

SIMAC

SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO AMBIENTAL DE CALDAS



BOLETÍN CALIDAD DEL AIRE MANIZALES 2019

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

**Subdirección de Evaluación y
Seguimiento Ambiental CORPOCALDAS

RESUMEN

Se presenta en este informe los resultados del monitoreo de contaminantes atmosféricos realizado en Manizales durante el período de enero a diciembre de 2019. Se realizó el seguimiento de material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) y los gases ozono troposférico (O_3), monóxido de carbono (CO) y dióxido de azufre (SO_2). Se muestran las gráficas resumen obtenidas y tablas de estadísticos básicos (promedio, mínimo, máximo y desviación estándar). Asimismo, se presentan los resultados obtenidos para los índices de calidad del aire.

***Camilo Zapata Mora, *Angel David Gálvez Serna, *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: PM ₁₀ Y PM _{2.5} DURANTE EL AÑO 2019.....	7
3.1.	<i>EQUIPOS MANUALES: ANÁLISIS DE PROMEDIOS DIARIOS Y MENSUALES.....</i>	<i>7</i>
3.2.	<i>EQUIPOS MANUALES: COMPARACIÓN PRELIMINAR CON NORMA ANUAL.....</i>	<i>12</i>
3.3.	<i>EQUIPOS MANUALES: ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROMEDIOS ENTRE PM₁₀ Y PM_{2.5} EN LA ESTACION GOBERNACIÓN.....</i>	<i>14</i>
3.4.	<i>EQUIPOS MANUALES: INDICE DE CALIDAD DEL AIRE (ICA) PARA PM₁₀ Y PM_{2.5}.....</i>	<i>14</i>
3.5.	<i>EQUIPOS AUTOMÁTICOS PM₁₀ Y PM_{2.5}: ANÁLISIS DE PROMEDIOS Y COMPORTAMIENTO EN LA CIUDAD.</i>	<i>17</i>
4.	RESULTADOS MONITOREO DE GASES.....	19
4.1.	<i>MONITOREO DE OZONO TROPOSFERICO (O₃).....</i>	<i>19</i>
4.2.	<i>MONITOREO DE DIOXIDO DE AZUFRE (SO₂).....</i>	<i>21</i>
4.3.	<i>MONITOREO DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO).....</i>	<i>23</i>
4.4.	<i>INDICES DE CALIDAD DEL AIRE (ICA) PARA O₃, SO₂ Y CO.....</i>	<i>24</i>
5.	ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS.....	26
5.1.	<i>EMISIONES VOLCÁNICAS.....</i>	<i>26</i>
5.2.	<i>RELACIÓN ENTRE LOS EQUIPOS AUTOMÁTICOS, EJEMPLO ESTACIÓN GOBERNACIÓN.....</i>	<i>27</i>
6.	REFERENCIAS.....	29

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 en zonas urbanizadas 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). Estos contaminantes generan impactos sobre el recurso aire en ecosistemas naturales y centros urbanos.

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 subsistema del IDEAM: SISAIRE. 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 O₃, SO₂ 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, 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, los equipos automáticos de (PM₁₀ y PM_{2.5}) y el seguimiento de gases (O₃, SO₂ 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).

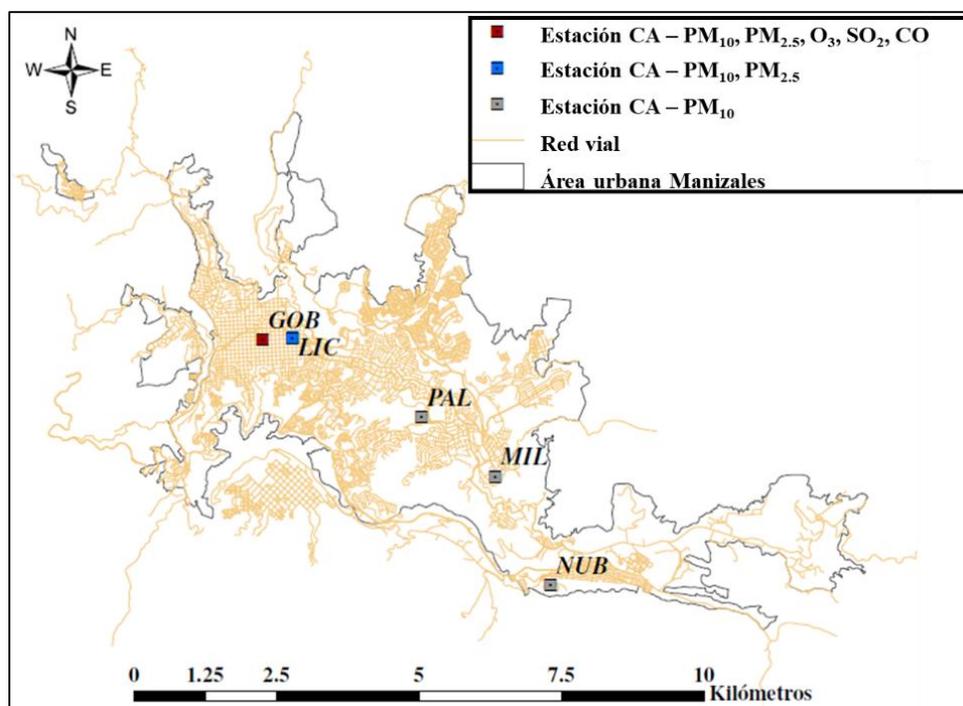


Figura 1. Mapa de Manizales con ubicación de las estaciones de calidad del aire.

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	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.	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	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 la red.	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 la red.	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 desde julio 2019.	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 Figura 2 presenta los consolidados mensuales meteorológicos de la estación Hospital de Caldas de la ciudad de Manizales para el año 2019. Esta estación es elegida como punto de referencia debido a que es una estación que ha presentado registros estables durante el tiempo de medición y su ubicación a más de 10m de altura (sobre la terraza del edificio del Hospital de Caldas), además de su ubicación en el centro geográfico de Manizales, se puede considerar una estación de tipo sinóptico 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.

En la Tabla 2 y Figura 2 se observa el comportamiento de la precipitación de la ciudad para el año 2019, en donde los niveles de precipitación comienzan considerablemente bajos, éstos aumentaron a lo largo del año hasta mayo. Para junio se da inicio al periodo de bajas lluvias hasta octubre donde se incrementan nuevamente las precipitaciones. Se identificó por ejemplo que en la estación Hospital el mes de abril presentó la mayor precipitación acumulada, representando el 18% del total anual (309.8 mm), mientras que el mes de agosto tuvo los menores registros siendo equivalentes al 0.5% (8.6 mm) del total de las lluvias del año 2019 (1755 mm). Al comparar los registros del año 2019 con el año 2018 observa un aumento en la precipitación (179 mm), así como un aumento de 0.6 °C en la temperatura del aire.

De otra parte, se identifica una influencia similar del régimen bimodal de la ciudad en el comportamiento de variables como la temperatura, la radiación solar y la humedad relativa. En las Figura 2 y Figura 3 se puede observar el comportamiento promedio de las variables de todas las estaciones meteorológicas más cercanas a las estaciones de calidad del aire, donde se aprecia la relación de forma directa entre la humedad relativa con las precipitaciones e inversa con la temperatura y radiación. Se destaca además que la ciudad cuenta con patrones de viento estables y velocidades de viento bajas que impiden una rápida dispersión de los contaminantes, en la Figura 4 se presentan las rosas de vientos observadas a lo largo de la ciudad para el año 2019, de manera general se observa el fenómeno de valle – montaña en donde las masas de aire se calientan a causa de la radiación solar y ascienden hacia la parte alta de la cordillera durante el día, durante la noche este patrón se invierte cuando las masas de aire se enfrían ocasionado su descenso hacia la ciudad.

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 la radiación directa del sol para formarse en el aire a partir de contaminantes primarios, emitidos directamente por fuentes antropogénicas y naturales. La humedad en el aire y la lluvia también tiene una influencia importante en la contaminación, 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 en el aire y en la disminución de partículas resuspendidas (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 será mayor y su concentración en la atmósfera disminuirá.

Tabla 2. Estadísticos mensuales para las variables de la estación meteorológica Hospital de Caldas durante el año 2019.

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]
Enero	18.5	1.4	160.5	594.7	76.5	103.4	294.6	997
Febrero	18.4	1.3	149.7	594.6	81.9	173.0	239.5	1185
Marzo	18.2	1.3	114.2	594.9	82.7	248.0	240.4	1148
Abril	17.8	1.2	114.3	595.6	84.0	309.8	216.0	1034
Mayo	17.8	1.0	154.4	595.4	84.7	230.0	211.9	1190
Junio	18.3	1.2	115.3	595.4	81.4	77.4	222.4	1063
Julio	18.2	1.2	174.5	595.3	79.2	14.4	252.5	1143
Agosto	18.9	1.5	97.8	595.2	74.2	8.6	276.8	1083
Septiembre	18.4	1.2	159.3	595.4	79.4	98.2	255.4	1113
octubre	17.1	1.1	160.7	595.6	84.1	185.8	241.0	1129
Noviembre	17.4	1.2	174.8	595.2	83.9	136.0	288.2	1229
Diciembre	17.8	1.1	159.3	594.7	83.7	162.4	283.4	1204

*Correspondiente al promedio entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2018 y 2019 respectivamente.

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

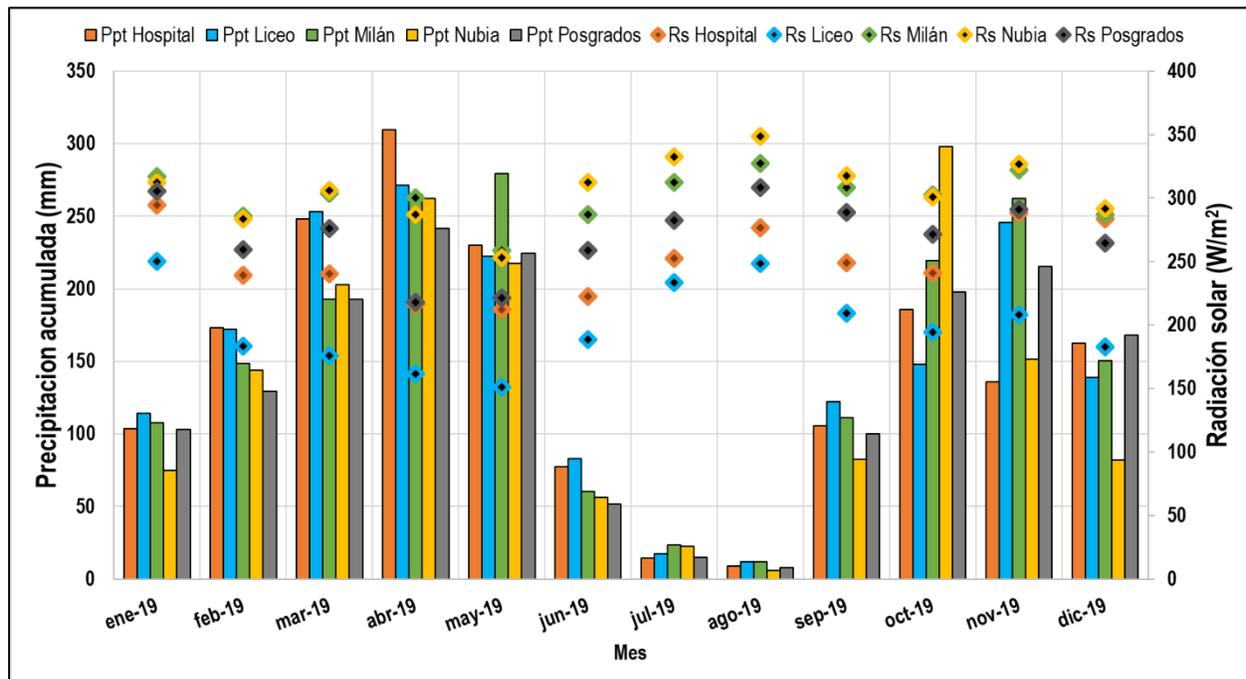


Figura 2. Promedios mensuales de precipitación y radiación solar en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante el año 2019.

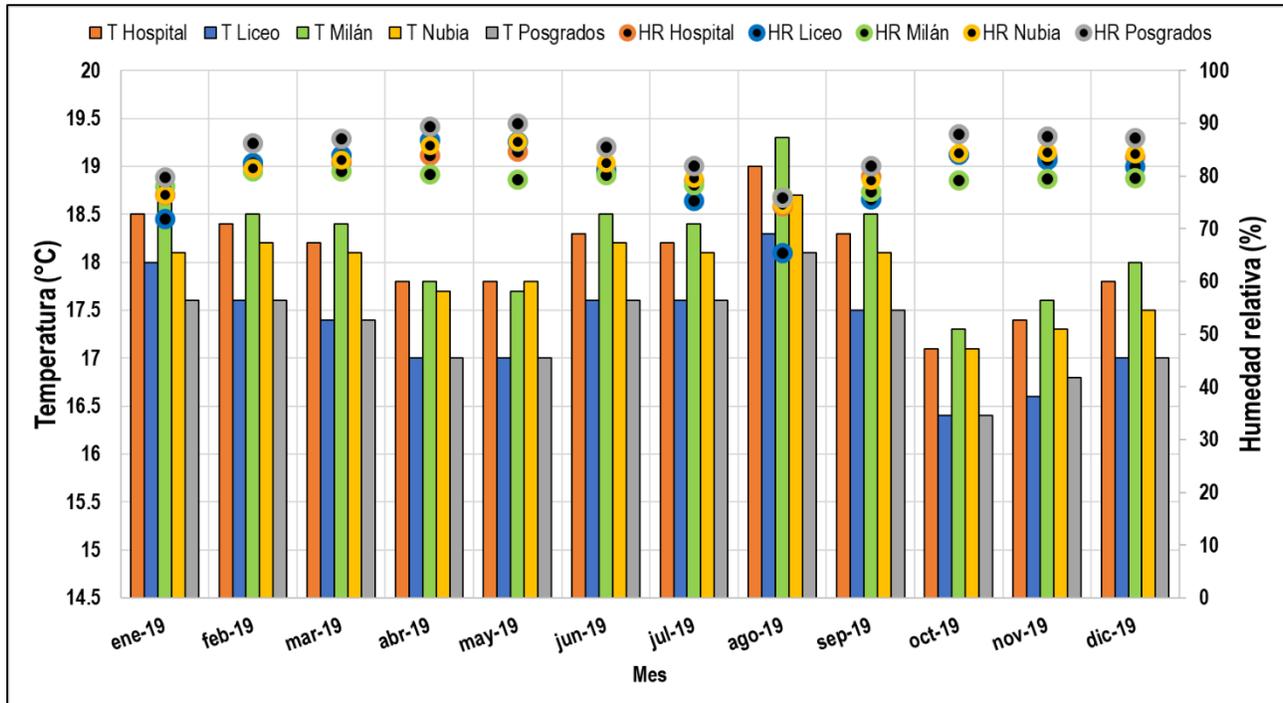


Figura 3. Promedios mensuales de temperatura del aire y humedad en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante el año 2019.

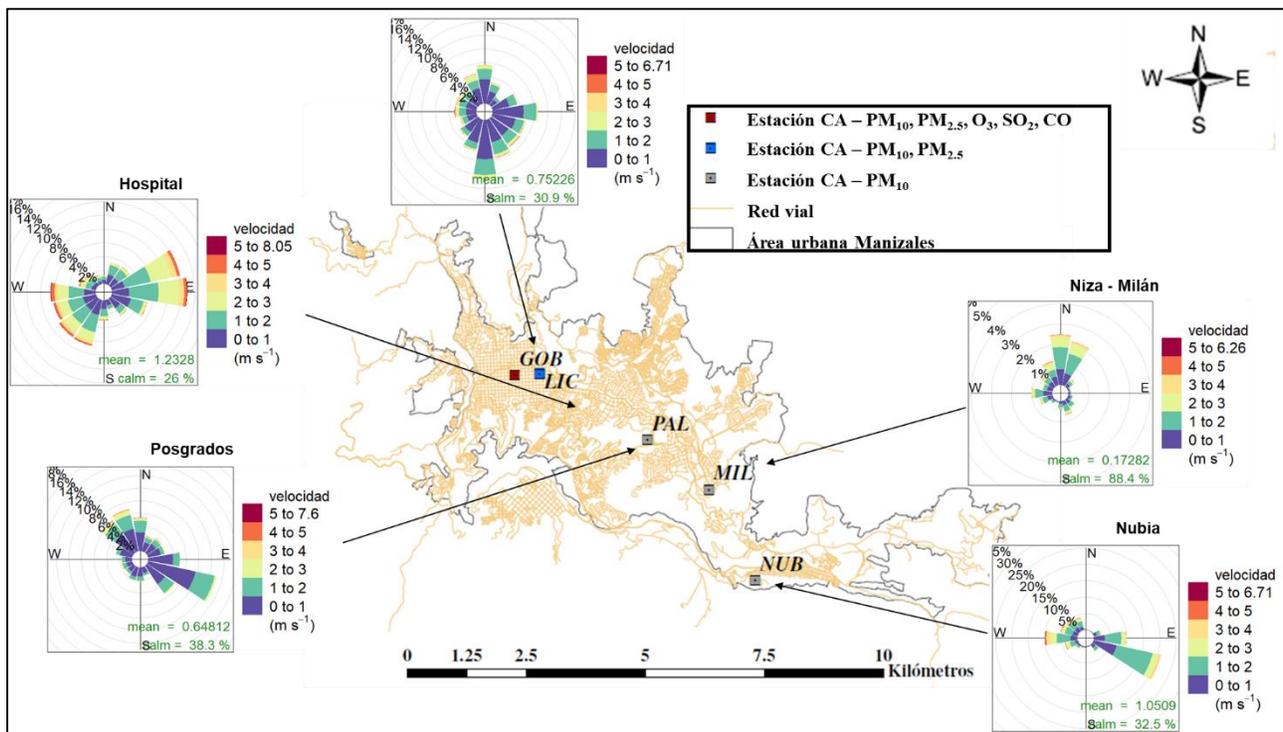


Figura 4. Rosas de vientos para las estaciones meteorológicas más próximas a las estaciones de calidad del aire durante el año 2019.

3. RESULTADOS MONITOREO DE MATERIAL PARTICULADO: PM₁₀ y PM_{2.5} DURANTE EL AÑO 2019

3.1. EQUIPOS MANUALES: ANÁLISIS DE PROMEDIOS DIARIOS Y MENSUALES

En la Tabla 3 se presentan los estadísticos descriptivos para las concentraciones promedio mensuales de PM₁₀ y PM_{2.5} obtenidas a lo largo del año 2019, se muestra el promedio mensual aritmético de cada estación 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 resultados de la Tabla 3 muestran como la estación Milán ha registrado los valores más altos de PM₁₀ con un promedio aritmético anual de 33 µg/m³ (desv. std = 9 µg/m³), seguida por la estación Liceo con un promedio aritmético de 30 µg/m³ (desv. std = 7 µg/m³), no obstante, la estación Liceo presentó pérdida de datos durante el 2019 debido a interrupciones de energía eléctrica y fallas técnicas que ocasionaron el descarte de muestras por ser consideradas como no validas según lo establecido por el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire del ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo (MADS, 2010), obteniéndose un porcentaje de datos validos anual del 80% para Liceo, este valor es aceptable por la normativa colombiana pero que comparado con el año anterior (2018) cuyo porcentaje fue del 94%, se infiere que esto pudo generar reducción en el promedio de la concentración en Liceo, considerando además que históricamente el SVCA ha registrado valores más altos de contaminación en la estación Liceo (Zapata y colaboradores, 2018).

Ambas estaciones (Milán y Liceo) se encuentran influenciadas por tráfico vehicular característico, 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 vehiculares tienen una especial importancia ya que a pesar de que su flota corresponde al 3.2% del total de vehículos de la ciudad, estos usan diésel como combustible y son responsables de cerca del 56% (351.2 ton/año) y 24% (151.9 ton/año) respectivamente del total de emisiones de PM₁₀ producto su actividad en la ciudad (Unal - Corpocaldas, 2019).

De otra parte, los altos niveles de contaminación en la estación Milán pueden ser ocasionados por la influencia de la actividad industrial (metalmecánica) y las labores de construcción de carretera que se llevan realizando a lo largo del año en inmediaciones de la estación Milán y que se han potenciado hacia los últimos meses del año, pudiendo ser este un factor clave en la generación de material particulado y material particulado resuspendido que es generado en inmediaciones de la estación. Se identificó además que el mes con el promedio más alto de PM₁₀ en la ciudad fue diciembre, en la estación Milán se registró el promedio mayor con un valor de 38 µg/m³ (desv. std = 7 µg/m³), relacionado directamente al aumento de las actividades de construcción dentro de la empresa y sectores aledaños.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de las concentraciones promedio mensuales de PM₁₀ y PM_{2.5} –Manuales (µg/m³) durante el año 2019 en Manizales.

Estadístico*	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.	Total
Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar)													
Promedio ± Incertidumbre**	20 ± 1.29	20 ± 1.63	28 ± 1.30	21 ± 1.19	19 ± 1.30	22 ± 1.25	16 ± 1.25	16 ± 1.30	20 ± 1.20	24 ± 1.87	19 ± 1.20	22 ± 1.20	21 ± 1.31
Desviación Estándar	6	4.5	3.2	6.3	5.6	5.1	9	9.7	2.7	5.7	2.4	6	6
Min. – Max.	10 - 28	13 - 29	22 - 32	10 - 35	13 - 30	14 - 29	5 - 30	4 - 37	16 - 25	15 - 33	14 - 23	13 - 32	4 - 37
Percentil 95%	28	27	31	31	29	29	28	31	24	32	22	31	29
N° Datos	10	10	10	10	10	10	10	10	10	11	8	10	121
Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar)													
Promedio ± Incertidumbre**	30 ± 0.04	33 ± 0.01	37 ± 0.08	28 ± 0.01	28 ± 0.08	18 ± 0.08	19 ± 0.09	31 ± 0.37	28 ± 0.37	32 ± 0.01	30 ± 0.01	34 ± 0.01	30 ± 0.06
Desviación Estándar	7	9	9	9	8	3	11	3	6	5	4	7	7
Min. – Max.	18 - 40	17 - 41	23 - 55	18 - 46	12 - 40	15 - 20	11 - 35	28 - 38	18 - 35	20 - 37	25 - 37	21 - 46	11 - 55
Percentil 95%	38	41	50	42	39	19	33	36	34	37	36	43	38
N° Datos	9	8	8	6	10	2	5	10	10	11	8	9	97
Palogrande PM₁₀ (µg/m³ estándar)													
Promedio ± Incertidumbre**	19 ± 0.02	24 ± 0.02	23 ± 0.02	23 ± 0.01	19 ± 0.01	15 ± 0.02	20 ± 0.02	18 ± 0.02	19 ± 0.17	21 ± 0.46	18 ± 0.01	20 ± 0.01	20 ± 0.09
Desviación Estándar	5	7	7	8	5	4	6	5	4	3	4	4	6
Min. – Max.	11 - 25	14 - 33	10 - 33	11 - 39	10 - 27	10 - 22	12 - 34	15 - 33	12 - 25	15 - 24	14 - 23	15 - 28	10 - 39
Percentil 95%	25	32	32	35	27	21	29	29	24	24	23	26	27
N° Datos	10	10	9	10	10	10	10	10	10	11	8	8	117
Milán PM₁₀ (µg/m³ estándar)													
Promedio ± Incertidumbre**	28 ± 0.01	32 ± 0.01	35 ± 0.01	29 ± 0.03	30 ± 0.02	30 ± 0.02	30 ± 0.01	37 ± 0.03	34 ± 0.03	32 ± 0.47	33 ± 0.18	38 ± 0.18	33 ± 0.14
Desviación Estándar	8	9	6	9	8	9	8	8	10	7	16	7	9
Min. – Max.	17 - 40	14 - 45	24 - 43	13 - 45	11 - 40	17 - 42	20 - 44	22 - 49	21 - 46	17 - 41	21 - 68	28 - 47	11 - 68
Percentil 95%	39	42	42	42	39	42	43	47	46	40	56	46	44
N° Datos	10	10	10	10	10	10	10	9	9	11	8	8	117
Nubia PM₁₀ (µg/m³ estándar)													
Promedio ± Incertidumbre**	19 ± 0.40	25 ± 0.01	26 ± 0.04	21 ± 0.03	19 ± 0.01	18 ± 0.02	16 ± 0.01	21 ± 0.40	19 ± 0.40	17 ± 0.21	15 ± 0.02	20 ± 0.02	20 ± 0.12
Desviación Estándar	6	7	6	5	6	6	3	5	7	3	4	4	5
Min. – Max.	9 - 28	15 - 35	16 - 33	12 - 29	9 - 26	11 - 31	13 - 21	14 - 28	9 - 26	12 - 22	7 - 20	13 - 26	7 - 35
Percentil 95%	27	35	32	28	24	27	21	27	26	21	20	25	26
N° Datos	10	10	10	10	10	10	10	10	10	11	7	9	119
Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar)													
Promedio ± Incertidumbre**	13 ± 1.68	13 ± 1.94	19 ± 1.68	14 ± 1.36	15 ± 1.68	14 ± 1.68	13 ± 1.52	10 ± 1.68	15 ± 1.32	15 ± 1.42	13 ± 1.17	16 ± 1.17	14 ± 1.42
Desviación Estándar	5	3	3	6	5	4	6	6	2	2	3	5	4
Min. – Max.	7 - 15	10 - 18	14 - 22	6 - 28	10 - 23	7 - 19	3 - 22	2 - 21	10 - 16	11 - 22	9 - 16	12 - 24	2 - 28
N° Datos	10	10	10	10	10	10	10	10	10	11	8	10	121

* 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

Respecto a los episodios atípicos presentados en término de PM_{10} , se registró la concentración más alta en la ciudad el jueves 21 de noviembre ($68 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en la estación Milán siendo éste un valor atípico (sin explicación) de posible relación con las fuentes de emisión. El segundo caso atípico se presentó el domingo 17 de marzo en la estación Liceo con un valor de $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el valor más alto registrado para un domingo en la ciudad (Zapata y colaboradores, 2018), para este día también se presentaron altas concentraciones en otras estaciones como Gobernación con un valor de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y Nubia con $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ valores superiores en un 30% comparados con promedio anual de cada estación respectivamente. Considerando la emergencia por mala calidad del aire presentada durante los meses de febrero y marzo en las ciudades de Bogotá y Medellín, se analizaron los valores registrados para estaciones de la ciudad de Medellín, se identificó que la emergencia ambiental presentada el fin de semana del 17 de marzo, coincide con las altas concentraciones registradas en Manizales. Esto indica que los niveles altos de contaminación durante el mes de marzo pueden ser causa de un fenómeno meteorológico regional con posible influencia de emisiones globales y de dinámica atmosférica.

En las estaciones de PM_{10} Nubia, Palogrande y Gobernación se observó que en general estas estaciones registraron menores concentraciones durante el periodo evaluado, con promedios anuales muy cercanos entre ellos de $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Gobernación (desv. std = $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Nubia (desv. std = $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Palogrande (desv. std = $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$); siendo además la estación Gobernación la que registró la mínima concentración en toda la red con un valor $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ correspondiente al domingo 5 de agosto. Se destaca además que los eventos de lluvia presentados después de un periodo de sequía generan un fenómeno de *scavenging* donde la atmósfera es lavada y las partículas suspendidas en el aire son llevadas a tierra con el agua, un ejemplo de ello se presentó en las concentraciones registradas el 10 de enero cuyos valores de PM_{10} fueron hasta 40% menores respecto al promedio mensual de todas las estaciones, esto se relaciona con las intensas lluvias posteriores de un periodo de sequía de 20 días, en donde entre el 8 y el 10 de enero se registró una precipitación acumulada de 63.2 mm.

De manera alternativa se presenta la Figura 5 con la comparación entre los promedios mensuales de PM_{10} y la precipitación acumulada en la estación meteorológica Hospital (elegida como representativa para representar el comportamiento meteorológico de la ciudad). Se evidencia una posible influencia por el fenómeno de *scavenging* en donde las concentraciones mensuales promedio de PM presentan un comportamiento inverso al régimen bimodal de lluvias de la ciudad observándose un aumento progresivo de las concentraciones en todas las estaciones durante el primer trimestre enero a marzo (periodo de bajas lluvias), seguido de un periodo de disminución de concentraciones en el segundo trimestre abril a junio (periodo de altas lluvias), un aumento nuevamente entre julio y agosto (periodo de mayor sequía del año) y para el final de año la variación de precipitación no aumento como era de esperarse, no obstante se observa un promedio de concentraciones proporcional a la cantidad de lluvia registrada. Se evidencia claramente como el mes con menores precipitaciones (agosto con 8.6 mm) registro de manera general altas concentraciones de PM_{10} con promedios $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Milán. $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Liceo, $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Nubia, $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Palogrande y $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Gobernación PM_{10} indicando su aporte en el lavado atmosférico y la resuspensión del material particulado.

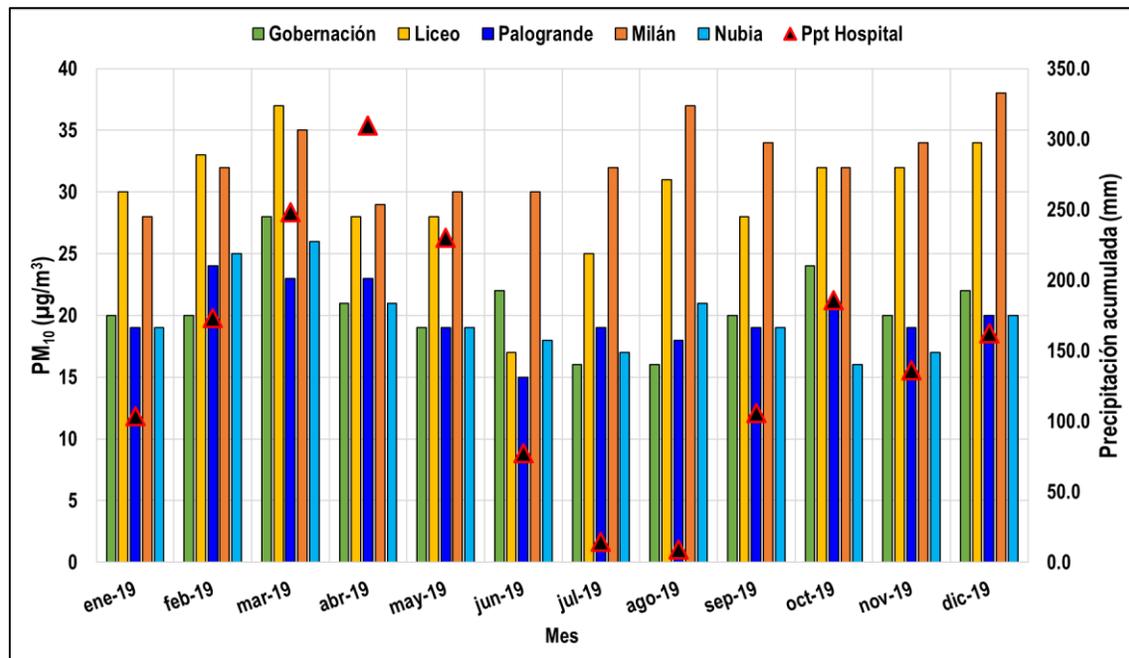


Figura 5. Promedio mensual de PM₁₀ y su relación con la precipitación acumulada mensual (Hospital de Caldas) durante el año 2019.

En lo referente al monitoreo de PM_{2.5} de la estación Gobernación, se registró un promedio anual de 14 µg/m³ (desv. std = 4 µg/m³) observándose variaciones poco significativas a lo largo del año, a excepción del mes de marzo cuyo promedio mensual fue el mayor registrado con un valor de 19 µg/m³, valor relacionado posiblemente con el efecto de contaminación regional presentado en el país, en donde se registraron concentraciones alrededor de los 22 µg/m³ entre el 8 y 14 de marzo, pero con poca relación con el 17 de marzo donde ocurrió un efecto negativo para el caso de PM₁₀. De otra parte, se obtuvo un mínimo de 2 µg/m³ para el domingo 5 de agosto al igual que en PM₁₀ y un máximo de 28 µg/m³ presentado el sábado 13 de abril que coincide además con un máximo mensual de concentración presentado en la estación Gobernación PM₁₀ cuyo un valor fue 35 µg/m³, no se encuentra una evento atípico que explique esta concentración, razón por la cual no se descarta la posible influencia por aumento del tráfico vehicular para esta estación para este día en particular, en especial de vehículos pesados (buses y camiones) relacionados mayoritariamente con emisiones de estos contaminantes.

Si se comparan los promedios anuales obtenidos en las estaciones del presente año (2019) con el año 2018, se observa un aumento en el promedio anual del 20% para Milán, por otro lado las estaciones de Gobernación PM₁₀ y Liceo presentaron una disminución del 10%, mientras que Nubia presentó una variación menor al 5% respecto al promedio anual del 2018. De otra parte, comparando el año 2019 con el año 2017 se evidenció una disminución en 20% para Gobernación PM₁₀, 14% para Nubia y 13% Liceo, mientras Milán aumentó 9%. Para el caso de Gobernación PM_{2.5} la variación promedio anual del 2019 comparado con el 2018 presentó una variación menor al 5%. Con esta información se puede inferir de manera general que los promedios de contaminación por material particulado se han visto mitigados durante los dos (2) años transcurridos por posibles cambios en las tecnologías de la flota vehicular de ciudad (Unal – Corpocaldas, 2019, a excepción de la estación Milán cuya influencia de actividad industrial y de construcción de vías pudo afectar la calidad del aire negativamente.

De manera complementaria se presentan las figuras de evolución temporal de concentraciones diarias obtenidas para PM₁₀ (Figura 6) y PM_{2.5} (Figura 7), 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).

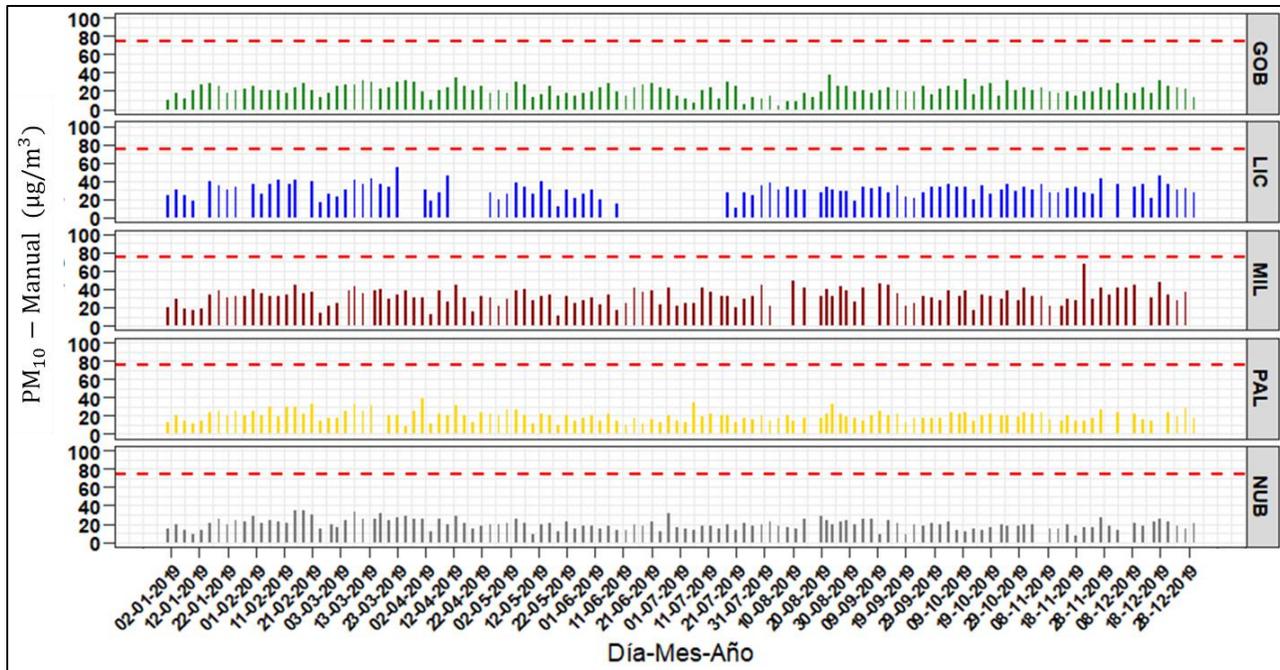


Figura 6. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM₁₀ - Manuales durante el año 2019 en el SVCA de Manizales. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM₁₀ establecido en la Resolución 2254 de 2017: 75 µg/m³.

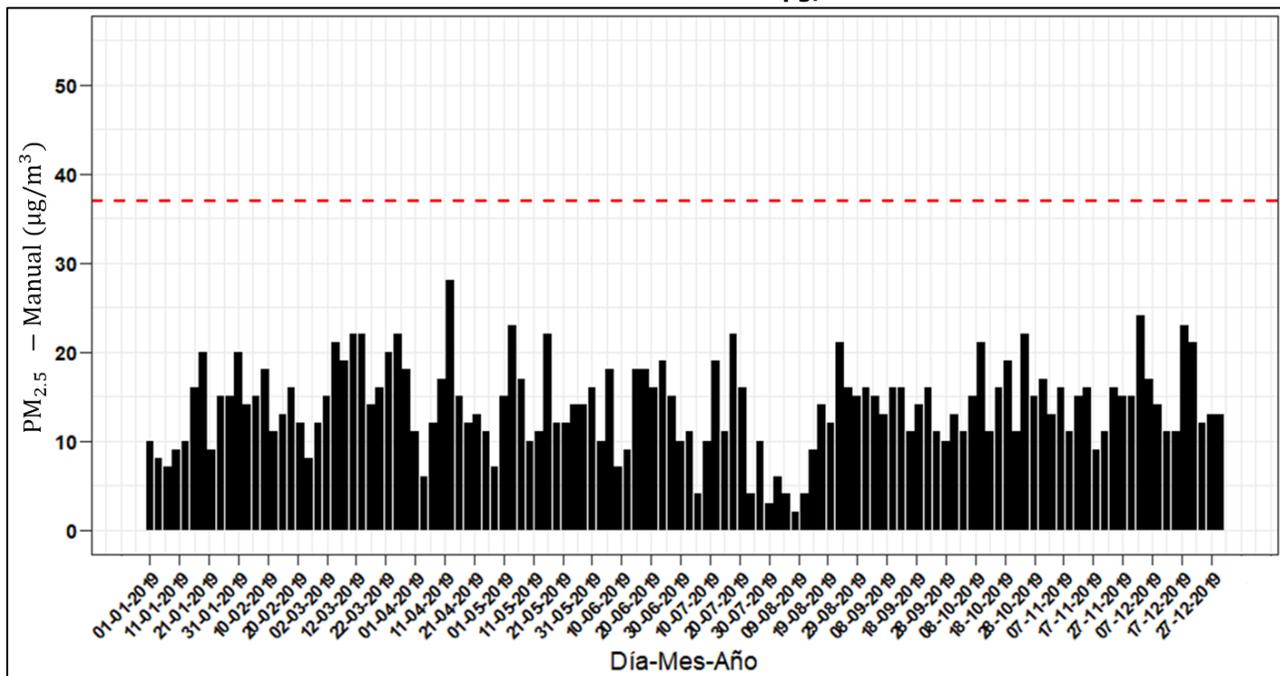


Figura 7. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM_{2.5} - Manual durante el año 2019 en el SVCA de Manizales. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM_{2.5} establecido en la Resolución 2254 de 2017: 37 µg/m³.

3.2. EQUIPOS MANUALES: COMPARACIÓN PRELIMINAR CON NORMA ANUAL

Se realizó un ejercicio de comparación del promedio aritmético obtenido para las concentraciones de PM_{10} (Figura 8) y $PM_{2.5}$ (Figura 9) para el periodo completo de análisis. Lo anterior con el fin de analizar de forma preliminar las diferencias 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 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En la Figura 10 se presenta la variación promedio de concentraciones de PM_{10} (Figura 10 a) y $PM_{2.5}$ (Figura 10 b) por días de la semana en las estaciones de la ciudad. En ésta se ratifica 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. Se evidencia que las estaciones Liceo 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, 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 una disminución en la concentración 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 domingo, asociado directamente a la actividad industrial del sector y disminución del tráfico vehicular.

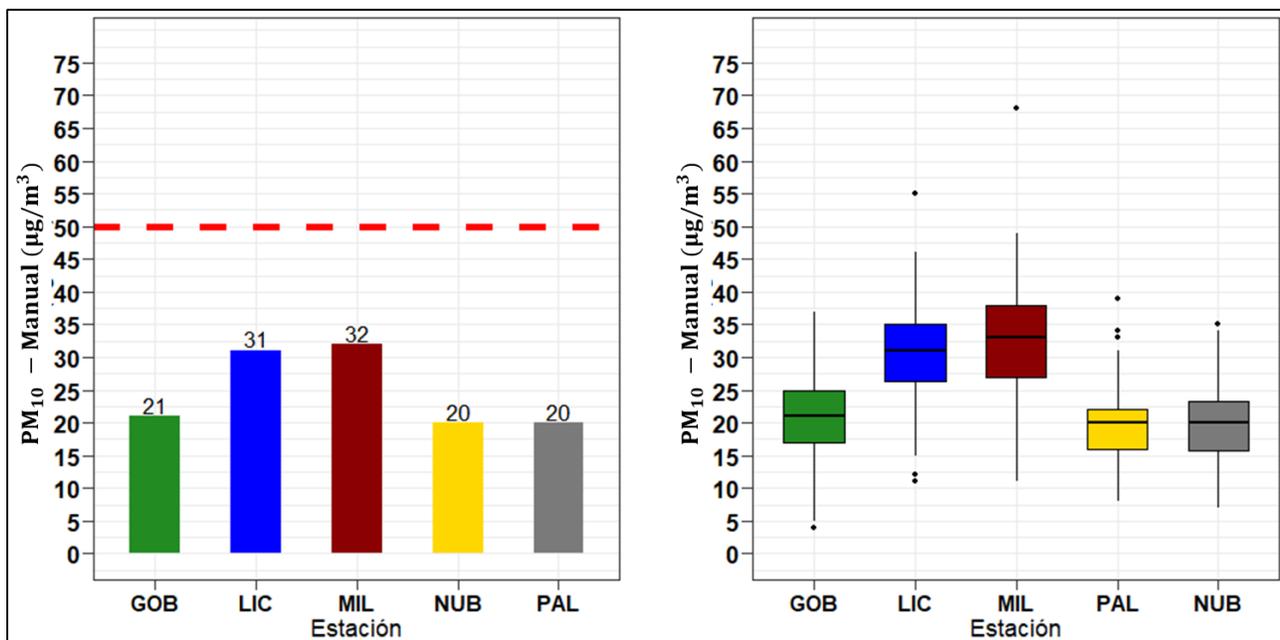


Figura 8. Concentración promedio (izquierda) y diagrama de cajas (derecha) de las estaciones de PM_{10} - Manuales durante el año 2019. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS: $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

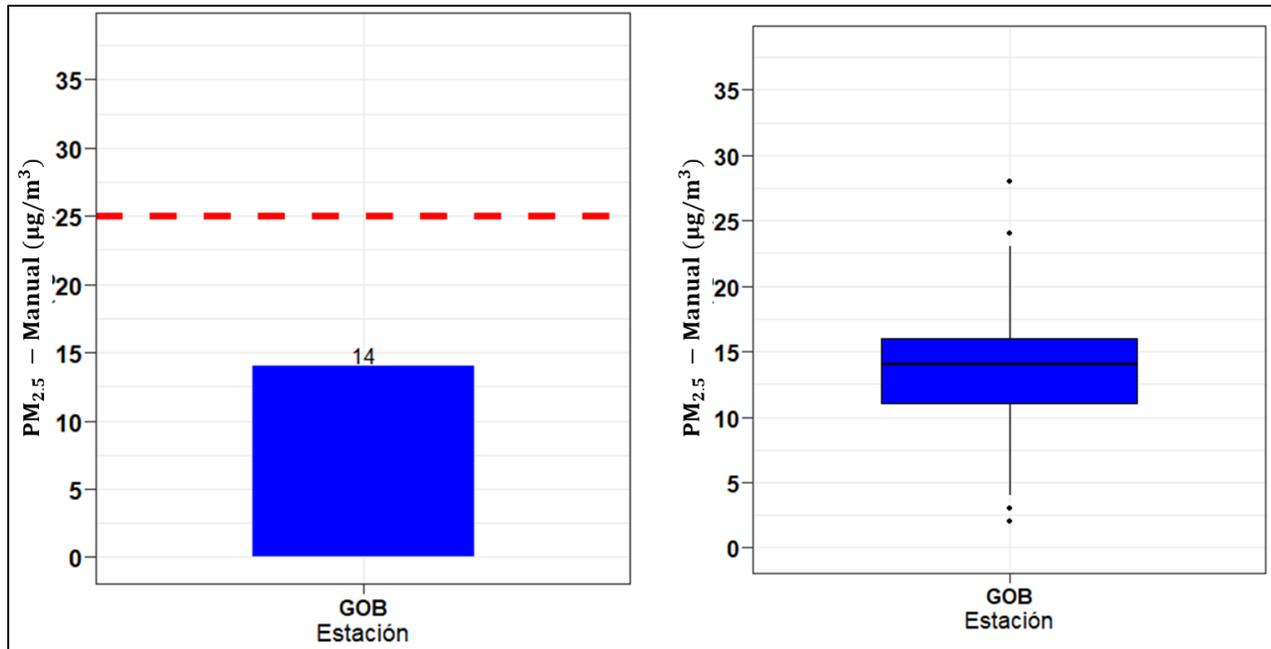


Figura 9. Concentración promedio (izquierda) y diagrama de cajas (derecha) de la estación PM_{2.5} - Manual durante el año 2019. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS: 25 µg/m³.

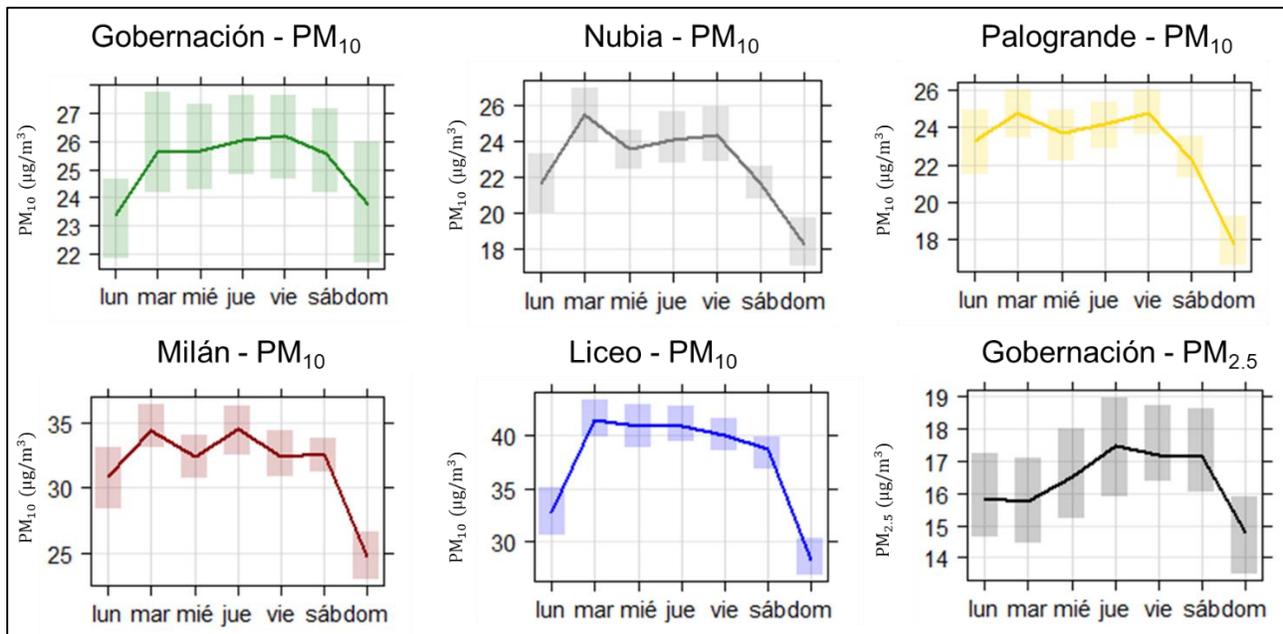


Figura 10. Variación promedio de concentraciones por días de la semana de para PM₁₀ y PM_{2.5} - Manuales, durante el año 2019. La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%.

3.3. EQUIPOS MANUALES: ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROMEDIOS ENTRE PM₁₀ Y PM_{2.5} EN LA ESTACION GOBERNACIÓN.

Actualmente, en la estación Gobernación se encuentran juntos los equipos 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 a 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.

En la Figura 11 se presentan la relación entre las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} obtenidas en la estación Gobernación en lo corrido del año 2019. 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).

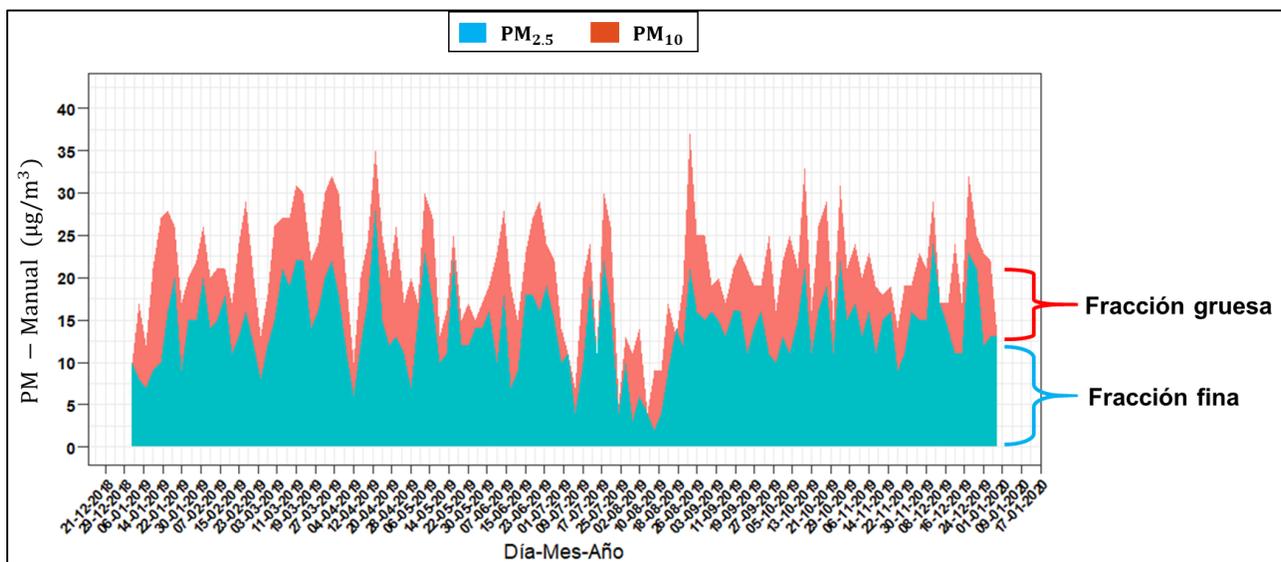


Figura 11. Relación entre el material particulado PM₁₀ - PM_{2.5} - Manuales en la estación Gobernación durante el año 2019.

3.4. EQUIPOS MANUALES: INDICE DE CALIDAD DEL AIRE (ICA) PARA PM₁₀ Y PM_{2.5}

La Figura 12 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de PM - Manuales. 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 (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 la calidad del aire se clasificó como buena en la mayoría de las estaciones de PM₁₀, sólo se presentaron dos (2) días con calidad de aire moderada: una (1) en Liceo el 23 de marzo y una (1) en Milán el 21 de noviembre. De otra parte, la estación con medición de PM_{2.5} (GOB) presentó

calidad del aire moderada para el 70% de los días medidos, al ser una fracción del PM más pequeña, de mayor afectación a salud humana, se destaca la importancia de continuar con medidas que permitan identificar escenarios de riesgo para la ciudadanía.

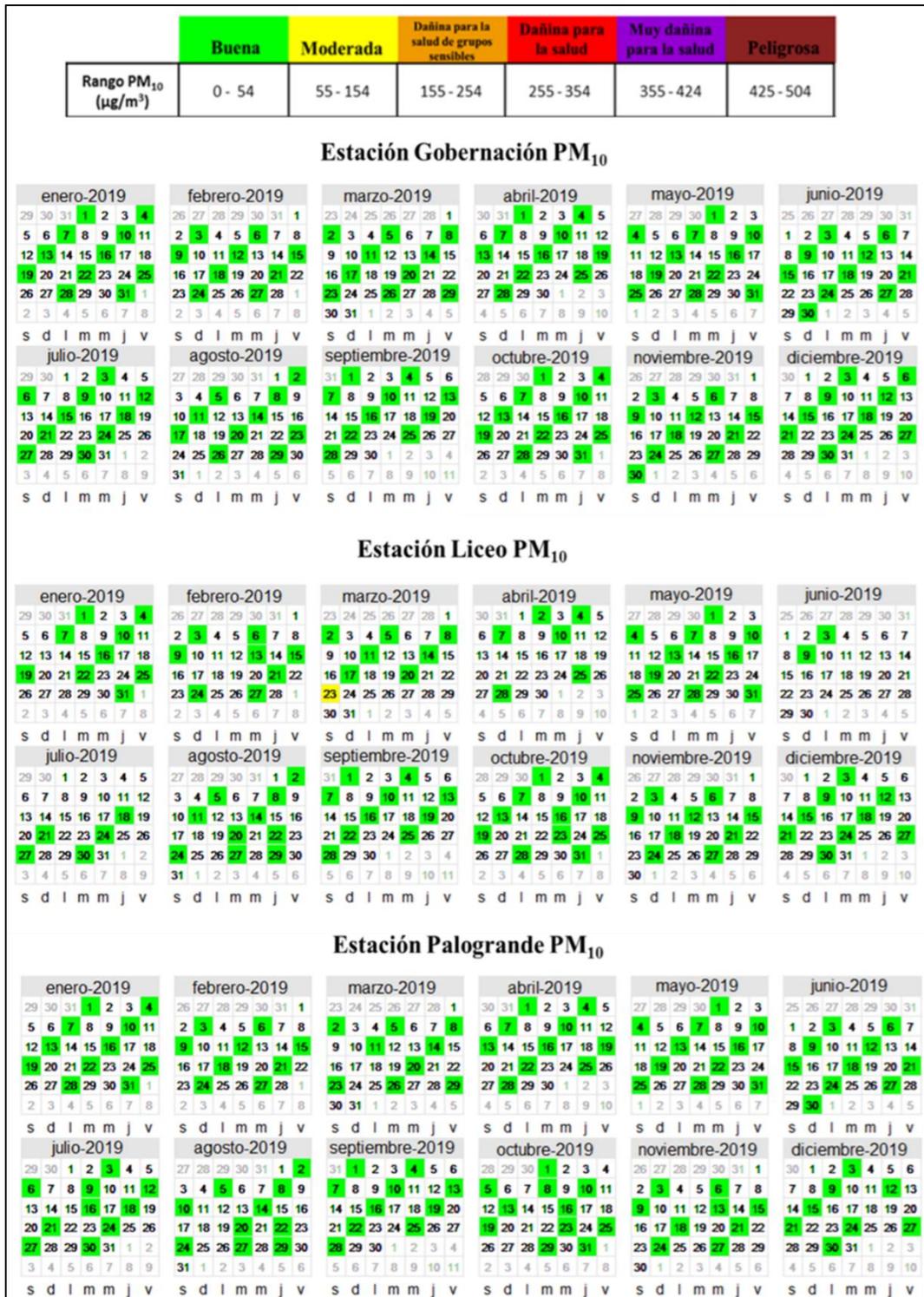


Figura 12. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ – Manual: Gobernación, Liceo y Palogrande en Manizales durante el año 2019. Basado en la resolución 2254 de 2017 de MADS.

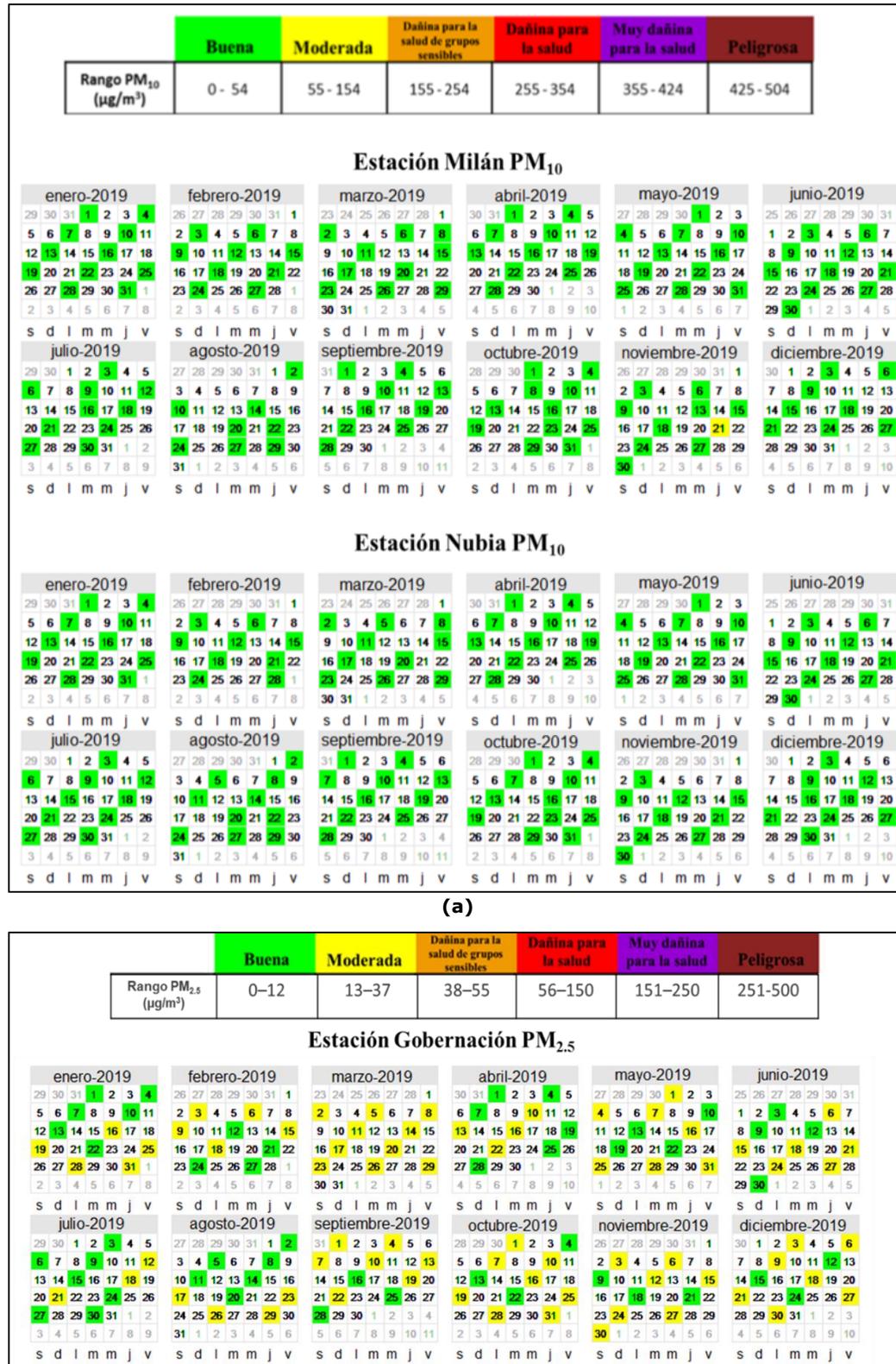
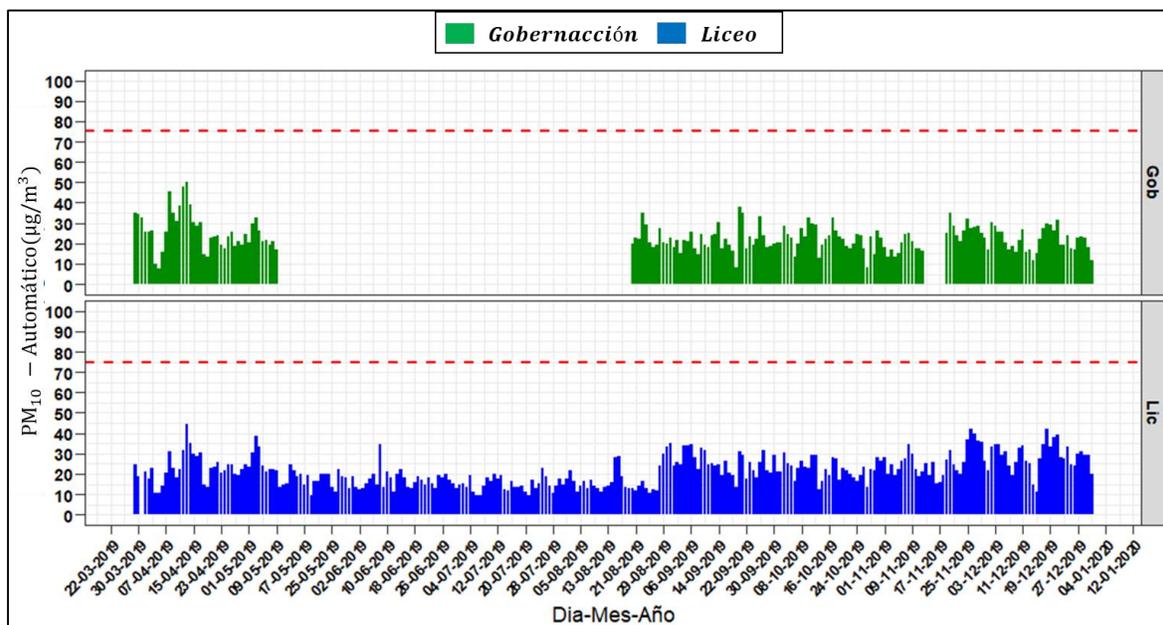


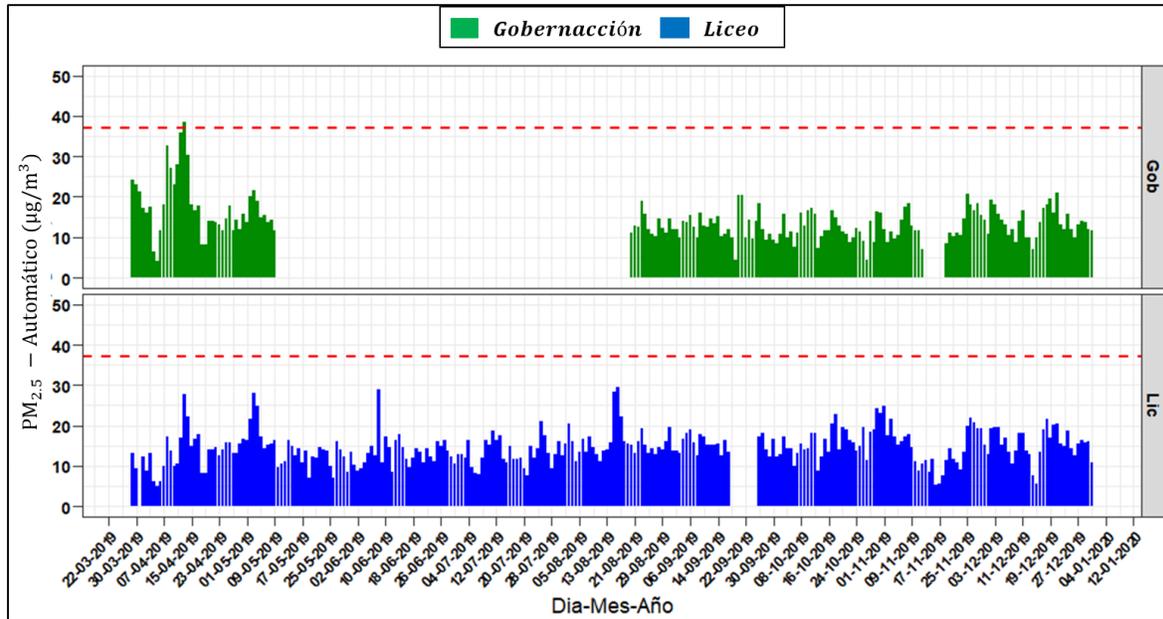
Figura 13. Índice de Calidad del Aire (ICA) para (a) PM₁₀ – Manual: Milán y Nubia (b) PM_{2.5} – Manual: Gobernación en Manizales durante el año 2019. Basado en la resolución 2254 de 2017 de MADS.

3.5. EQUIPOS AUTOMÁTICOS PM₁₀ Y PM_{2.5}: ANÁLISIS DE PROMEDIOS Y COMPORTAMIENTO EN LA CIUDAD.

Durante el año 2019 la corporación autónoma regional de Caldas - Corpocaldas adquirió dos equipos automáticos que permiten medir concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} cada dos minutos, proporcionando nuevos análisis acerca del comportamiento de estos contaminantes a lo largo del día en la ciudad, no obstante, se aclara que estos equipos fueron instalados en las estaciones Liceo y Gobernación junto a los equipos de referencia (PM – Manuales) con el objetivo de dar un proceso de trazabilidad y calibración de los datos obtenidos por estos equipos. La Figura 14 presenta el comportamiento temporal de las concentraciones de los equipos automáticos (promedio diario) durante el año 2019, para las estaciones Gobernación y Liceo. Se identifica concordancia en el comportamiento de las variables tanto en PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos en ambas estaciones, alcanzando los niveles máximos para las mismas fechas, por ejemplo, la semana del 12 abril se presentaron altas concentraciones en ambas estaciones tanto en PM₁₀ como PM_{2.5}. Esto indica que ambas estaciones están influenciadas por las mismas fuentes, las cuales se componen principalmente de tráfico vehicular y actividad industrial (tostión de café e incineración de residuos). Los datos de la estación Gobernación presentan un bache entre mayo y agosto debido a un proceso de revisión y estabilización del equipo.



(a)



(b)

Figura 14. Evolución temporal de concentraciones diarias de los equipos PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos durante el año 2019 en el SVCA de Manizales. (a) PM₁₀ (b) PM_{2.5}. La línea punteada roja hace referencia a los límites máximos promedio diario de PM₁₀ y PM_{2.5} respectivamente establecido en la Resolución 2254 de 2017 de MADS: 75 µg/m³ y 37 µg/m³

La Figura 15 presenta la evolución promedio diaria anual y por día de la semana anual de las estaciones de PM - Automáticas (Gobernación y Liceo) para el periodo 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). Durante el mediodía se presentan concentraciones con promedios inferiores a los 20 µg/m³ en ambos contaminantes, un comportamiento atípico de acuerdo con las horas de alto tráfico vehicular, estos valores se presentan debido a fenómenos de dilución y dispersión de contaminantes relacionados con la altura de la capa de mezcla de la ciudad, tal como lo demostraron Cuesta y colaboradores, 2020, donde identificaron que la altura de esta capa de mezcla aumenta hacia el mediodía debido al levantamiento de las masas de aire que se calientan por efecto de la radiación solar.

Estos máximos de concentración promedio horaria en la estación Liceo se registraron en la tercera hora de movilidad de la ciudad (entre las 6 y 8 pm) con valores cercanos a los 34 µg/m³ para PM₁₀ y 19 µg/m³ para PM_{2.5}. Por su parte la estación Gobernación registró valores de 33 µg/m³ para PM₁₀ y 17 µg/m³ para PM_{2.5} en ambas horas de movilidad. Además, se observa el perfil promedio para 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 10% 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.

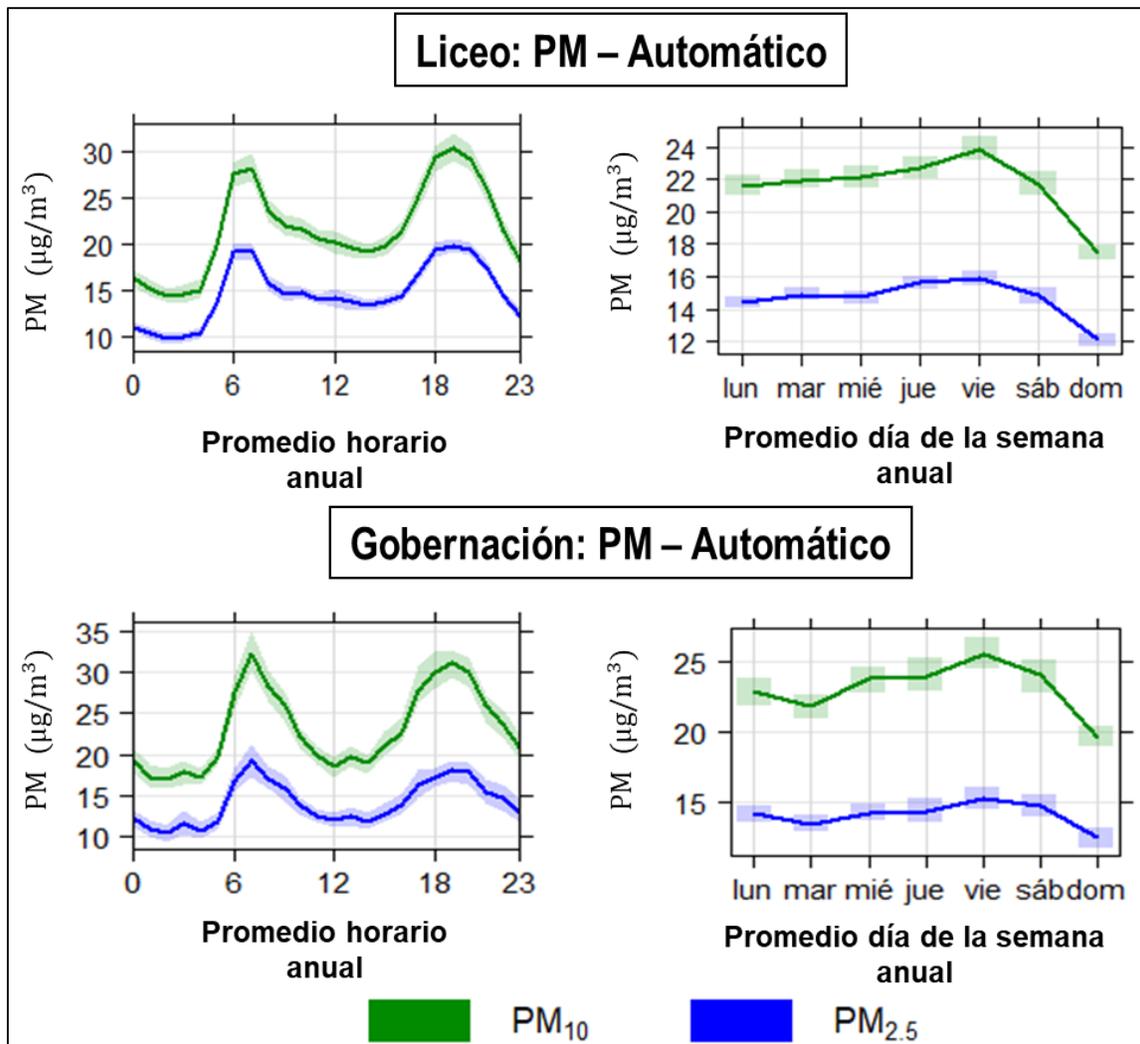


Figura 15. Promedio horario anual y día de la semana anual para concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos durante el año 2019 en las estaciones Gobernación y Liceo.

4. RESULTADOS MONITOREO DE GASES

4.1. MONITOREO DE OZONO TROPOSFERICO (O₃)

Este contaminante secundario presenta un perfil diurno caracterizado por mayores niveles en periodos de mayor radiación solar (entre las 12 y 4 pm), comportamiento asociado a reacciones fotoquímicas de precursores de ozono (NO_x y COV). En la Figura 16 se observa que los datos presentan un perfil coherente para este tipo de contaminante, con promedio octohorario de 18.6 µg/m³ ± 10.7, mínimos de 0.2 µg/m³ y picos máximos por encima de 61 µg/m³. Para el cálculo de la variación de la concentración del ozono en periodos de 8 horas, se empleó la media móvil. Al comparar los valores de ozono octohorario con el límite máximo permisible (100 µg/m³), establecido en la Resolución 2254 de 2017, se observa que la norma de ozono no fue superada durante el periodo de monitoreo. También se observa un vacío de datos en los meses de marzo, mayo y septiembre, esto se presentó por fallas técnicas del equipo y el tiempo que tomó realizar las reparaciones pertinentes.

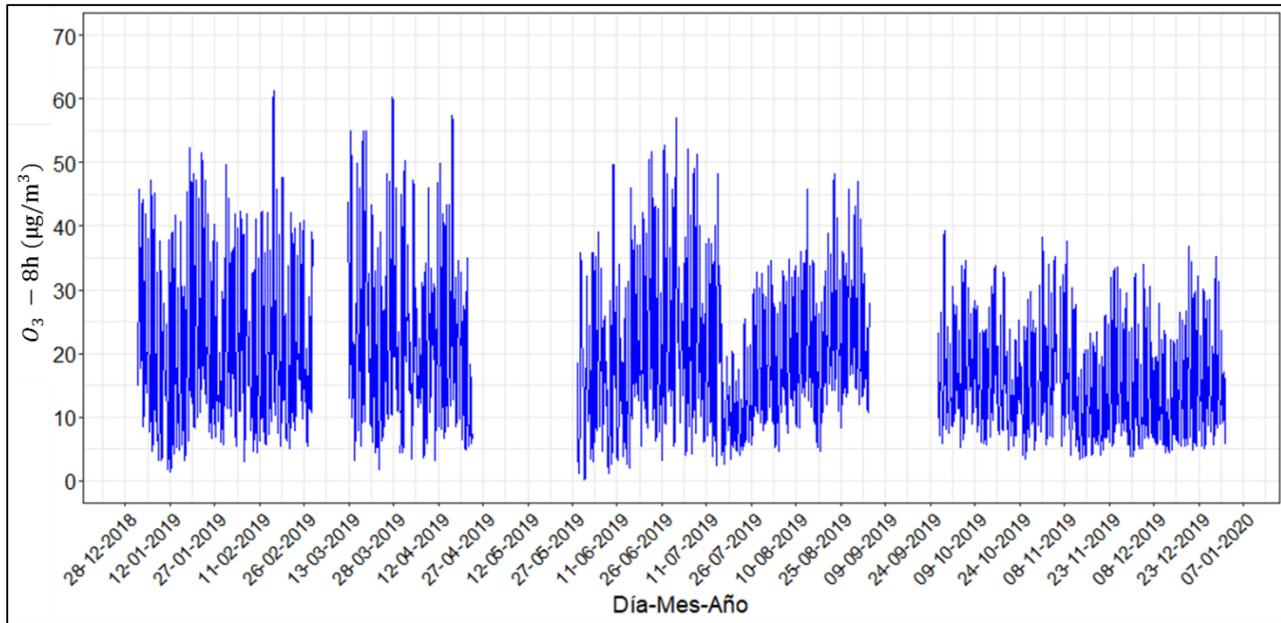


Figura 16. Variación de concentración promedio octohorario de ozono troposférico (O_3), durante año 2019 en la estación Gobernación.

De manera alternativa se presenta en la Figura 17 el resumen de la variación de O_3 y radiación solar promedio horaria, semanal y mensual para todos los datos generados de enero a diciembre de 2019. 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 cercanas a los $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para niveles de radiación promedio cercanos a los $350 \text{ W}/\text{m}^2$. Se observa un desfase de 1 hora entre el inicio de aumento de la radiación y el aumento de ozono, así como el descenso de la radiación y el descenso de ozono, esto se asocia al tiempo de reacción de ozono para aumentar su concentración en la atmósfera, al igual que el tiempo que requiere desaparecer al final del día.

Para el periodo 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 $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, este se asocia posiblemente al descenso de las masas de aire que provienen de la parte alta de la cordillera y contienen ozono que fue generado durante el día.

En la Figura 17 se identificó que las concentraciones durante el día son aproximadamente 2 veces más elevadas que en las noches, con un promedio diurno de $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y uno nocturno de $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 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 diurnos y mensuales evidencian que las variaciones tienen relación directa con la radiación solar, a excepción de los sábados y domingos, los cuales presentan aumento en concentraciones de ozono, con disminución de la radiación solar, lo que se asocia al remanente de ozono generado durante los días de mayor actividad de fuentes de emisión (lunes a viernes).

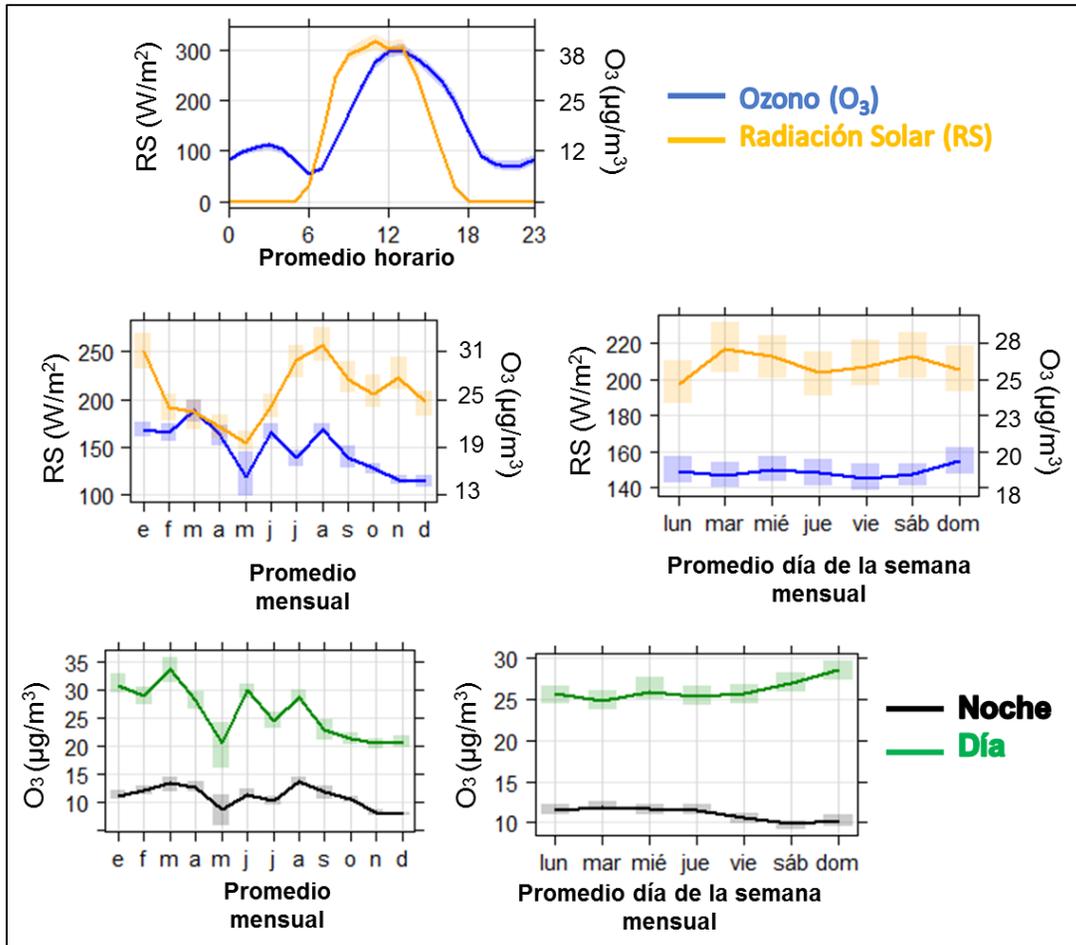


Figura 17. Variación promedio horario, semanal y mensual de ozono troposférico (O₃) y radiación solar; se incluye además el comportamiento promedio mensual y semanal entre las horas diurnas y nocturnas, durante el año 2019 en la estación Gobernación.

4.2. MONITOREO DE DIOXIDO DE AZUFRE (SO₂)

La Figura 18 muestra la evolución de concentraciones horarias de SO₂ durante el periodo de agosto a diciembre, fecha en la que el equipo retoma su actividad debido a fallas técnicas. El promedio aritmético es estimado a partir de los datos cinco minútales del equipo, donde se observaron concentraciones horarias promedio de 4.6 µg/m³. Se destaca que en ningún caso la concentración de SO₂ supera el límite máximo establecido en la normativa colombiana (100 µg/m³ para 1 hora).

Adicionalmente se presenta en la Figura 19 la variación promedio horaria, mensual y por día de la semana para el año 2019. Se observa un comportamiento con valores máximos de concentración cercano 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 7 µg/m³ y 6 µg/m³ respectivamente; se observan mínimos alrededor de los 3 µg/m³ al medio día (entre la 11 am y 1 pm). Al comparar los días de la semana se observa nuevamente un comportamiento similar al CO observándose las mayores concentraciones entre los días hábiles el lunes con promedios alrededor de los 4.7 µg/m³.

Finalmente, gracias al apoyo de los registros reportados por el servicio geológico colombiano (SGC) a través de sus boletines semanales acerca de la actividad relacionada con el volcán nevado del Ruiz ubicado a 28 km al sureste de la ciudad, ver sección 5.1, se identificó un posible aumento de las concentraciones máximas horarias registradas para SO_2 durante los dos últimos meses del año relacionados directamente a la altura de la columna de gases volcánicos observados por el SGC, particularmente cuando esta supera los 1500 metros de altura desde la boca del volcán y la dirección del viento predominante se dirige hacia el noroccidente.

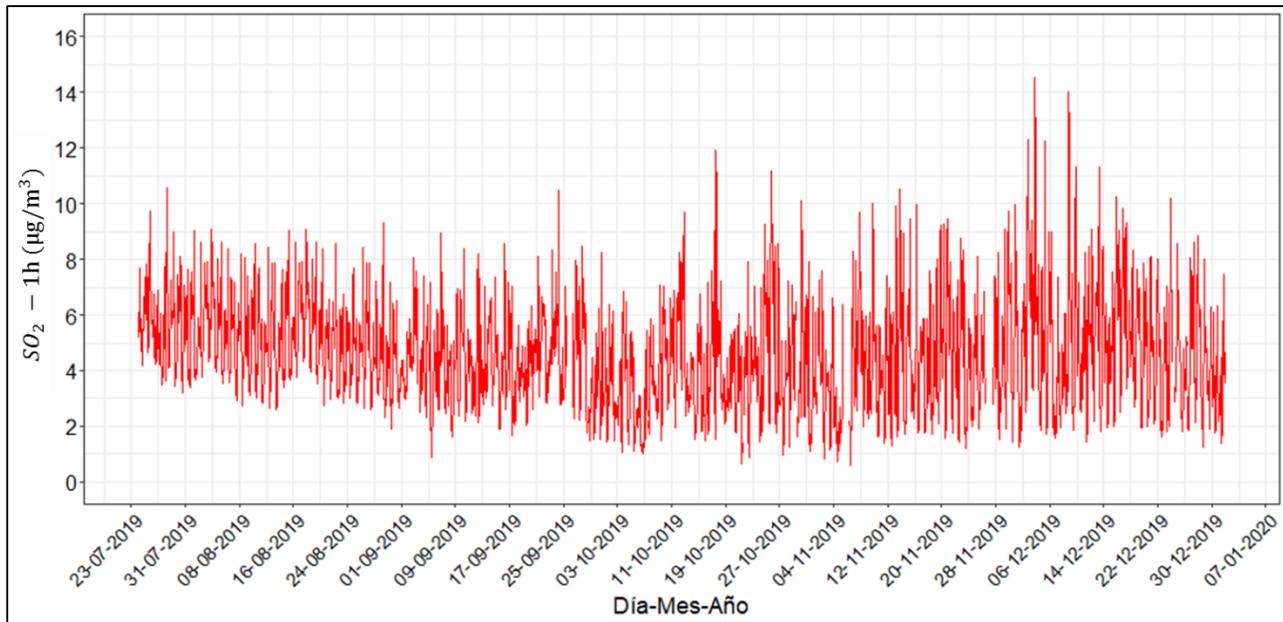


Figura 18. Variación de concentración promedio diario de dióxido de azufre (SO_2) durante el año 2019 en la estación Gobernación.

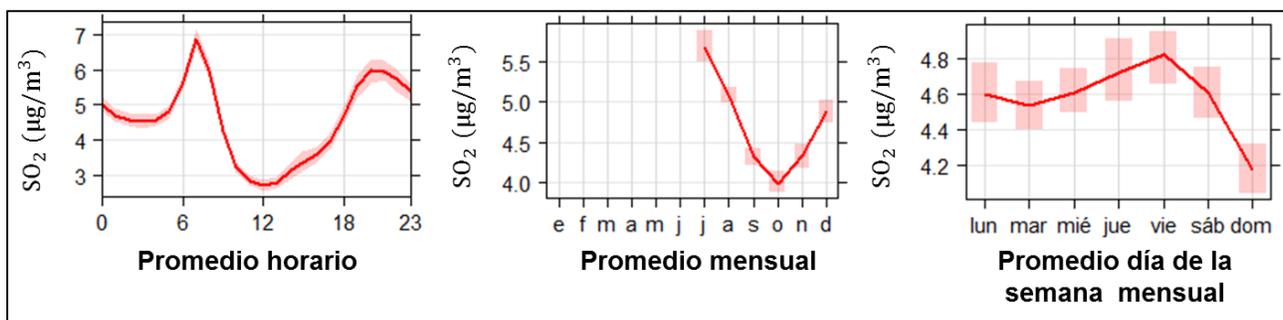


Figura 19. Variación promedio horaria y por día de la semana de dióxido de azufre (SO_2) durante el año 2019 en la estación Gobernación.

4.3. MONITOREO DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

La Figura 21 muestra los resultados del monitoreo de CO para el año 2019. Se muestran los registros de concentración de CO octohorario. 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 de ocho (8) horas y $35000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedio horario).

La variación promedio horaria, diaria y mensual presentada en la Figura 20 muestra que los picos máximos en las concentraciones del CO ocurren en las horas pico de tráfico vehicular al inicio y fin de la jornada laboral (alrededor de las 7am y las 6pm), donde se han observado promedios horarios de $824 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 405$, mínimos de $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ observados en horas de la madrugada (entre la 1 y 5 am, hora de menor actividad vehicular) y máximos cercanos a $1400 \mu\text{g}/\text{m}^3$, observados entre las 6 y 8 pm (hora pico de movilidad en la ciudad).

Al comparar los días hábiles de la semana, no se halló ninguna relación directa entre los días hábiles, presentándose promedios horarios entre los 850 y $900 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo, se destaca el comportamiento de los fines de semana (sábado y domingo), donde se observa que los días sábados se comportan como un día laboral, mientras que el domingo se presentan las menores concentraciones con promedios horarios de $650 \mu\text{g}/\text{m}^3$, es decir, una reducción del 38 % para este contaminante. Este resultado es coherente ya que los vehículos a gasolina (principalmente motos y vehículo particular) son aportantes de cantidades importantes de CO a la atmósfera, tal como lo evidencia la actualización del inventario de emisiones de la ciudad año base 2017, en donde las motos y vehículos particulares aportaron un total de 11599.7 ton/año y 10653 ton/año , es decir, un 41% y 38% respectivamente al total de las emisiones estimadas (Unal – Corpocaldas, 2019).

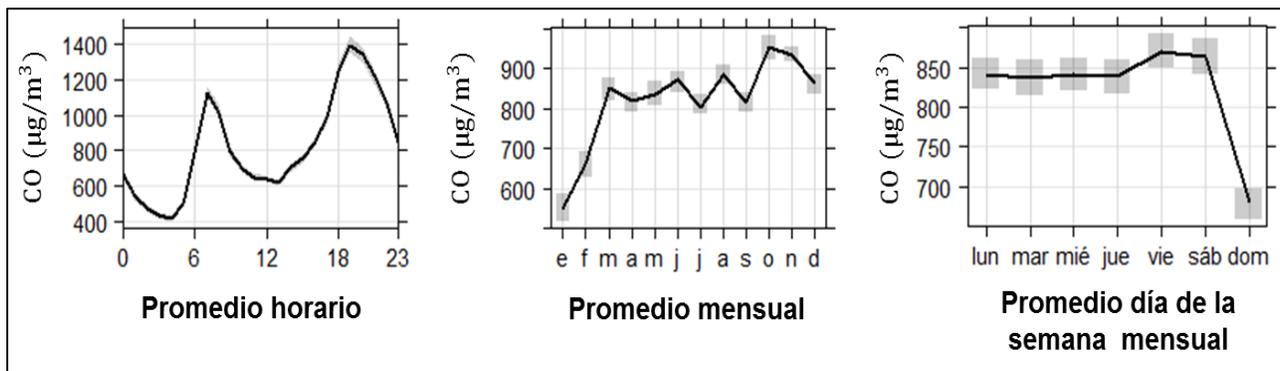


Figura 20. Variación promedio horaria, mensual y por día de la semana de monóxido de carbono (CO) durante el año 2019 en la estación Gobernación.

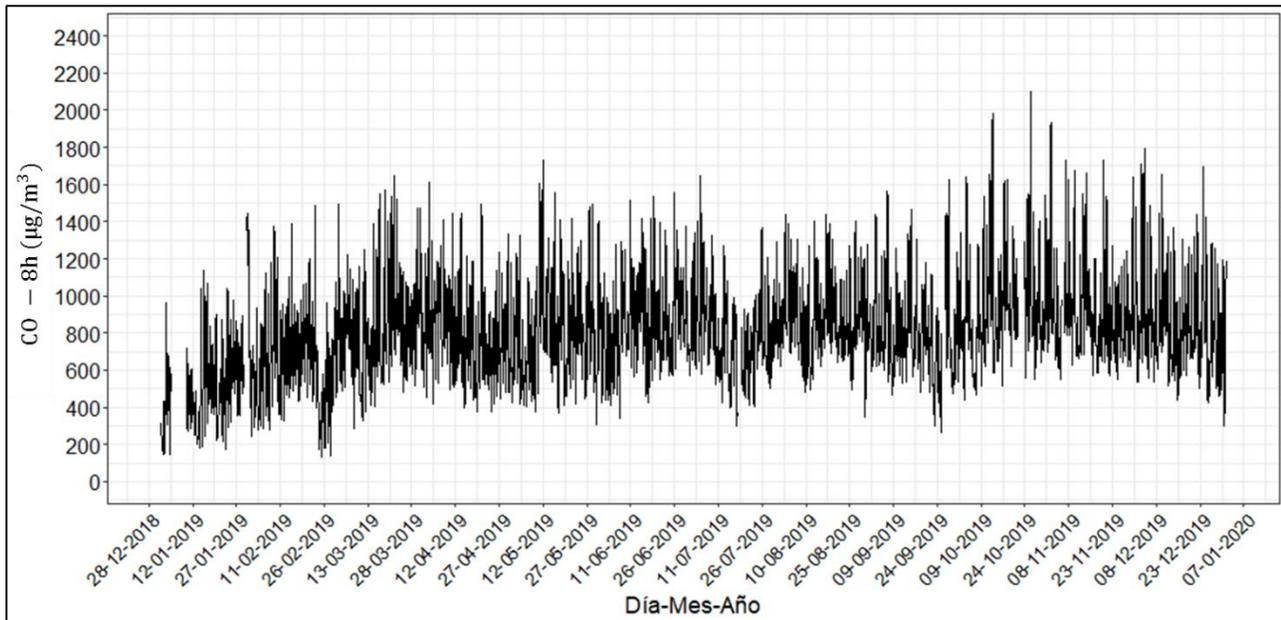


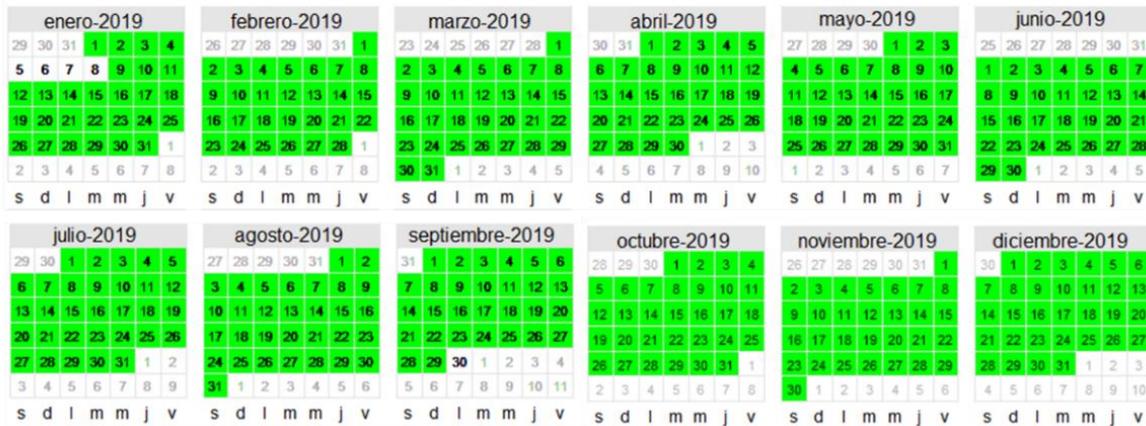
Figura 21. Variación de concentración promedio octohorario de monóxido de carbono (CO) durante el año 2019 en la estación Gobernación. El límite máximo permisible establecido en la Res. 2254 de 2017 de MADS: 5000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

4.4. INDICES DE CALIDAD DEL AIRE (ICA) PARA O_3 , SO_2 Y CO

La Figura 22 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de CO, SO_2 y O_3 . El ICA representa mediante un indicador de color, el estado de la calidad del aire de acuerdo a la concentración de cada contaminante y su posible afectación a la salud. Para el cálculo de este indicador (ICA) tanto en O_3 , SO_2 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 todos los contaminantes.

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

Estación Gobernación CO (Octohorario)



Estación Gobernación O₃ (Octohorario)



Estación Gobernación SO₂ (horario)



Figura 22. Índice de calidad del aire (ICA) para CO, O₃ y SO₂ en Manizales durante el año 2019. Basado en la resolución 2254 de MADS.

5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS

5.1. EMISIONES VOLCÁNICAS

Durante el año 2019 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 4 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, aproximadamente el 65% de los días reportados presentaron predominancia de vientos hacia 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 23 para los días 06 de septiembre y 15 de octubre del 2019, donde se observa el comportamiento de la pluma del volcán y altas concentraciones de SO₂.

Tabla 4. Resumen de emisiones volcánicas significativas durante el 2019.

Fecha	Altura de la columna de gases (m)
07-ene / lunes	1800
08-ene / martes	1900
29-ene / martes	2000
06-feb / miércoles	1500
21-feb / jueves	2000
28-feb / jueves	1500
21-mar / jueves	1500
31-mar / domingo	1500
17-abr / miércoles	1800
18-abr / jueves	1800
19-abr / viernes	1800
24-abr / miércoles	2000
04-jul / jueves	1400
24-ago / sábado	1300
6-sep / viernes	1290
20-sep / viernes	1530
30-sep / lunes	1400
11-oct / viernes	2070
15-oct / martes	1430
25-oct / viernes	1230
04-nov / lunes	1665
05-nov / martes	1300
14-nov / jueves	2400
24-nov / domingo	1400
30-nov / sábado	2410
08-dic / domingo	1500
16-dic / lunes	1890

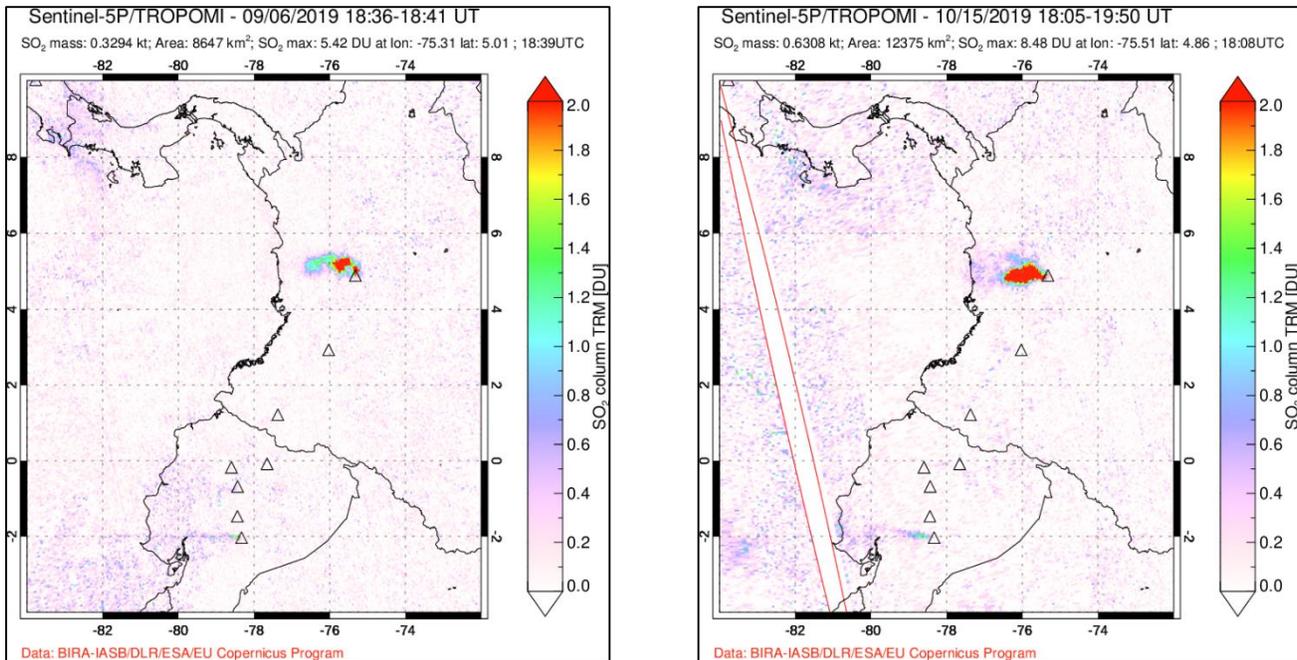


Figura 23. Ejemplos: Emisiones de SO₂ registradas por los satélites. Izquierda: TROPOMI: Día viernes 06/09/2019. Derecha: OMI: Día martes 10/15/2019

5.2. RELACIÓN ENTRE LOS EQUIPOS AUTOMÁTICOS, EJEMPLO ESTACIÓN GOBERNACIÓN

En la Figura 24 se presenta la variación promedio horaria para los contaminantes SO₂, O₃, PM_{2.5} - Automático y CO en la estación Gobernación, para el año 2019. Se observa que el SO₂, 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, siendo las fuentes móviles las de mayor contribución de la zona, un indicativo de que en Manizales estos son contaminantes primarios producto de fuentes vehiculares. Por su parte, el O₃ presenta un comportamiento diferente a los contaminantes anteriormente analizados, ya que las mayores concentraciones de O₃ se presentan alrededor del mediodía, horas en que se presenta la mayor radicación solar lo que favorece las reacciones de formación de O₃, 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 O₃ como los NO_x y COV's ya sea de manera directa o indirecta (Sharma y colaboradores, 2017; Özbay y colaboradores, 2011).

Finalmente se presenta la Tabla 5 con los diferentes coeficientes de correlación lineal de Pearson entre los promedios diarios de los contaminantes analizados para todo el periodo de análisis, de allí se confirma la relación positiva entre el SO₂, CO y PM_{2.5} siendo el mayor coeficiente el correspondiente a la relación entre el SO₂ y CO (0.737) permitiendo concluir que todos ellos provienen de fuentes primarias de emisión, siendo las fuentes móviles en ruta las de mayor aporte, resultados que concuerdan con los observado en los inventarios de emisiones estimados en la ciudad (González y colaboradores, 2017, Unal – Corpocaldas, 2019).

Tabla 5. Coeficiente de correlación lineal de Pearson entre los promedios diarios de contaminantes durante el año 2019.

	CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1	-0.304	0.474	0.737
O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-0.305	1	-0.149	-0.448
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.474	-0.149	1	0.50
SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.737	-0.448	0.498	1

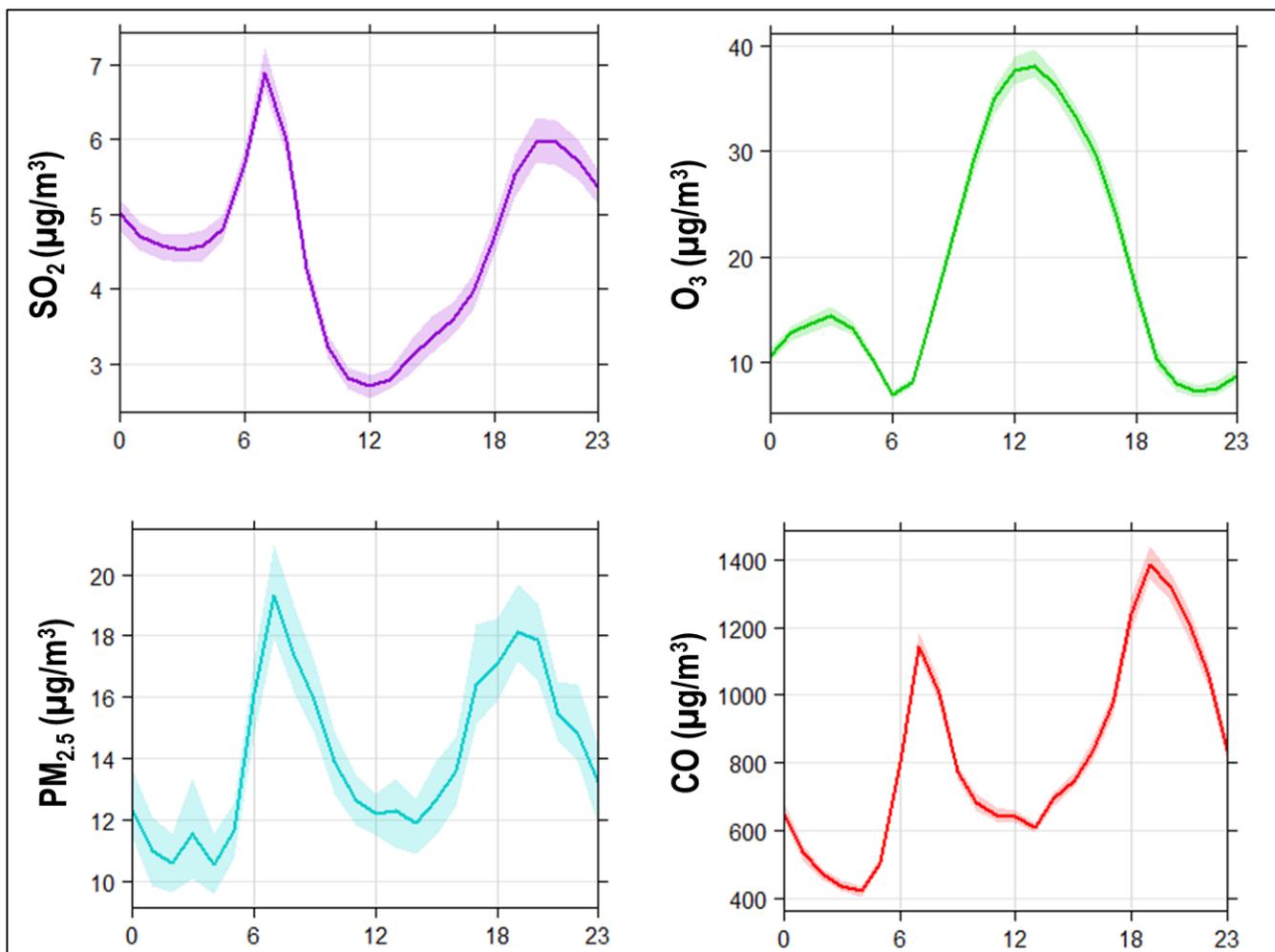


Figura 24. Comparación de perfiles promedio horarios de concentración de SO₂, O₃, PM_{2.5}-Automático y CO en la estación Gobernación (Año 2019)

6. REFERENCIAS

- 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/>
- 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>