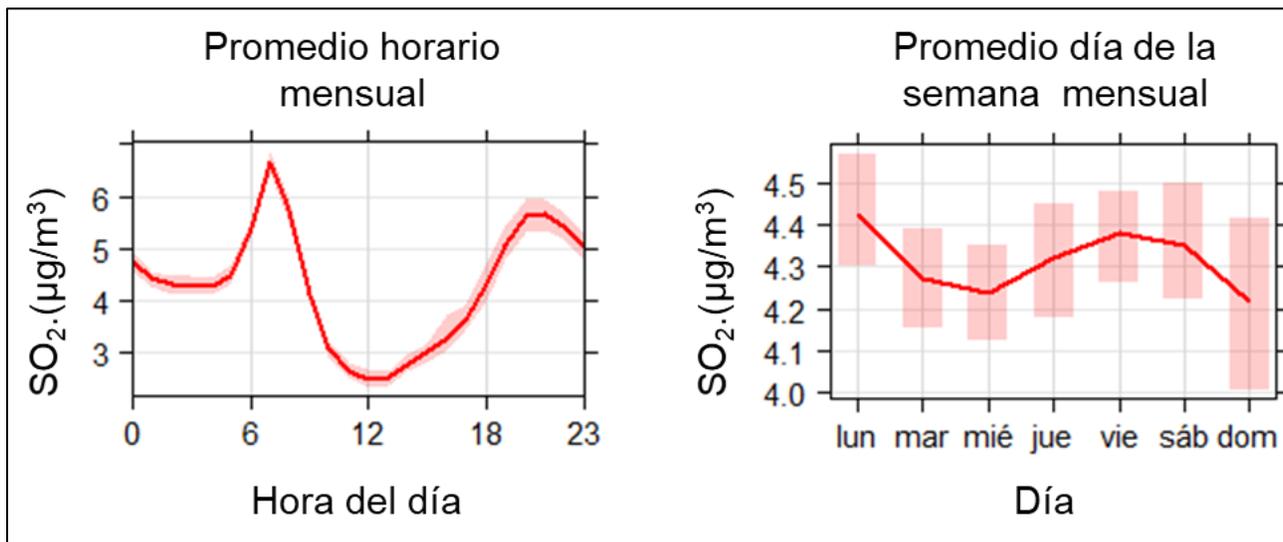


Figura 18. Variación promedio de dióxido de azufre SO₂ horaria mensual y por día de la semana para marzo del 2020.

4.3. Monitoreo de ozono troposférico (O₃)

La Figura 20 muestra la evolución de concentraciones horarias de O₃ durante el 2020. Para este contaminante en particular se presentaron fallas en el equipo de medición a lo largo del mes de febrero y mediados de marzo, por este motivo no se presentará el análisis comparativo para marzo. El promedio aritmético es estimado a partir de los datos cincominutales del equipo con base a lo estipulado por el por el "Manual de operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire" del MADS (MADS, 2010). Se observaron concentraciones horarias promedio de 23.4 µg/m³. Se registraron concentraciones promedio mínimas de µg/m³ y máximas de 61.2 µg/m³ durante los momentos de mayor radiación entre las 12 y 4 pm. Las concentraciones octohorarias de ozono troposférico en la estación Gobernación para el mes de marzo se encontraron entre 5 µg/m³ y 55 µg/m³ y promedio de 30 µg/m³; estos valores están dentro de los límites permitidos por la normatividad vigente (100 µg/m³ para 8 horas).

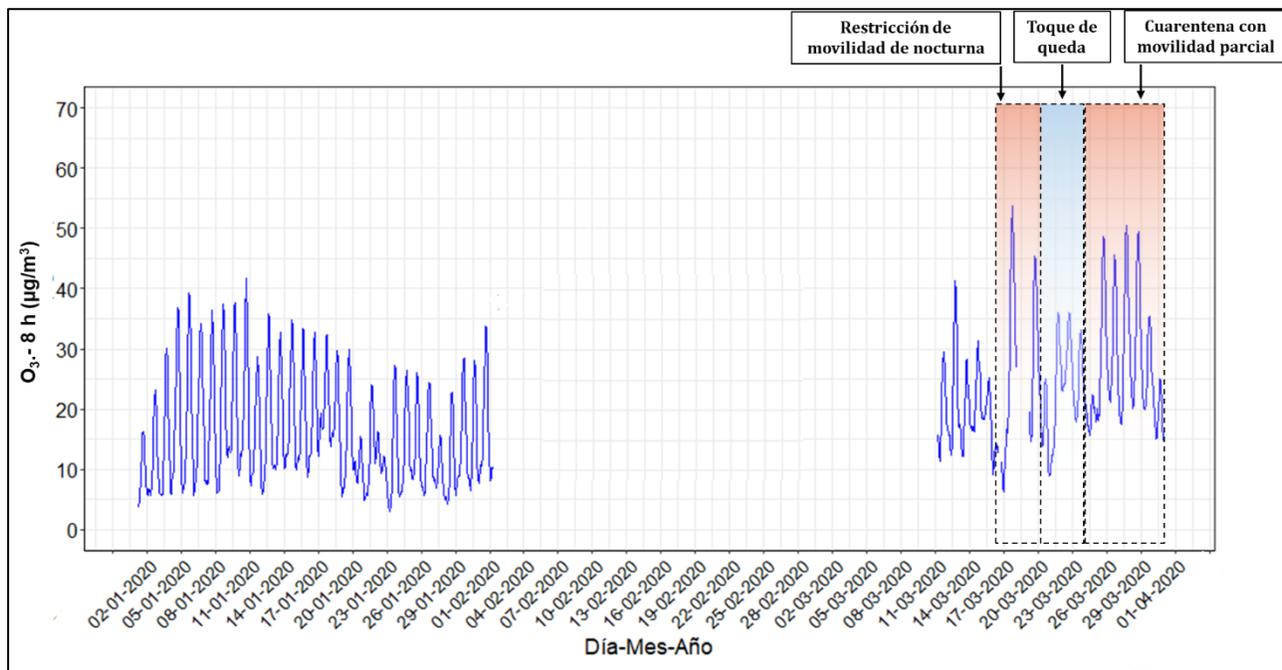


Figura 19. Variación de concentración promedio octohorario de O₃ para el período enero y marzo del 2020. El nivel máximo permisible octohorario de la Resolución 2254 de 2017 = 100 µg/m³ no fue superado en ningún día.

De manera alternativa se presenta en la Figura 20 el resumen de la variación de O₃ y radiación Solar promedio horaria semanal para el período de análisis. Adicionalmente, 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 35 µg/m³ y niveles de radiación promedio cercanos a los 400 W/m².

Para el período nocturno, sin presencia de radiación solar, la concentración de ozono disminuye aproximadamente el doble. Se presenta un pico de ozono entre la 1:00 am y 3:00 am con valores cercanos a los $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$, este se asocia al transporte de ozono generado durante el día hacia la parte alta de la cordillera que asciende por fenómenos térmicos y que posteriormente desciende durante la noche cuando el aire se enfría y pierde flotabilidad, este es un fenómeno típico de circulación de vientos en ciudades valle – montaña.

Se identifica también que las concentraciones durante el día son aproximadamente 2 veces más elevadas que en las noches, con un promedio diario de $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y uno nocturno de $13.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se evidencia que los promedios durante la noche no presentan relación 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 ozono. De otra parte, los promedios diarios y mensuales 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 ozono lo que se asocia al remanente de ozono generado durante los días de mayor actividad de fuentes de emisión (lunes a viernes), además de la posible 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 ozono desplazando el equilibrio hacia una mayor producción de este contaminante.

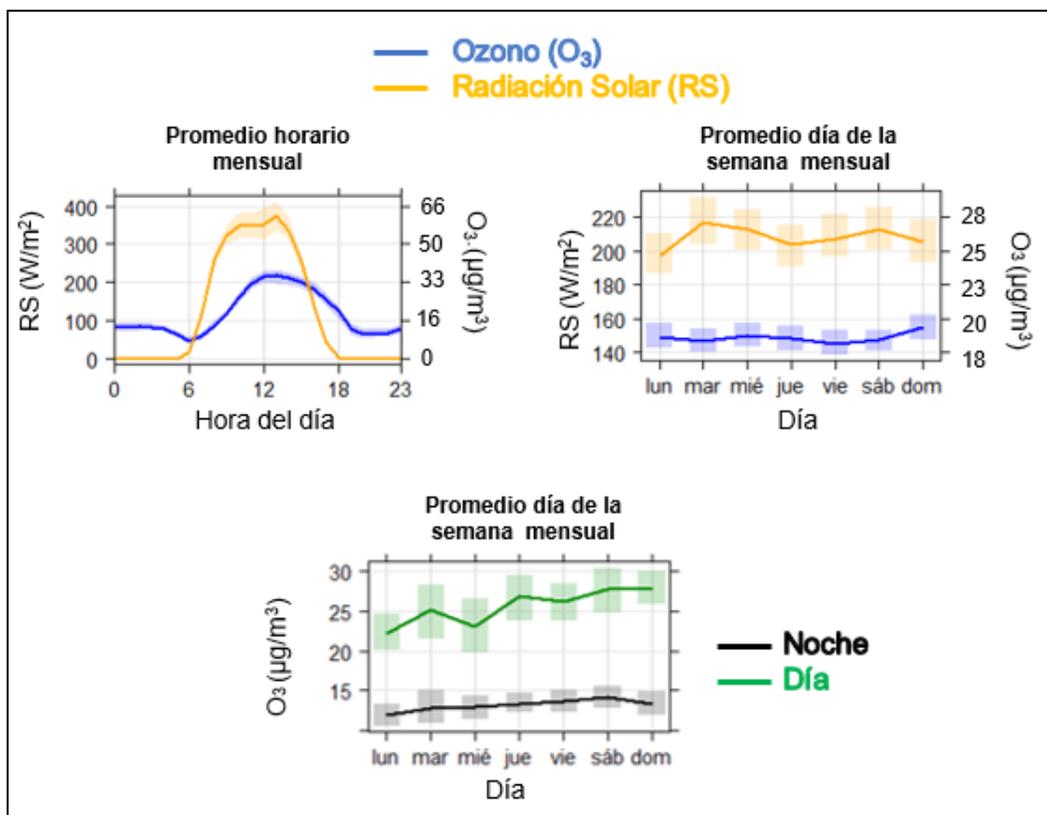


Figura 20. Variación promedio horaria y semanal de O_3 y radiación solar. Se incluye además el comportamiento promedio semanal entre las horas diurnas y nocturnas, para el período enero y marzo del 2020 en la estación Gobernación.

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

La Figura 21 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en la estación de monitoreo Gobernación para CO, SO₂ y O₃. Para el cálculo de este indicador (ICA) tanto en CO, SO₂ y O₃ 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 período analizado para todos los contaminantes.

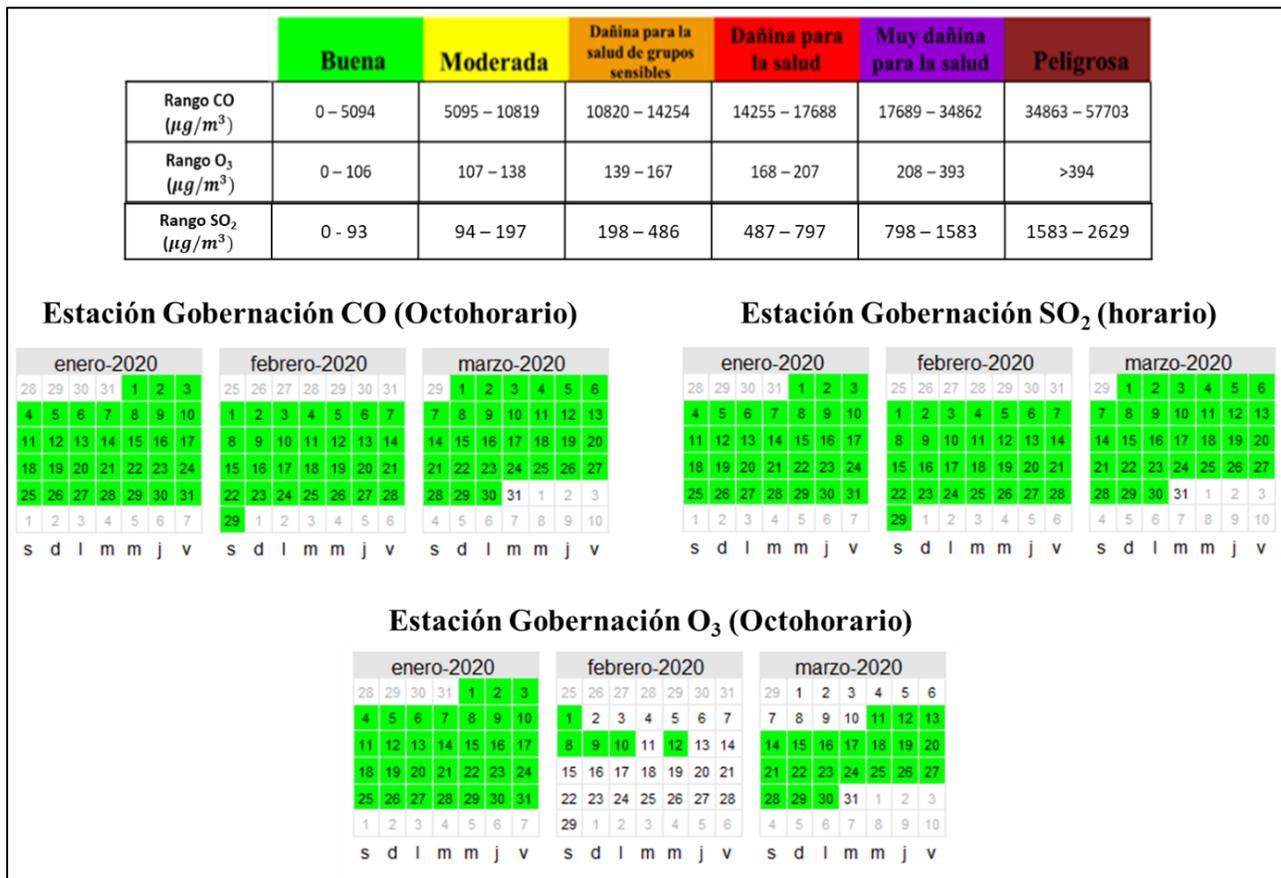


Figura 21. Índice de calidad del aire (ICA) para CO, SO₂ y O₃ en Manizales durante el período enero y marzo del 2020. Basado en la resolución 2254 de MADS.

5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS

5.1. Emisiones volcánicas

Durante lo corrido del año 2020 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. En la Tabla 8 se presenta un resumen con algunos de los días que tuvieron alturas en la columna de gases significativos (superiores a los 1200 metros), de éstos el 80% de los días reportados presentaron predominancia de vientos hacía el noroccidente, ubicación de Manizales, generando una posible afectación a la contaminación atmosférica por esta fuente en la ciudad. De manera alternativa se presentan dos ejemplos de las imágenes tomadas por el satélite "Sentinel 5P/TROPOMI" en la Figura 22 para los días 13 de febrero y 11 de marzo del 2020, donde se observa el comportamiento de la pluma del volcán y altas concentraciones de SO₂.

Tabla 8. Resumen de emisiones volcánicas significativas durante el 2020.

Fecha	Altura de la columna de gases (m)	Predominancia del viento
30/01/2020	1619	Occidente - Noroccidente
9/02/2020	1370	Occidente - Noroccidente
13/02/2020	1950	Occidente - Noroccidente
20/02/2020	1450	Occidente - Noroccidente
29/02/2020	1450	Occidente - Noroccidente
9/03/2020	1943	Suroccidente - Noroccidente
11/03/2020	2000	Noroccidente - Occidente
23/03/2020	1500	Nororiente - Suroriente

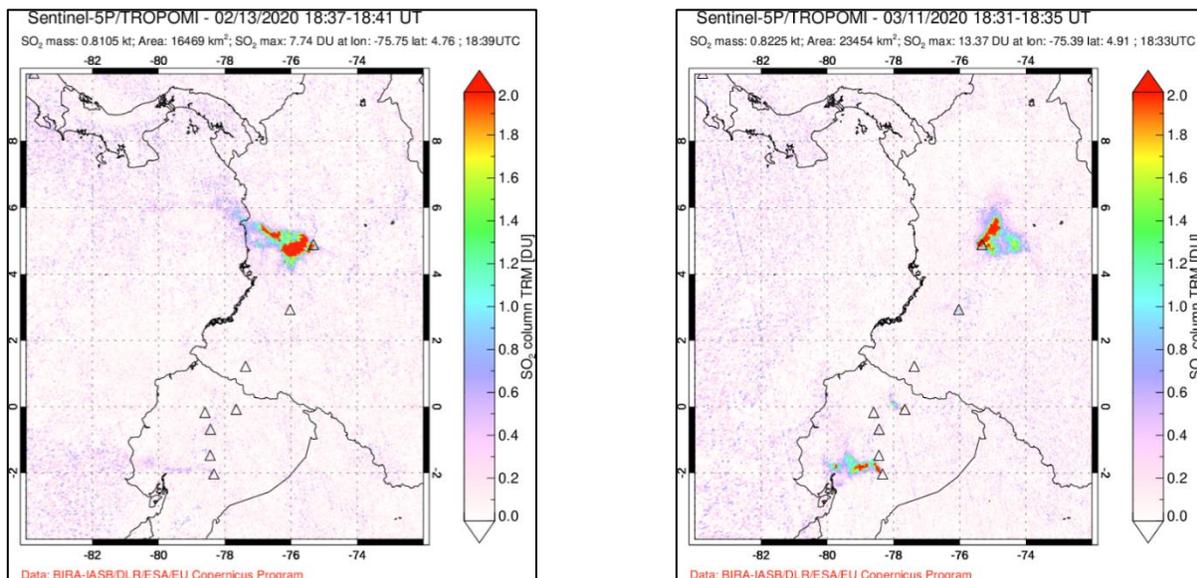


Figura 22. Ejemplos: Comportamiento de columna de SO₂ registradas por el satélite TROPOMI. Izquierda: Día viernes 02/13/2020. Derecha: Día martes 03/11/2020

5.2. Incendio forestales

No se descarta el posible efecto de la contaminación del aire debido a fenómenos a escala regionales relacionados con los incendios forestales que han ocurrido desde el mes de febrero en la Orinoquía Colombo-Venezolana, el Sumapaz y la zona caribe Colombiana, acrecentados por la temporada de bajas lluvias. Como ejemplo de ello se presenta la Figura 23 con algunos registros satelitales de la plataforma "Zoom earth" de los diferentes incendios forestales que se han presentado en el país y alrededores. Para mayor información puede consultar el link <https://zoom.earth>.



Figura 23 Registros satelitales de incendios forestales de escala regional. Plataforma libre de la NASA "ZOOM EARTH": Izquierda: 14/03/2020. Derecha: 23/03/2020

5.3. Relación entre los equipos automáticos, ejemplo estación gobernación

En la Figura 24 se presenta la variación promedio horaria para los contaminantes SO_2 , O_3 , CO y $\text{PM}_{2.5}$ - Automático en la estación Gobernación para lo corrido del año 2020. Se observa que el comportamiento a lo largo del día presenta un perfil similar para SO_2 , CO y $\text{PM}_{2.5}$ los cuales presentan picos de máxima concentración en las franjas horarias con alto tráfico vehicular, siendo esto un indicativo de que en Manizales estos son contaminantes primarios producto de fuentes vehiculares.

Por su parte, el O_3 presenta un comportamiento diferente a los demás contaminantes analizados ya que las mayores concentraciones de O_3 se presentan alrededor del mediodía, horas en donde 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 atribuye este fenómeno a las dinámicas de algunos contaminantes en las reacciones con los precursores del O_3 como los NO_x y COV 's ya sea de manera directa o indirecta (Sharma y colaboradores, 2017; Özbay y colaboradores, 2011).

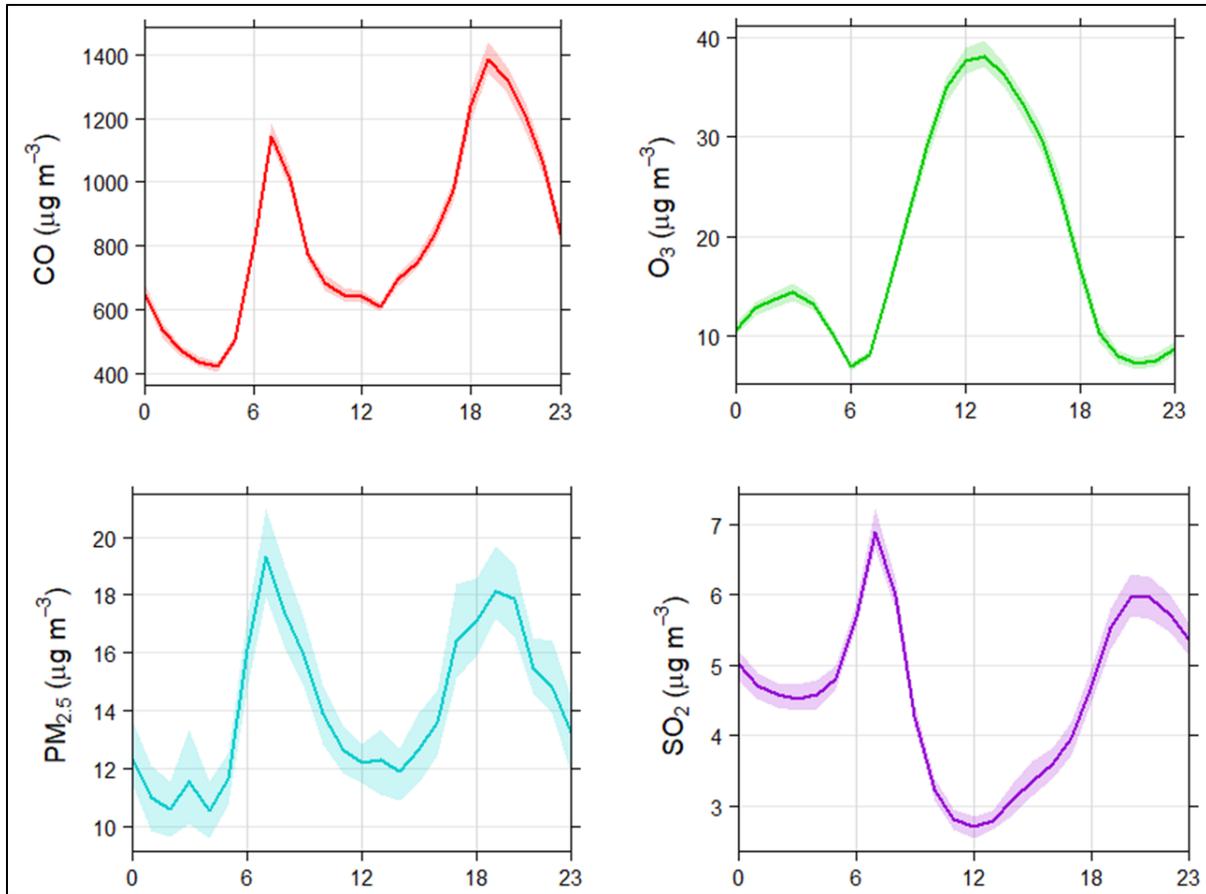


Figura 24. Comparación de perfiles promedio horarios de concentración de SO₂, O₃, PM_{2.5}-Automático y CO en la estación Gobernación (Año 2019)

6. REFERENCIAS

- 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>
- Eurachem / CITAC, 2012. Quantifying uncertainty in analytical measurement. Third edition. QUAM:2012.P1
- 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.

- 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* 152, 279-289. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.12.048>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), 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, «Meteorological variations of PM_{12.5}/PM₁₀ concentrations and particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Zonguldak,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 170, pp. 13-21, 2009.
- 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/>
- Özbay B., Keskin G., Dogruparmak S., Ayberk S., 2011. Multivariable methods for ground-level ozone modeling. *Atmospheric Research*. 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.
- 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>
- G. Loosmore y R. Cederwall, «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, 2004.
- 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
- Zapata C., Gálvez A., González C., Aristizábal B., Velasco M., 2019. Boletín de calidad del aire en Manizales período Enero - Marzo 2019, [Fuente en línea]. Disponible en: <http://www.corpocaldas.gov.co/publicaciones/543/Informe%20SVCA%20enero-marzo%202019.pdf>