

SIMAC

SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO AMBIENTAL DE CALDAS



BOLETÍN CALIDAD DEL AIRE MANIZALES PERIODO ENERO - SEPTIEMBRE DE 2019

*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 periodo de enero a septiembre 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: PM₁₀ Y PM_{2.5} DURANTE EL PERIODO ENERO – SEPTIEMBRE DEL 2019	6
3.1. EQUIPOS MANUALES: ANÁLISIS DE PROMEDIOS DIARIOS.	6
3.2. EQUIPOS MANUALES: COMPARACIÓN PRELIMINAR CON NORMA ANUAL.....	10
3.3. EQUIPOS MANUALES: ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROMEDIOS ENTRE PM ₁₀ Y PM _{2.5} EN LA ESTACION GOBERNACIÓN	12
3.4. EQUIPOS MANUALES: INDICE DE CALIDAD DEL AIRE (ICA) PARA PM ₁₀ Y PM _{2.5}	13
3.5. EQUIPOS AUTOMÁTICOS PM ₁₀ Y PM _{2.5} : ANÁLISIS DE PROMEDIOS Y COMPORTAMIENTO EN LA CIUDAD.	14
4. RESULTADOS MONITOREO DE GASES	16
4.1. MONITOREO DE OZONO TROPOSFERICO (O ₃)	16
4.2. MONITOREO DE DIOXIDO DE AZUFRE (SO ₂)	18
4.3. MONITOREO DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO)	20
4.4. INDICES DE CALIDAD DEL AIRE (ICA) PARA O ₃ , SO ₂ Y CO	22
5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIO COMPORTAMIENTOS EN LA CIUDAD DE MANIZALES, EQUIPOS AUTOMÁTICOS. 23	
6. REFERENCIAS	25

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, actualmente la Resolución 2254 de 2017 (MADS, 2017).

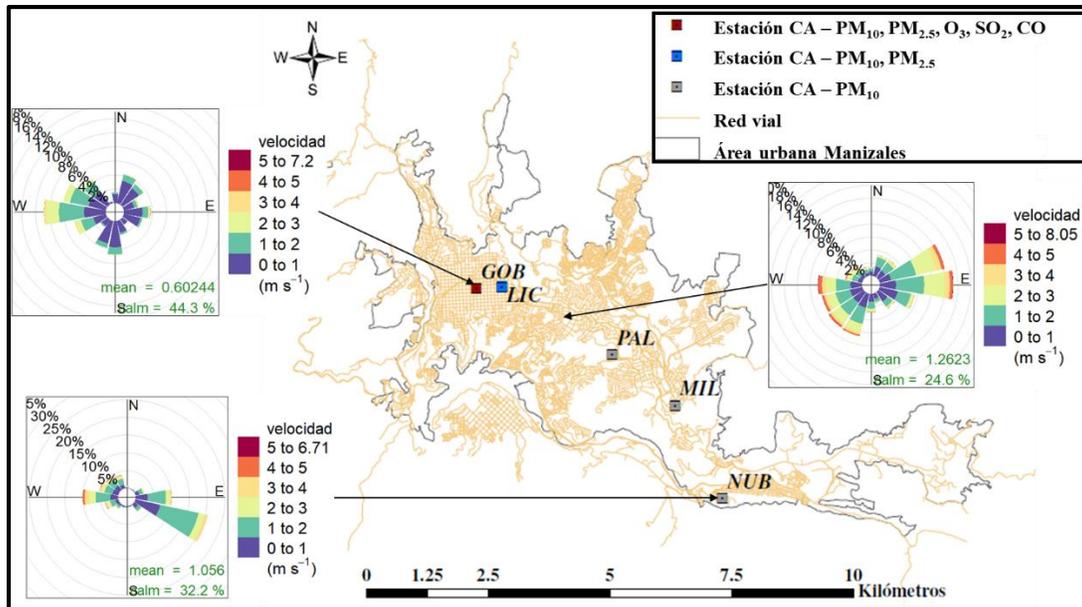


Figura 1. Mapa de Manizales con ubicación de las estaciones de calidad del aire y rosas de viento de estaciones meteorológicas representativas para el periodo enero-septiembre del 2019 (Estaciones meteorológicas en orientación occidente a oriente: Gobernación de Caldas, Hospital de caldas y La Nubia).

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

Estación	Características y fuentes de contaminantes*	Equipos	Año Instalación	Año de óptima operación – histórico	Estado actual	Latitud / Longitud	Altitud msnm
Gobernación	CU, SC – MTV, PAI	PM ₁₀ – Manual ^a	2009	2009	Operación óptima.	N 5° 4' 6.53" W 75° 31' 1.54"	2155
		PM _{2.5} - Manual ^a	2009	2009	Operación óptima.		
		SO ₂ - Automático	2014	Desde el 2019, problemas de estabilización.	Operación óptima desde julio 2019.		
		O ₃ - Automático	2014	Salió de operación durante los años 2016-2017 por fallas.	Operación óptima.		
		CO - Automático	2014	2018 – Múltiples fallas durante sus primeros años.	Operación óptima.		
		PM ₁₀ y PM _{2.5} - Automático ^b	2019	2019	Operación óptima.		
UN Palogrande	ZC, SR – ATV, SAI	PM ₁₀ - Manual ^c	2009	2009	Operación óptima.	N 5° 3' 22.4" W 75° 29' 31.3"	2154
UN Nubia	ZSE, SR – BTV, AZI	PM ₁₀ - Manual ^c	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	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	2019	2019	Operación óptima.		
Milán	ZC, SR – MAI, MTV	PM ₁₀ - Manual ^c	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 Tabla 2 presenta los consolidados meteorológicos de la estación Hospital de Caldas de la ciudad de Manizales para los meses de enero a septiembre de 2019, así como los promedios consolidados para el periodo de enero a septiembre de los años 2018 y 2019. Esta estación es elegida como punto de referencia debido a: 1. Es una estación que ha presentado registros estables durante el tiempo de medición. 2. Por su ubicación a más de 10m de altura (sobre la terraza del edificio del Hospital de Caldas) y 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 a los datos de las estaciones meteorológicas más cercanas.

En la Figura 2 se observa el comportamiento bimodal de la lluvia de la ciudad, con un nivel de precipitación considerablemente bajo a inicios del año (final de periodo de bajas lluvias) que aumenta a lo largo del año hasta el mes de mayo (inicio de periodo de altas lluvias) siendo abril el mes de mayor precipitación con un equivalente al 25% (310 mm) del total de las lluvias del periodo de análisis, para junio disminuye esta variable dando inicio al periodo de bajas lluvias, donde se identificaron los meses con menores registros siendo el mes de agosto equivalente a una precipitación acumulada del 1% (8.6 mm) del total de las lluvias presentadas durante el periodo de análisis (1263 mm). Finalmente, para septiembre los registros aumentaron dando comienzo al periodo de altas lluvias registrando 98 mm de lluvia.

Por su parte, se identifica una influencia similar del régimen bimodal de la ciudad en el comportamiento de variables como la temperatura, la radiación solar, la humedad relativa y la presión atmosférica. En la Figura 2 se observa además una 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 bajas que impiden una rápida dispersión de los contaminantes. Al comparar los registros del año 2019 con el mismo periodo del año 2018 observa un aumento de 0.8 °C en la temperatura del aire, así como un aumento considerable en la precipitación (105 mm), las otras variables permanecen casi invariables.

Las condiciones climáticas juegan un papel importante en la dinámica de los contaminantes en el aire. Existen contaminantes secundarios como el Ozono (O_3) 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 suspendido, 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 será mayor y su concentración en la atmósfera disminuirá.

Tabla 2. Estadísticos para las variables de la estación meteorológica Hospital de Caldas

Periodo	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]
2019 (Ene)	18.5	1.4	160.5	594.7	76.5	103.4	294.6	997
2019 (Feb)	18.4	1.3	149.7	594.6	81.9	173.0	239.5	1185
2019 (Mar)	18.2	1.3	114.2	594.9	82.7	248.0	240.4	1148
2019 (Abr)	17.8	1.2	114.3	595.6	84.0	309.8	216.0	1034
2019 (May)	17.8	1.0	154.4	595.4	84.7	230.0	211.9	1190
2019 (Jun)	18.3	1.2	115.3	595.4	81.4	77.4	222.4	1063
2019 (Jul)	18.2	1.2	174.5	595.3	79.2	14.4	252.5	1143
2019 (Ago)	18.9	1.5	97.8	595.2	74.2	8.6	276.8	1083
2019 (Sep)	18.4	1.2	159.3	595.4	79.4	98.2	255.4	1113
2018 (Ene - Sep) *	17.5	1.2	158.2	595.5	81.7	1157.8	237.5	---
2019 (Ene - Sep) *	18.3	1.3	137.8	595.2	80.4	1262.8	245.5	1106.2

*Correspondiente al promedio entre el 1 de enero y el 30 de septiembre de 2018 y 2019 respectivamente.

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

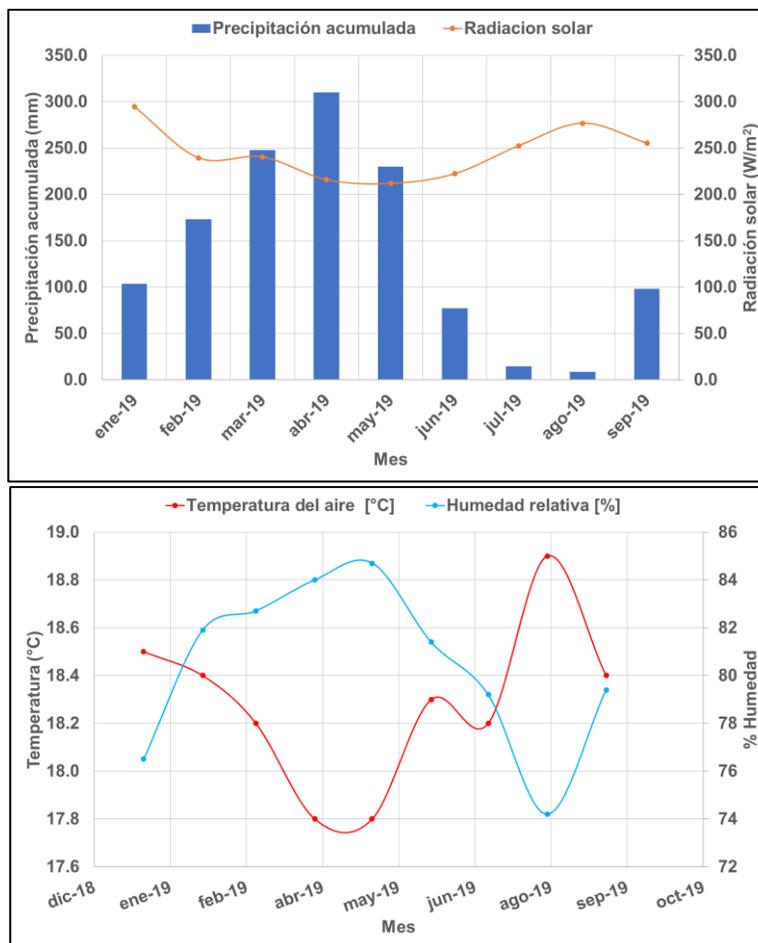


Figura 2. Promedios mensuales para algunas variables meteorológicas de la estación Hospital de caldas. Durante el periodo enero - septiembre del 2019.

3. RESULTADOS MONITOREO DE MATERIAL PARTICULADO: PM₁₀ y PM_{2.5} DURANTE EL PERIODO ENERO – SEPTIEMBRE DEL 2019

3.1. EQUIPOS MANUALES: ANÁLISIS DE PROMEDIOS DIARIOS.

En la Tabla 3 se presentan los estadísticos descriptivos para las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} obtenidas durante el periodo de análisis (enero-septiembre del 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 resultados de la Tabla 3 muestran como la estación Milán ha registrado los valores más altos de PM₁₀ con un promedio aritmético de 32 µg/m³ (desv. std = 8 µg/m³) seguida por la estación Liceo con un promedio aritmético de 30 µg/m³ (desv. std = 8 µg/m³), no obstante, debido a las múltiples fallas presentadas a lo largo del año 2019 en el equipo de la estación Liceo, el número de datos es menor, lo que pudo generar reducción en el promedio de la concentración de material particulado en esta estación, ya 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, 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 hacen uso de diésel como combustible y son responsables del 47% (362 ton/año) y 25% (192 ton/año) respectivamente del total de emisiones de PM₁₀ producto su actividad en la ciudad (González y colaboradores, 2017). Por 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, pudiendo ser este un factor clave en la generación de material particulado re suspendido que es arrastrado por los patrones de viento y registrado por la estación.

En las estaciones PM₁₀ La Nubia, Gobernación y Palogrande, se observó que en general estas estaciones registraron menores concentraciones durante el periodo evaluado, con promedios de 21 µg/m³ en Gobernación (desv. std = 7 µg/m³), 20 µg/m³ en La Nubia (desv. std = 6 µg/m³) y 20 µg/m³ en Palogrande (desv. std = 6 µg/m³); siendo además la estación de La Nubia la que registró la mínima concentración en toda la red con un valor 9 µg/m³ los días jueves 10 de enero y viernes 10 de mayo. El primer día (10 de enero) se registraron concentraciones bajas en todas las estaciones con 11 µg/m³ en Palogrande y 18 µg/m³ Liceo, coincidiendo con las Ferias de Manizales, a pesar de que la ciudad es visitada por miles de turistas las dinámicas de movilidad cambian durante estos días de fiestas lo que pudo influir en la disminución de este contaminante, además de los eventos de lluvia presentadas los días 9 y 10 de enero después de un periodo de sequía de 20 días. El segundo día (10 de mayo) también se registraron bajas concentraciones en las demás estaciones con 13 µg/m³ en Gobernación y 11 µg/m³ en Palogrande, valores asociados nuevamente a eventos de lluvia los días 9 y 10 (máximos valores de precipitación obtenidos para el mes de mayo), la atmósfera es lavada y las partículas suspendidas en el aire son llevadas a tierra con el agua, este fenómeno es conocido como *Scavenging*.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de las concentraciones promedio mensuales de PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales (µg/m³). Durante el periodo enero – septiembre del 2019.

Estadístico*	Año 2019									
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Total
Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar)										
Promedio ± Incertidumbre**	20 ± 1.29	20 ± 1.63	28 ± 1.30	21 ± 1.19	19 ± 1.30	22 ± 1.30	16 ± 1.24	16 ± 1.30	20 ± 1.20	21 ± 1.28
Desviación Estándar	6	4.5	3.2	6.3	5.6	5.1	9	9.7	2.7	6.7
Min. – Max.	10 - 28	13 - 29	22 - 32	10 - 35	13 - 30	14 - 29	5 - 30	4 - 37	16 - 25	4 - 37
Percentil 95%	28	27	31	31	29	29	28	31	24	30
N° Datos	10	10	10	10	10	10	10	10	10	91
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	25 ± 0.08	31 ± 0.37	28 ± 0.016	30 ± 0.075
Desviación Estándar	7	9	9.4	9.3	7.9	3	9	3	6.4	8.1
Min. – Max.	18 - 40	17 - 41	23 - 55	18 - 46	12 - 40	15 - 20	11 - 35	28 - 38	18 - 35	11 - 55
Percentil 95%	38	41	50	42	39	19	33	36	34	41
N° Datos	9	8	8	6	10	2	5	10	10	69
Palogrande PM₁₀ (µg/m³ estándar)										
Promedio ± Incertidumbre**	19 ± 0.02	24 ± 0.02	23 ± 0.02	23 ± 0.01	19 ± 0.02	15 ± 0.02	19 ± 0.02	18 ± 0.017	19 ± 0.46	20 ± 0.167
Desviación Estándar	5	6.8	7.3	7.7	5.5	3.8	6	5.1	3.7	6.1
Min. – Max.	11 - 25	14 - 33	10 - 33	11 - 39	10 - 27	10 - 22	12 - 34	15 - 33	12 - 25	8 - 39
Percentil 95%	25	32	32	35	27	21	29	29	24	32
N° Datos	10	10	9	10	10	10	10	10	10	88
Milán PM₁₀ (µg/m³ estándar)										
Promedio ± Incertidumbre**	28 ± 0.01	32 ± 0.01	35 ± 0.02	29 ± 0.03	30 ± 0.02	30 ± 0.02	32 ± 0.16	37 ± 0.032	34 ± 0.47	32 ± 0.145
Desviación Estándar	8	9	5.8	9.1	7.6	9.4	8	8.3	9.1	8.4
Min. – Max.	17 - 40	14 - 45	24 - 43	13 - 45	11 - 40	17 - 42	20 - 44	22 - 49	21 - 46	11 - 49
Percentil 95%	39	42	42	42	39	42	43	47	46	45
N° Datos	10	10	10	10	10	10	10	9	9	90
Nubia PM₁₀ (µg/m³ estándar)										
Promedio ± Incertidumbre**	19 ± 0.01	25 ± 0.01	26 ± 0.01	21 ± 0.03	19 ± 0.01	18 ± 0.01	17 ± 0.013	21 ± 0.4	19 ± 0.022	20 ± 0.061
Desviación Estándar	6	6.9	4.6	4.8	5.6	5.8	3	4.6	5.9	5.9
Min. – Max.	9 - 28	15 - 35	16 - 33	12 - 29	9 - 26	11 - 31	13 - 21	14 - 28	9 - 26	9 - 35
Percentil 95%	27	35	32	28	24	27	21	27	26	31
N° Datos	10	10	10	10	10	10	10	10	10	91
Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar)										
Promedio ± Incertidumbre**	13 ± 1.68	13 ± 1.93	19 ± 1.68	14 ± 1.36	15 ± 1.68	14 ± 1.68	11 ± 1.523	10 ± 1.683	14 ± 1.317	14 ± 1.518
Desviación Estándar	5	2.9	3	5.8	5	4.5	6	6	2.4	5.1
Min. – Max.	7 - 15	10 - 18	14 - 22	6 - 28	10 - 23	7 - 19	3 - 22	2 - 21	10 - 16	2 - 28
Percentil 95%	10	10	10	10	10	10	10	10	10	91

* 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.

Se identificó un aumento progresivo de las concentraciones en todas las estaciones durante el primer trimestre enero a marzo, seguido de un periodo de disminución en el segundo trimestre abril a junio. Siendo el mes de marzo el de las mayores concentraciones registradas a lo largo del 2019 con un aumento del 29% en Gobernación, 28% en Liceo, 22 % en la Nubia, 14% Milán y 12% Palogrande. 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 el domingo 17 de marzo (más altas registradas para un domingo en 2019). 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 lo referente al monitoreo de $PM_{2.5}$, se registró un promedio de $14 \mu g/m^3$ (desv. std = $5 \mu g/m^3$), un mínimo de $6 \mu g/m^3$ y un máximo de $28 \mu g/m^3$ presentado el sábado 13 de abril que coincide además con el máximo de concentración presentado en la estación Gobernación PM_{10} con un valor de $35 \mu g/m^3$, 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.

Si se comparan los promedios obtenidos para el periodo analizado del presente año con el mismo periodo para años anteriores, se observa un aumento en el promedio del 18% para Milán con respecto al año 2018, mientras las demás estaciones se mantienen sin cambio o una disminución menor al 8% de variación promedio. De otra parte, comparando el año 2019 con el mismo periodo del año 2017 se evidenció una disminución en 11% para Liceo y una variación de 5% al -7% para el resto de las estaciones. Con esta información se puede inferir 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 (González y colaboradores, 2017), influenciando así la disminución progresiva observada en los promedios de PM_{10} en la ciudad.

Para el caso de $PM_{2.5}$ no se identificó una variación en este promedio comparado con el mismo periodo del año 2018, se destaca que el mes con mayor aumento respecto al 2018 en $PM_{2.5}$ fue febrero con un incremento del 31% para el promedio mensual. Finalmente, para lo corrido del año 2019 enero a septiembre la precipitación (1262 mm) fue 8% mayor que en 2018 (1158 mm), lo que también pudo influir en la limpieza de la atmósfera en la ciudad a causa del fenómeno de *Scavenging*.

De manera complementaria se presentan las figuras de evolución temporal de concentraciones diarias obtenidas para PM₁₀ (Figura 3) y PM_{2.5} (Figura 4), 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).

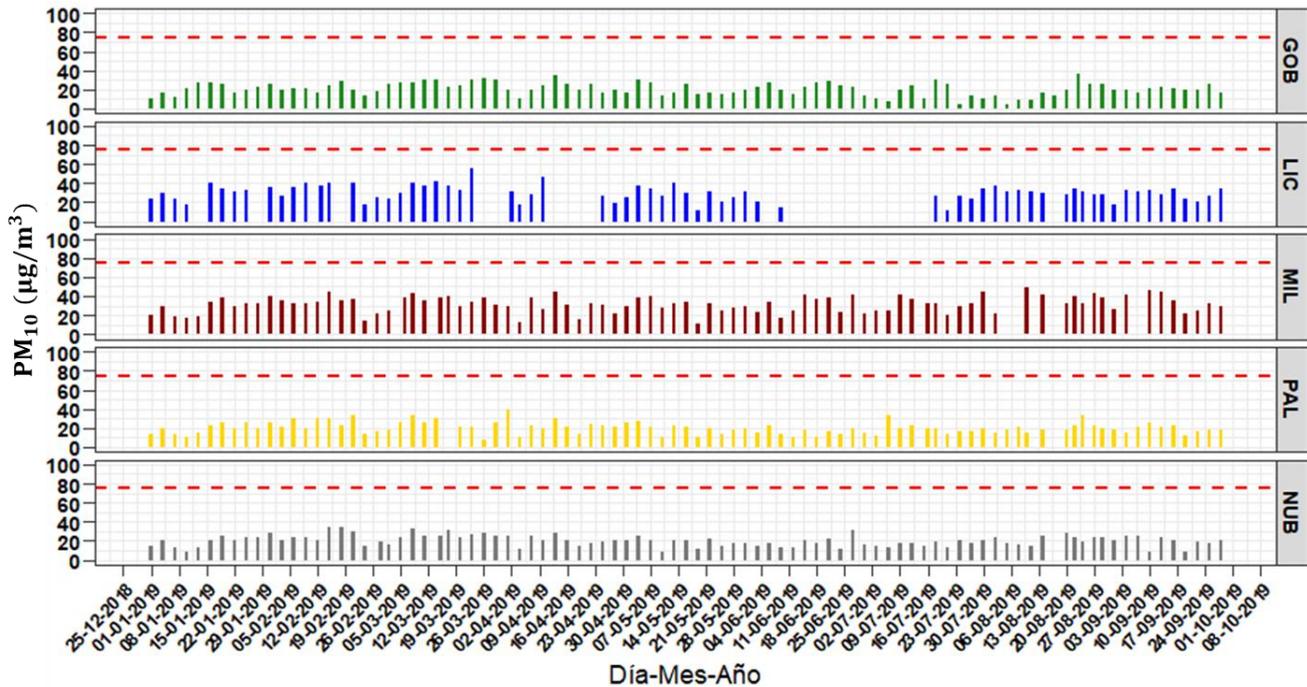


Figura 3. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM₁₀ - Manuales, durante el periodo enero - septiembre del 2019 en el SVCA de Manizales. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM₁₀ establecido en la Resolución 2254 de 2017: 75 µg/m³.

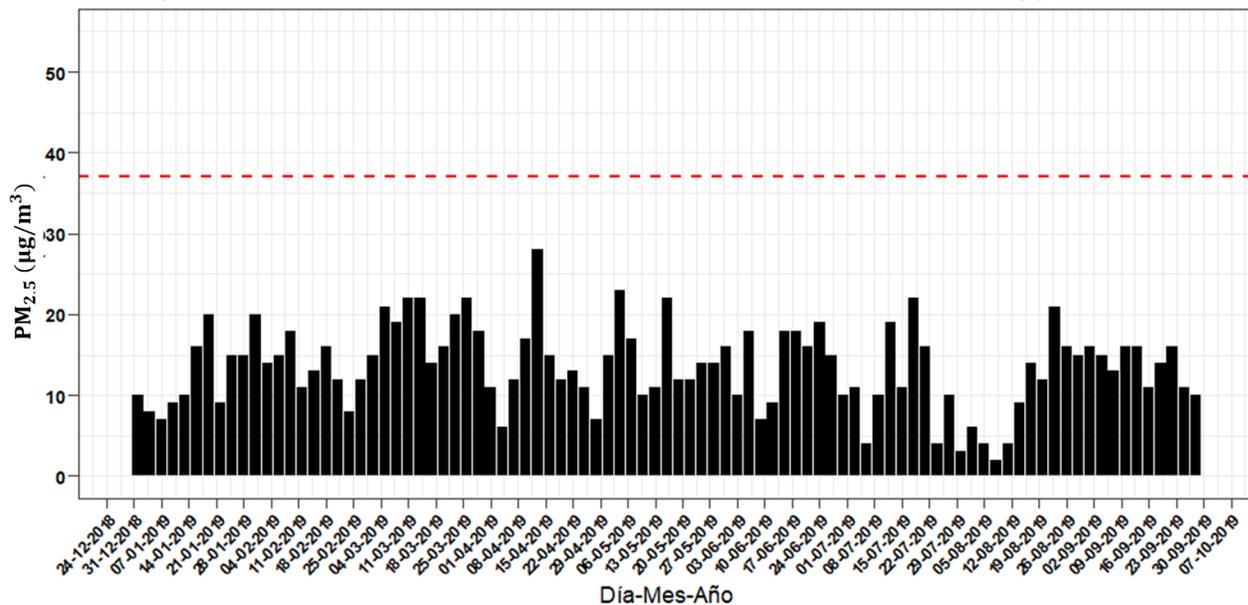


Figura 4. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM_{2.5} - Manual, durante el periodo enero - septiembre del 2019 en el SVCA de Manizales. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM_{2.5} establecido en la Resolución 2254 de 2017: 37 µg/m³.

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 5) y $PM_{2.5}$ (Figura 6) 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 7 se presenta la variación promedio de concentraciones de PM_{10} (Figura 7a) y $PM_{2.5}$ (Figura 7b) 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. En las estaciones Liceo y Gobernación, 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 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 domingo, asociado directamente a la actividad industrial del sector y disminución del tráfico vehicular.

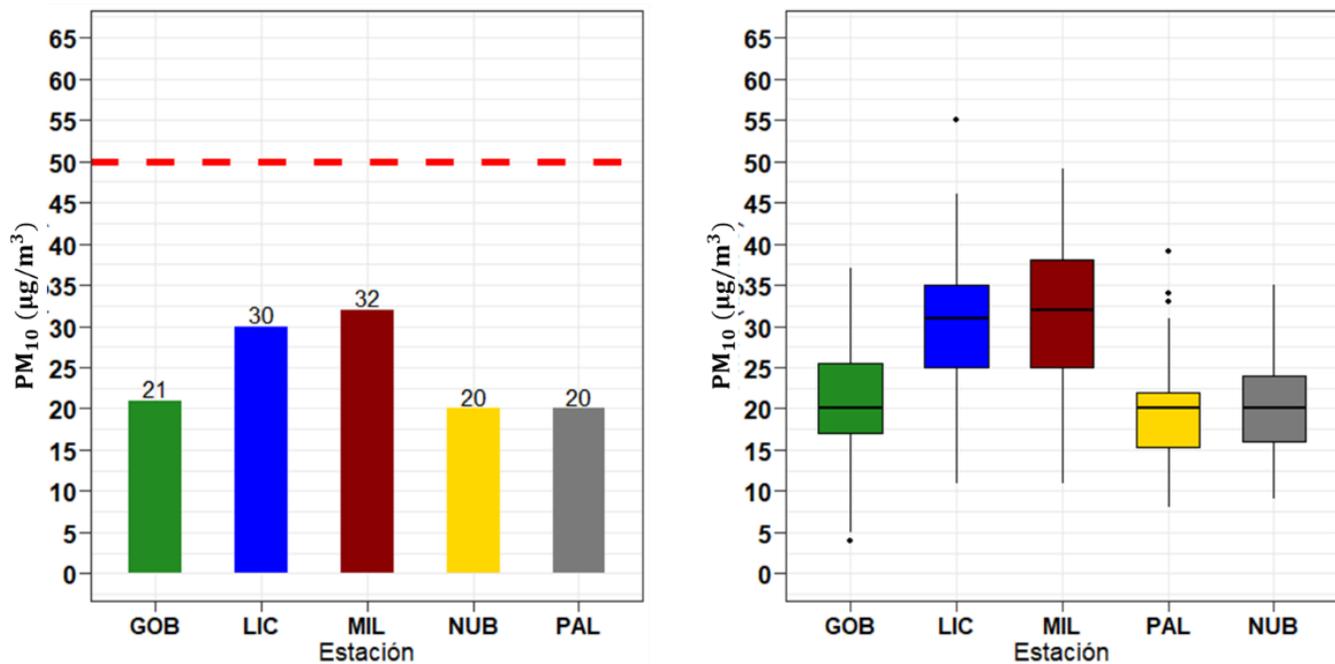


Figura 5. Concentración promedio (izquierda) y diagrama de cajas (derecha) de las estaciones de PM_{10} - Manuales, durante el periodo enero – septiembre del 2019. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS: $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

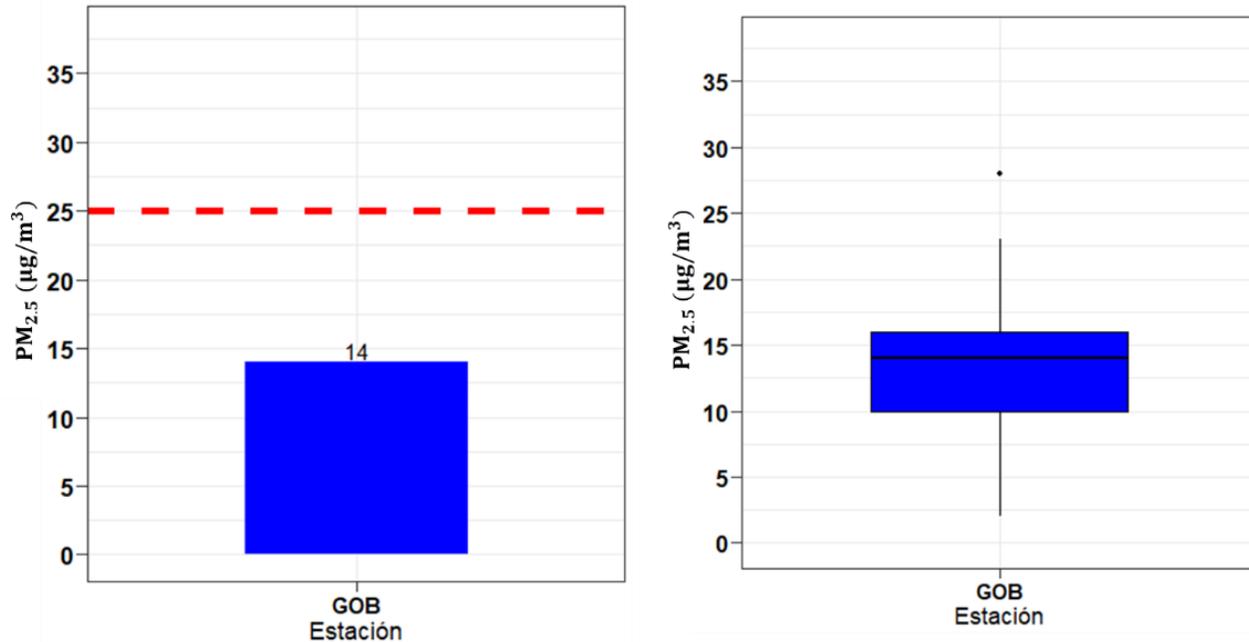
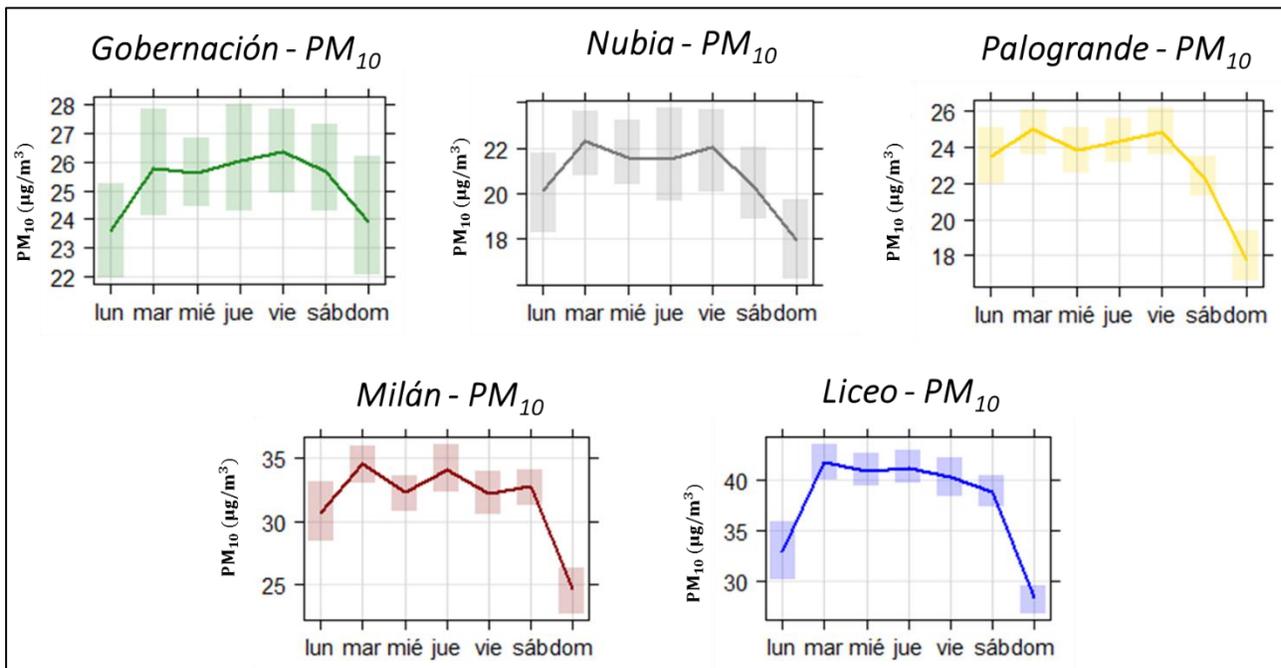
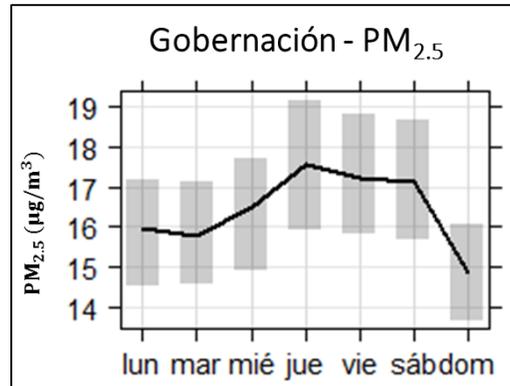


Figura 6. Concentración promedio (izquierda) y diagrama de cajas (derecha) de la estación PM_{2.5} - Manual, durante el periodo enero – septiembre del 2019. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS: 25 µg/m³.



(a)



(b)

Figura 7. Variación promedio de concentraciones por días de la semana de para PM₁₀ y PM_{2.5} - Manuales, durante el periodo enero – septiembre del 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. Se considera 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 8 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 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).

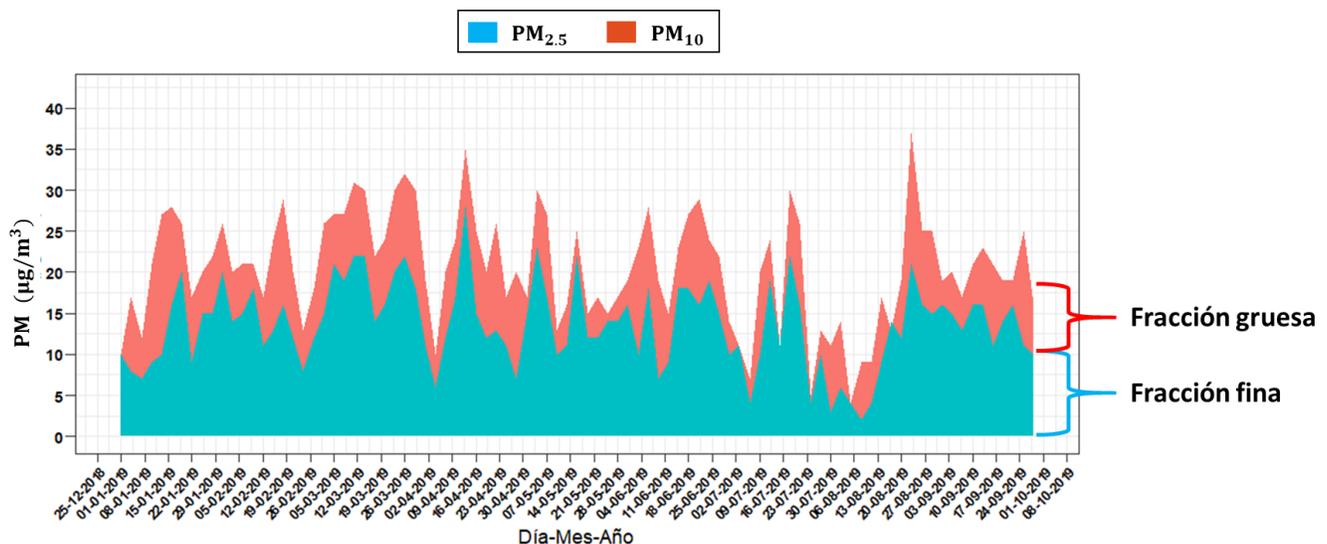


Figura 8. Relación entre el material particulado PM₁₀ - PM_{2.5} - Manuales en la estación Gobernación durante el periodo de enero – septiembre del 2019.

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

La Figura 9 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo 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 en Liceo se presentó un (1) día con calidad de aire moderada el 23 de marzo, mientras la estación de PM_{2.5} presentó calidad del aire moderada para el 62% 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.

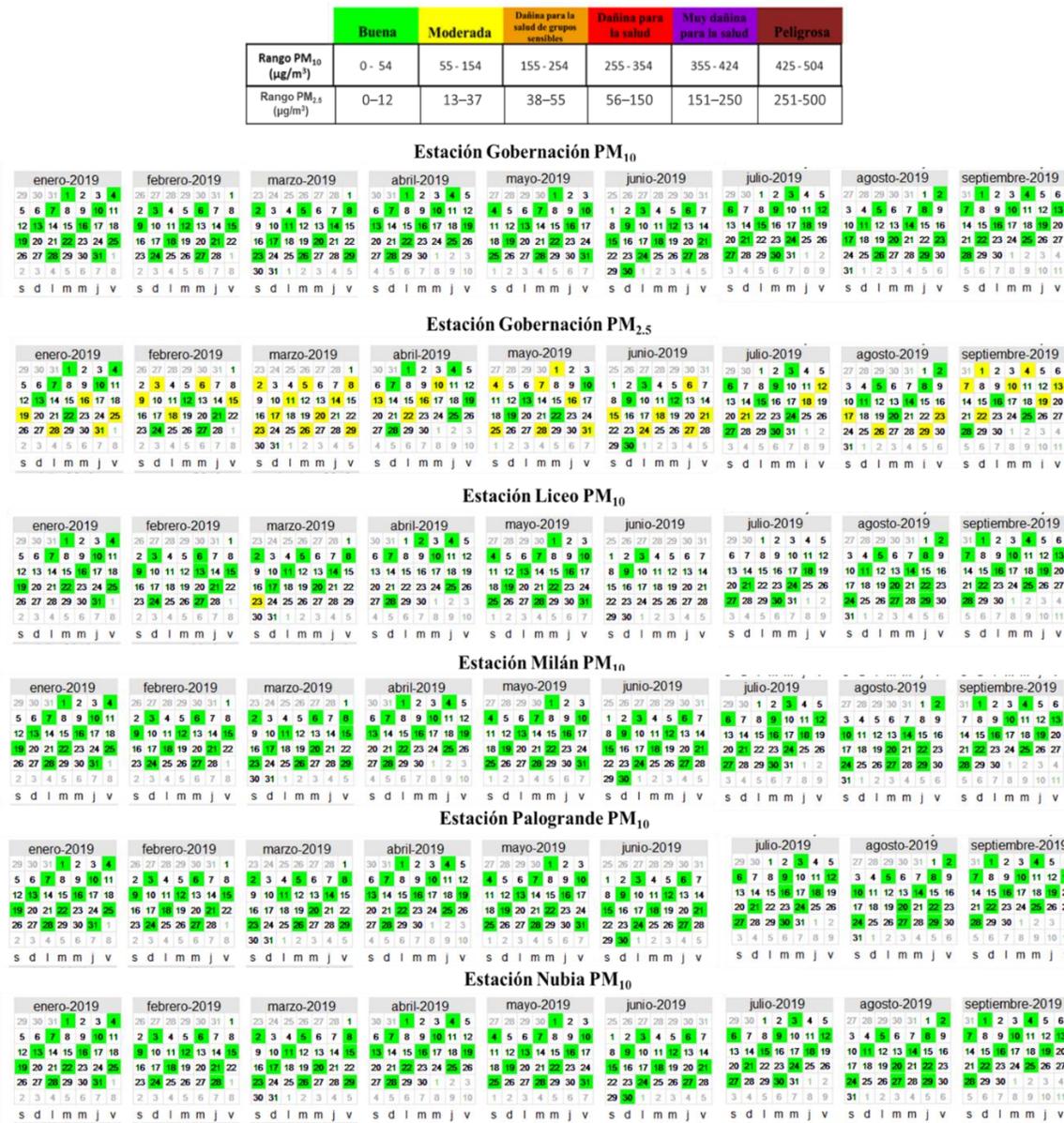


Figura 9. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales en Manizales durante el periodo enero – septiembre del 2019. Basado en la resolución 2254 de 2017 de MADS.

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

La Figura 10 presenta el comportamiento temporal de las concentraciones de los equipos automáticos (promedio diario) durante el periodo abril – septiembre, 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 las cuatro variables. 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 fallas y de estabilización en el equipo.

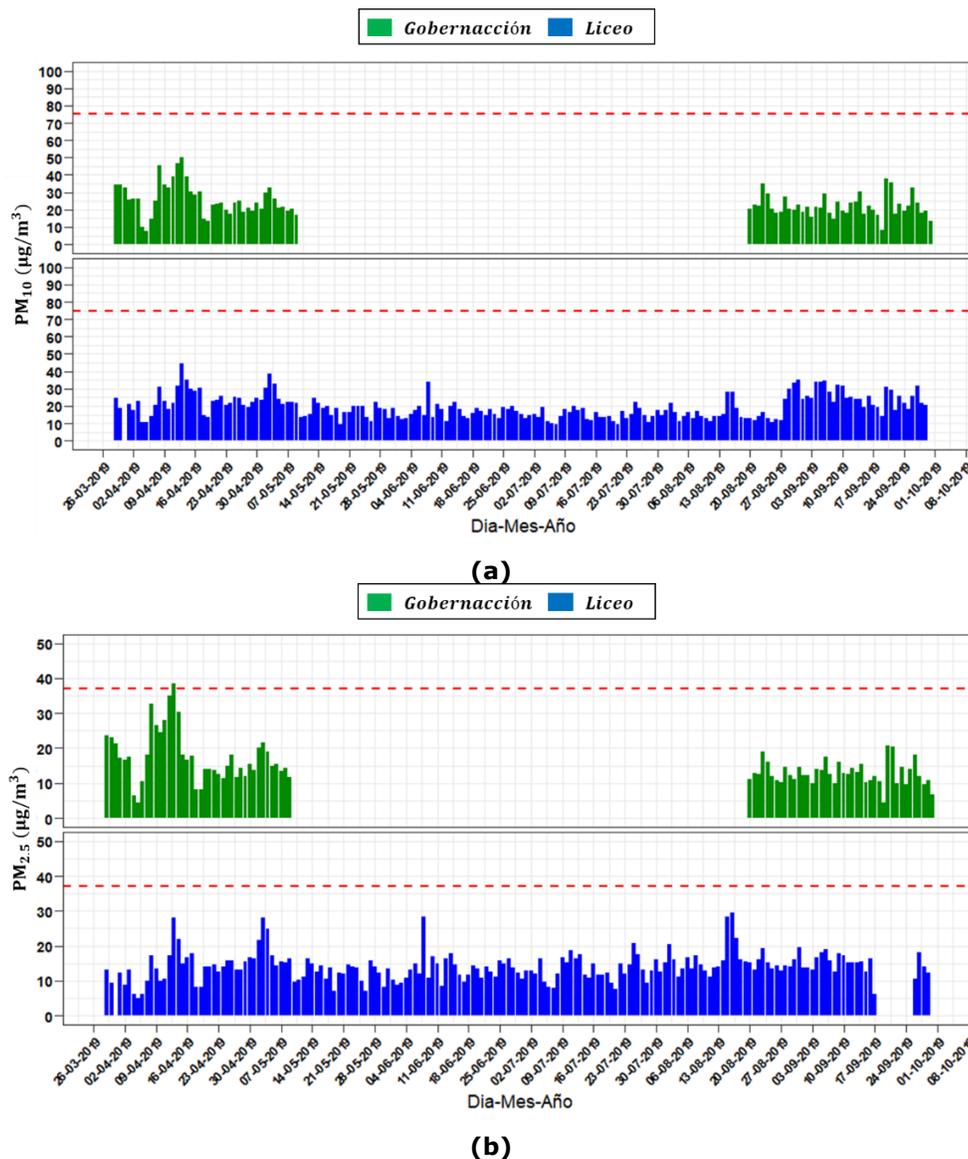
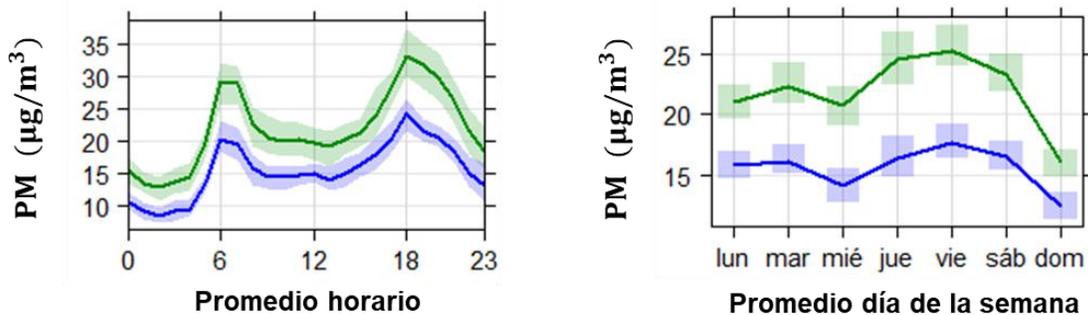


Figura 10. Evolución temporal de concentraciones diarias de los equipos PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos durante el periodo abril – septiembre del 2019 en el SVCA de Manizales. (a) PM₁₀ (b) PM_{2.5}. La línea punteada roja hace referencia a los límites máximos promedio diario de PM₁₀ y PM_{2.5} respectivamente establecido en la Resolución 2254 de 2017 de MADS: 75 µg/m³ y 37 µg/m³

La Figura 11 presenta la evolución promedio horaria y por día de la semana 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).

Estos máximos de concentración promedio horaria en la estación Liceo registraron valores cercanos a los $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$, con promedios horarios superiores en hora pico de movilidad del día alrededor de las 6 a 8 pm. Por su parte la estación Gobernación registró valores de $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ 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 PM_{10} como el $\text{PM}_{2.5}$ pueden provenir de la misma fuente de emisión.

Liceo: PM – automático



Gobernación: PM – automático

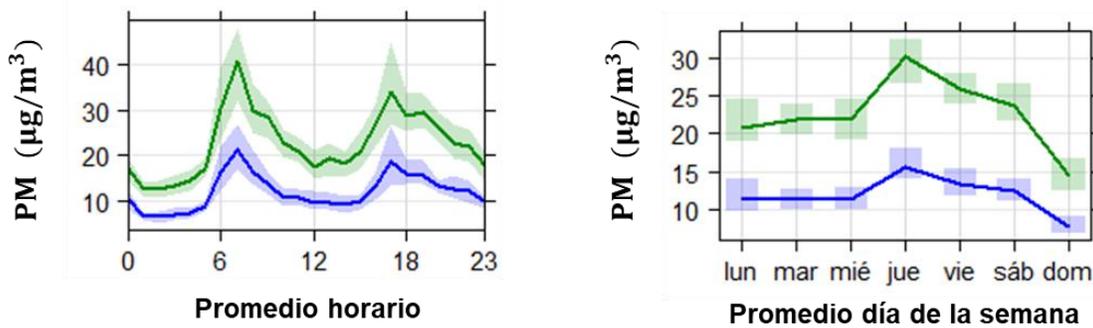


Figura 11. Promedio horario para concentraciones de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ – Automáticos durante el periodo abril – septiembre de 2019 en las estaciones Gobernación y Liceo.

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 12 se observa que los datos presentan un perfil coherente para este tipo de contaminante, con promedio octohorario de 20 µg/m³ ± 11.4, mínimos de 0.05 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 mayo y septiembre, esto se presentó por fallas técnicas del equipo y en tiempo que tomó realizar las reparaciones pertinentes.

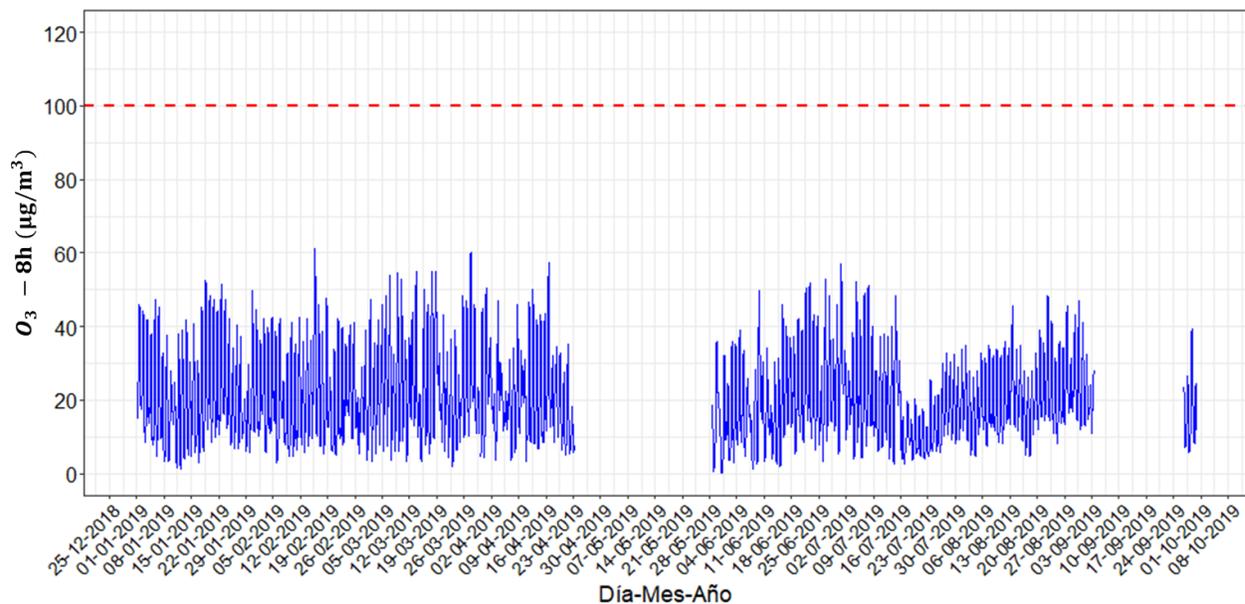


Figura 12. Variación de concentración promedio octohorario de ozono troposférico (O₃), durante el periodo enero – septiembre del 2019 en la estación Gobernación. La línea punteada roja representa el límite máximo permisible establecido en la Res. 2254 de 2017 de MADS: 100 µg/m³.

De manera alternativa se presenta en la Figura 13 el resumen de la variación de O₃ y radiación solar promedio horaria, semanal y mensual para todos los datos generados de enero a septiembre 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 cercanas a los 43 µg/m³ y niveles de radiación promedio cercanos a los 500 W/m². Se observa un desfase de tiempo 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 $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, este se asocia a ozono generado durante el día que asciende con la capa de mezcla, queda retenido en la capa residual nocturna y durante la noche se incorpora en la capa estable nocturna. También se considera posible la acumulación de precursores de ozono como los NO_x que tienen un tiempo de vida en la atmósfera aproximado de 24 horas.

En la Figura 13 se identificó que las concentraciones durante el día son aproximadamente 2 veces más elevadas que en las noches, con un promedio diario de $28.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y uno nocturno de $12.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 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 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).

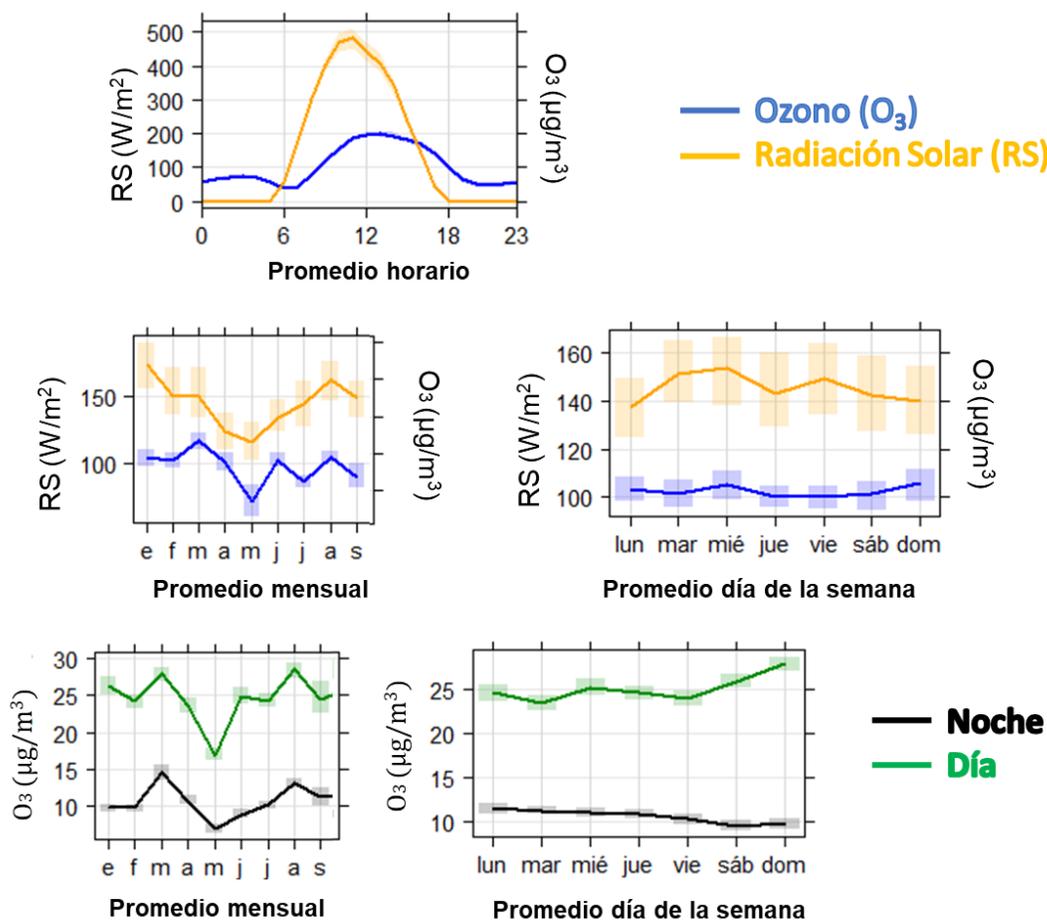


Figura 13. Variación promedio horario, semanal y mensual de ozono troposférico (O_3) y radiación solar; se incluye además el comportamiento promedio mensual y semanal entre las horas diurnas y nocturnas, durante el periodo enero – septiembre del 2019 en la estación Gobernación.

4.2. MONITOREO DE DIOXIDO DE AZUFRE (SO₂)

La Figura 14 muestra la evolución de concentraciones horarias de SO₂ durante el periodo de agosto a septiembre, 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 4.8 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).

Figura 15 Adicionalmente presenta la variación promedio horaria y por día de la semana para el periodo entre agosto y septiembre de 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 7.2 µg/m³ y 6.2 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 4.9 µg/m³.

Finalmente, aun cuando el volcán nevado del Ruiz ubicado a 28 km al sureste de la ciudad ha presentado una alta actividad durante el periodo de análisis y gracias al apoyo de los registros reportados por el servicio geológico colombiano (SGC) a través de sus boletines semanales, no se identificó una influencia clara en las concentraciones obtenidas para SO₂ en este periodo. Como apoyo grafico se presentan las concentraciones obtenidas de SO₂ asociadas a emisiones volcánicas registradas por el satélite de la nasa OMI Figura 16 (línea roja punteada), en donde se observa que las concentraciones de SO₂ asociadas a la actividad volcánica ha sido constante durante el periodo de análisis con una masa de la columna alrededor de los 0.3 Kilotones de SO₂

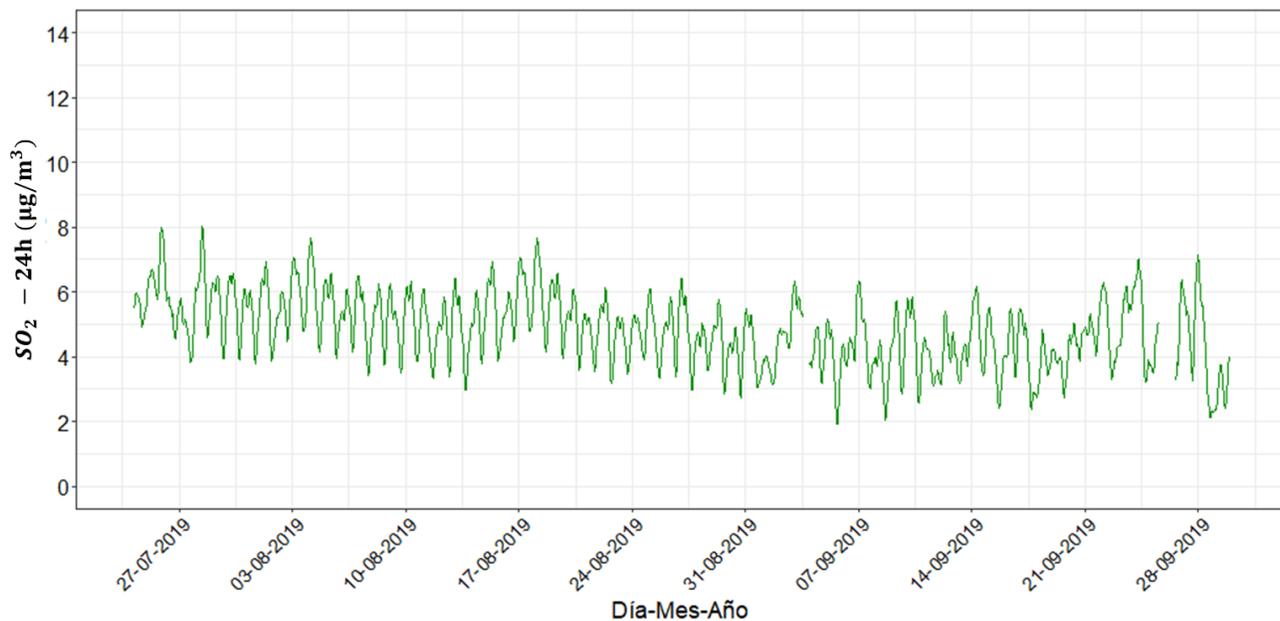


Figura 14. Variación de concentración promedio diario de dióxido de azufre (SO₂) durante el periodo agosto-septiembre del 2019 en la estación Gobernación. El límite máximo permisible establecido en la Res. 2254 de 2017 de MADS:50 µg/m³.

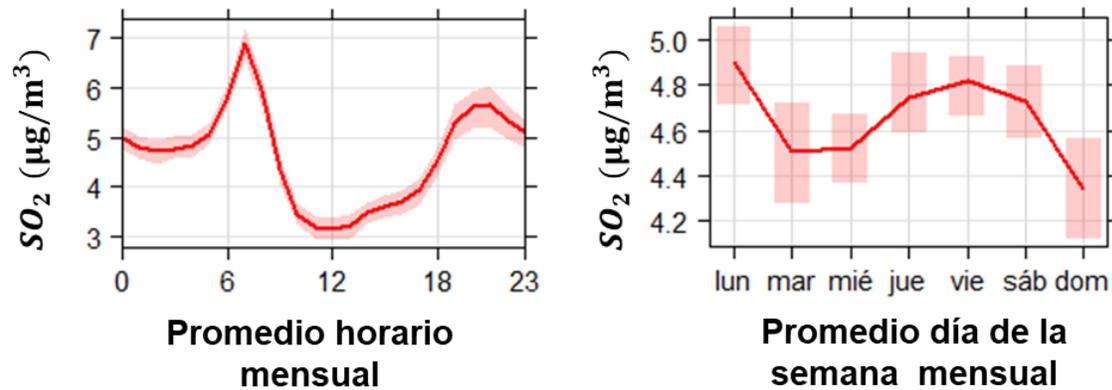


Figura 15. Variación promedio horaria y por día de la semana de dióxido de azufre (SO₂) durante el periodo agosto – septiembre del 2019 en la estación Gobernación.

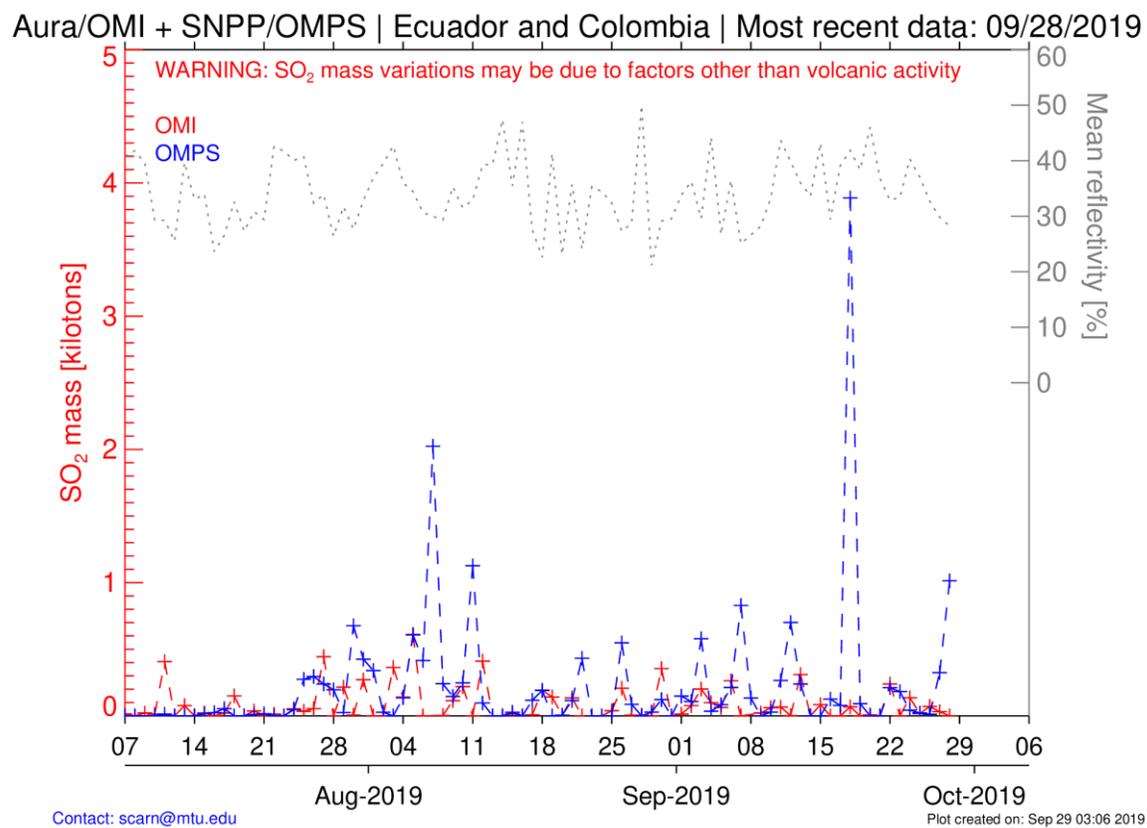


Figura 16. Emisión de SO₂ registrada por el satélite de la nasa OMI (línea roja punteada) para el periodo agosto – septiembre del 2019.

4.3. MONITOREO DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

La Figura 17 muestra los resultados del monitoreo de CO entre enero y septiembre del 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 18 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 $717 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 401$, mínimos de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 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 750 y $850 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 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 $570 \mu\text{g}/\text{m}^3$, es decir, una reducción del 21 % 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. Este aspecto quedó demostrado en el más reciente inventario de emisiones atmosféricas realizado en la ciudad para el año base 2014 (González y colaboradores, 2017), donde se estimó una contribución de 37444 ton/año de CO asociado a vehículos particulares y motos, lo que representa un aporte del 86% de la emisión de CO en toda la flota vehicular registrada a 2014 en Manizales.

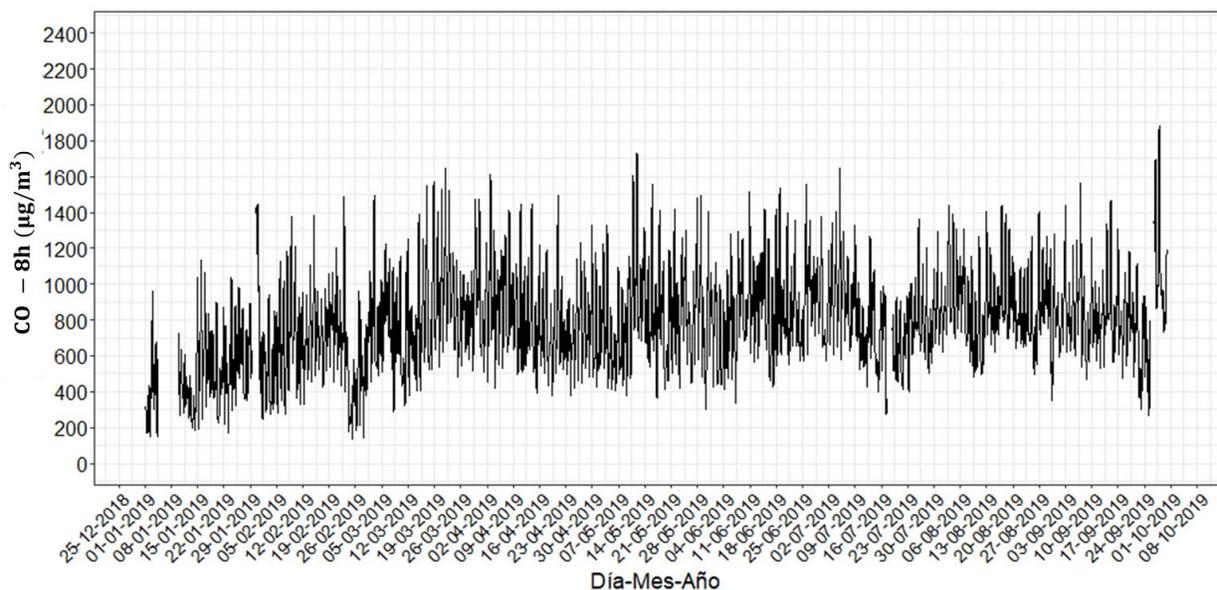


Figura 17. Variación de concentración promedio octohorario de monóxido de carbono (CO) durante el periodo enero – septiembre del 2019 en la estación Gobernación. El límite máximo permisible establecido en la Res. 2254 de 2017 de MADS: $5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

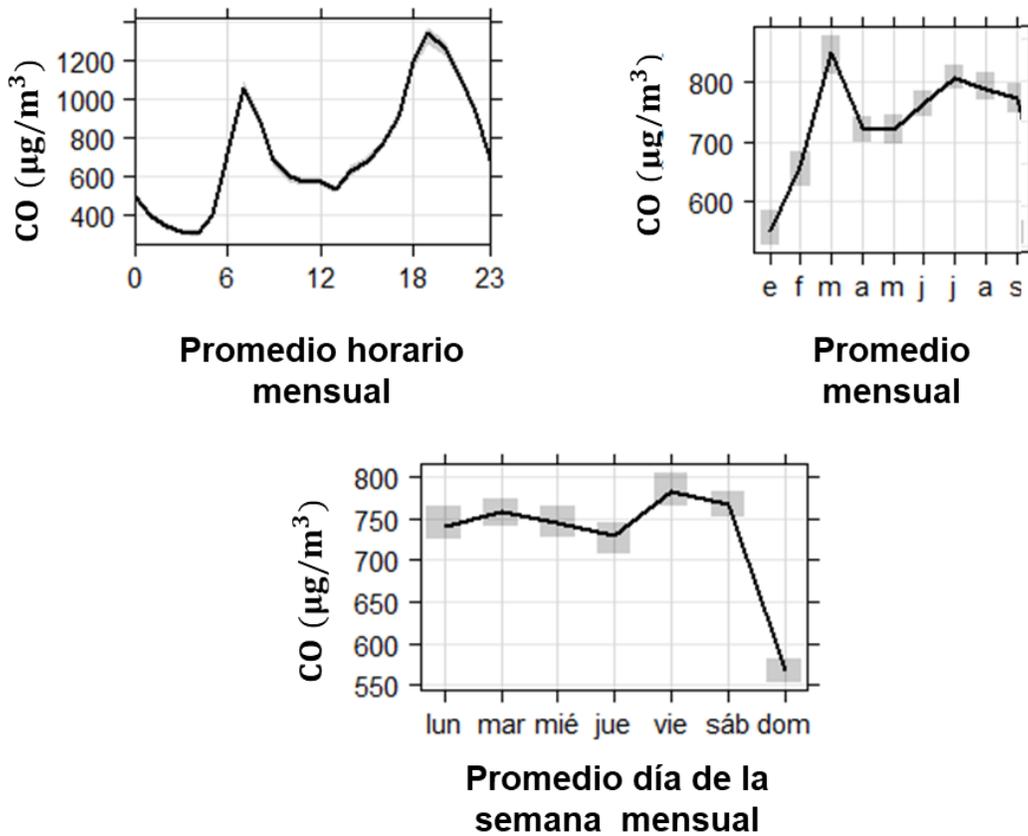


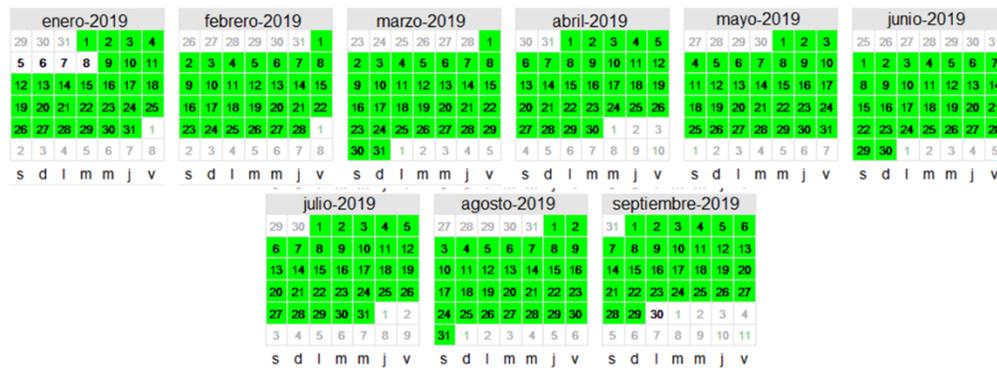
Figura 18. Variación promedio horaria, por día de la semana y mensual de monóxido de carbono (CO) durante el periodo enero – septiembre del 2019 en la estación Gobernación.

4.4. INDICES DE CALIDAD DEL AIRE (ICA) PARA O₃, SO₂ Y CO

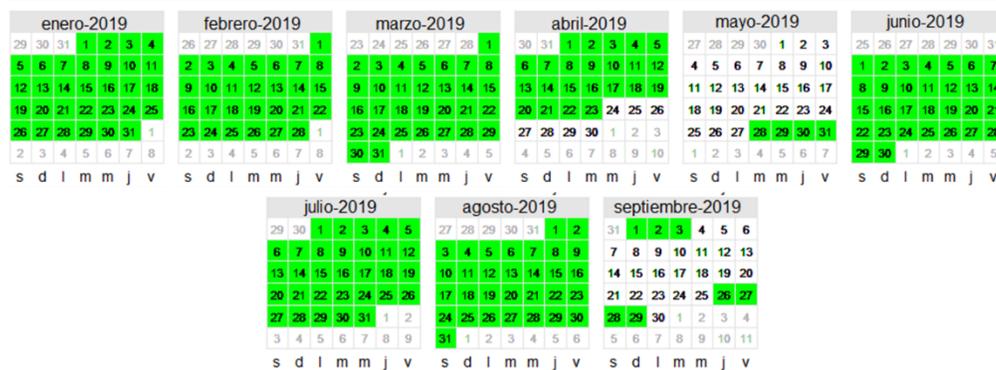
La Figura 19 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de CO y O₃. El ICA representa mediante un indicador de color, el estado de la calidad del aire de acuerdo a la concentración de material particulado y su posible afectación a la salud. Para el cálculo de este indicador (ICA) tanto en O₃, SO₂ y CO se utiliza la metodología propuesta por la resolución 2254 de 2017 (capítulo IV artículo 18 al 21) del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (MADS 2017). Se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena durante todo el periodo analizado para todos los contaminantes.

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

Estación Gobernación CO (Ochohorario)



Estación Gobernación O₃ (Ochohorario)



Estación Gobernación SO₂ (horario)



Figura 19. Índice de calidad del aire (ICA) para CO, O₃ y SO₂ en Manizales durante el periodo enero - septiembre del 2019. Basado en la resolución 2254 de MADS.

5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIO COMPORTAMIENTOS EN LA CIUDAD DE MANIZALES, EQUIPOS AUTOMÁTICOS.

En la Figura 20 se presenta la variación horaria promedio para los contaminantes SO_2 , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$ y CO en la estación Gobernación, la cual comprende el periodo entre 1 de septiembre al 31 de octubre del año 2019. Se observa que el SO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ y CO poseen un comportamiento similar a lo largo del día, presentando picos de máxima concentración en las mismas franjas horarias características de horas de alto tráfico vehicular, comportamiento asociado directamente con las fuentes de emisión cercanas a la estación, 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.

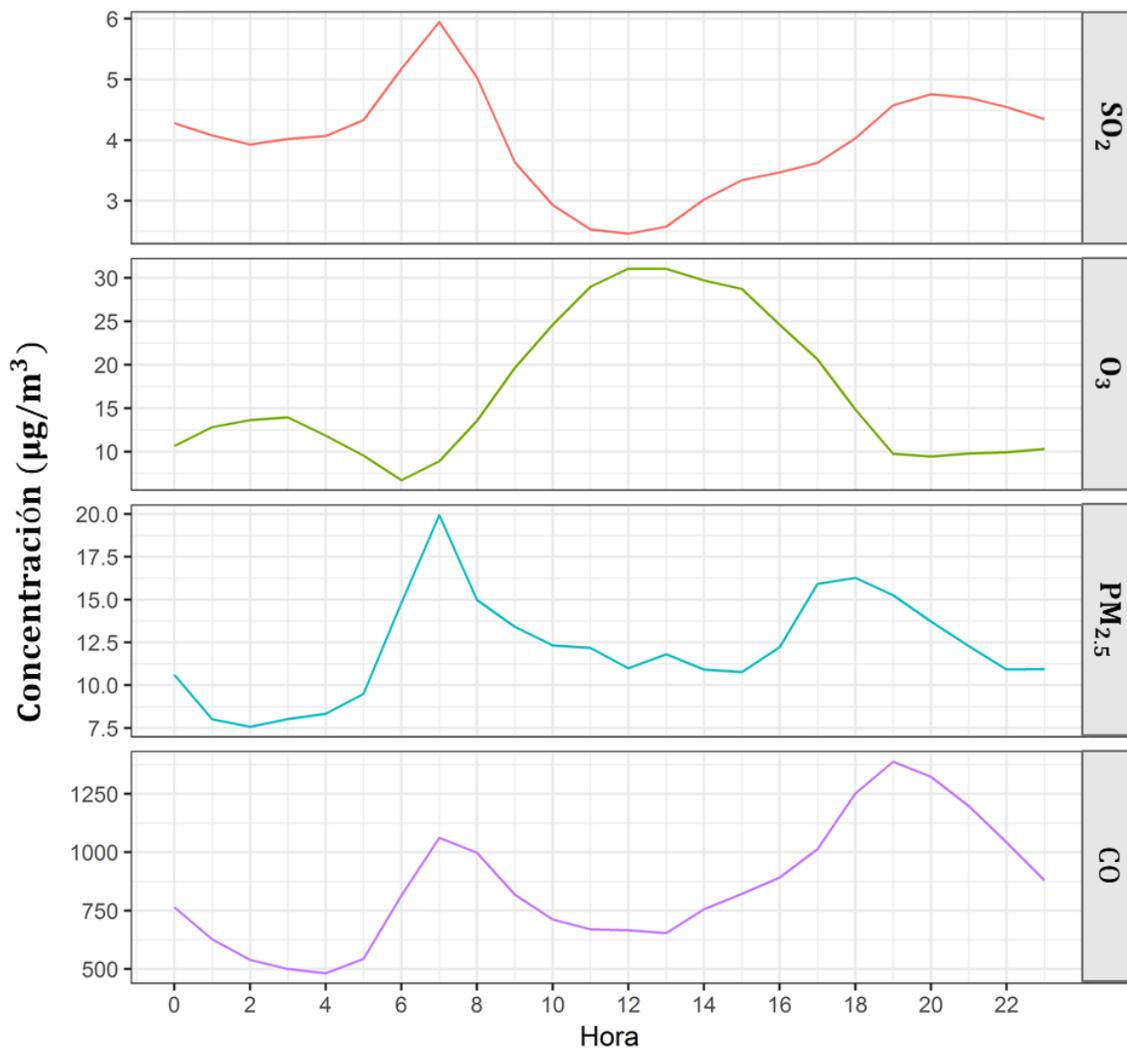


Figura 20. Comparación de perfiles horarios de concentración de gases SO_2 , O_3 , CO y material particulado $\text{PM}_{2.5}$ -Automático en la estación Gobernación (1 de septiembre a 31 de octubre del 2019)

Por su parte, el O_3 presenta un comportamiento diferente a los contaminantes anteriormente analizados, ya que las mayores concentraciones de O_3 se presentan alrededor del mediodía, lo cual se atribuye a que son las horas en que se presenta la mayor radiación solar, lo que favorece las reacciones de formación de O_3 . En la franja horaria entre las 3 y 6 am se presenta un fenómeno interesante, en el cual las concentraciones de O_3 disminuyen considerablemente, este fenómeno podría deberse en parte a los patrones de circulación de viento, en el cual mediante la brisa valle-montaña, el aire limpio que desciende de la montaña ayuda a realizar la limpieza de la atmósfera, otra alternativa podría estar asociada a un agotamiento del O_3 producto de su consumo en reacciones con otros compuestos presentes en la atmósfera, las cuales pueden dar lugar a la formación de aerosoles secundarios a través de procesos de conversión gas-partícula. Esta última teoría podría estar sustentada en el hecho de que las concentraciones de $PM_{2.5}$ presenta un ligero aumento mientras que las de O_3 descienden durante la franja horaria estudiada.

De manera complementaria, se presentan en la Figura 21 los coeficientes de correlación que existen entre las concentraciones promedio horaria de los diferentes contaminantes estudiados, en esta se refuerza la idea de que las concentraciones de $PM_{2.5}$ y CO se correlacionan positivamente ($R^2=0.351$), mientras que la concentración de O_3 esta inversamente relacionada con las de $PM_{2.5}$ ($R^2=-0.203$) en esta franja horaria.

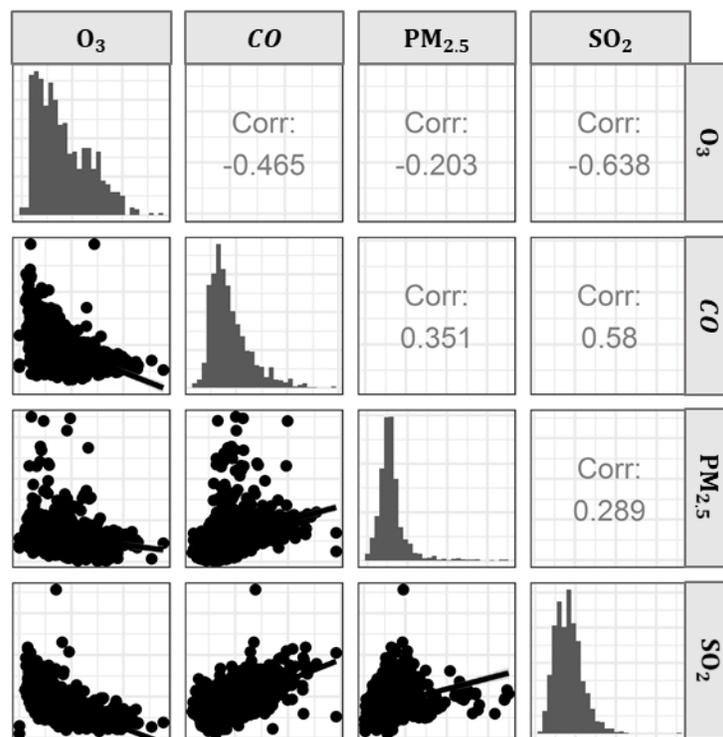


Figura 21. Correlación entre las concentraciones promedio horarias de gases SO_2 , O_3 , CO y material particulado $PM_{2.5}$ -Automático en la estación Gobernación (1 de septiembre a 31 de octubre del 2019)

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.
- Eurachem / CITAC, 2012. Quantifying uncertainty in analytical measurement. Third edition. QUAM:2012.P1
- 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>.
- 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.
- 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), 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_{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, 2009.
- 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/>
- 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>
- 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>