

SIMAC

SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO AMBIENTAL DE CALDAS



BOLETÍN CALIDAD DEL AIRE MANIZALES PERIODO ENERO - JUNIO 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 junio de 2019. Se realizó el seguimiento de material particulado (PM_{10} , $PM_{2.5}$) y los gases ozono troposférico (O_3) y monóxido de carbono (CO). Se muestran las gráficas resumen obtenidas y tablas de estadísticos básicos (promedio, mínimo, máximo y desviación estándar). Asimismo, se muestran los resultados obtenidos para los índices de calidad del aire.

***Camilo Zapata Mora, *Angel David Gálvez Serna, *Carlos Mario González Duque, *Beatriz Helena Aristizábal Zuluaga, **Mauricio Velasco García.**

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), 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 SISAIRE del IDEAM. El CDIAC, por medio de la página web **<http://cdiac.manizales.unal.edu.co/indicadores/public/index>**, pone a disposición de la comunidad información meteorológica, de calidad del aire, sismos y aguas subterráneas de la ciudad de Manizales y el Departamento de Caldas.

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

El seguimiento de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) en Manizales se realiza mediante técnicas de monitoreo activas, 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 y CO), permiten la obtención de registros cinco minutales, 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).

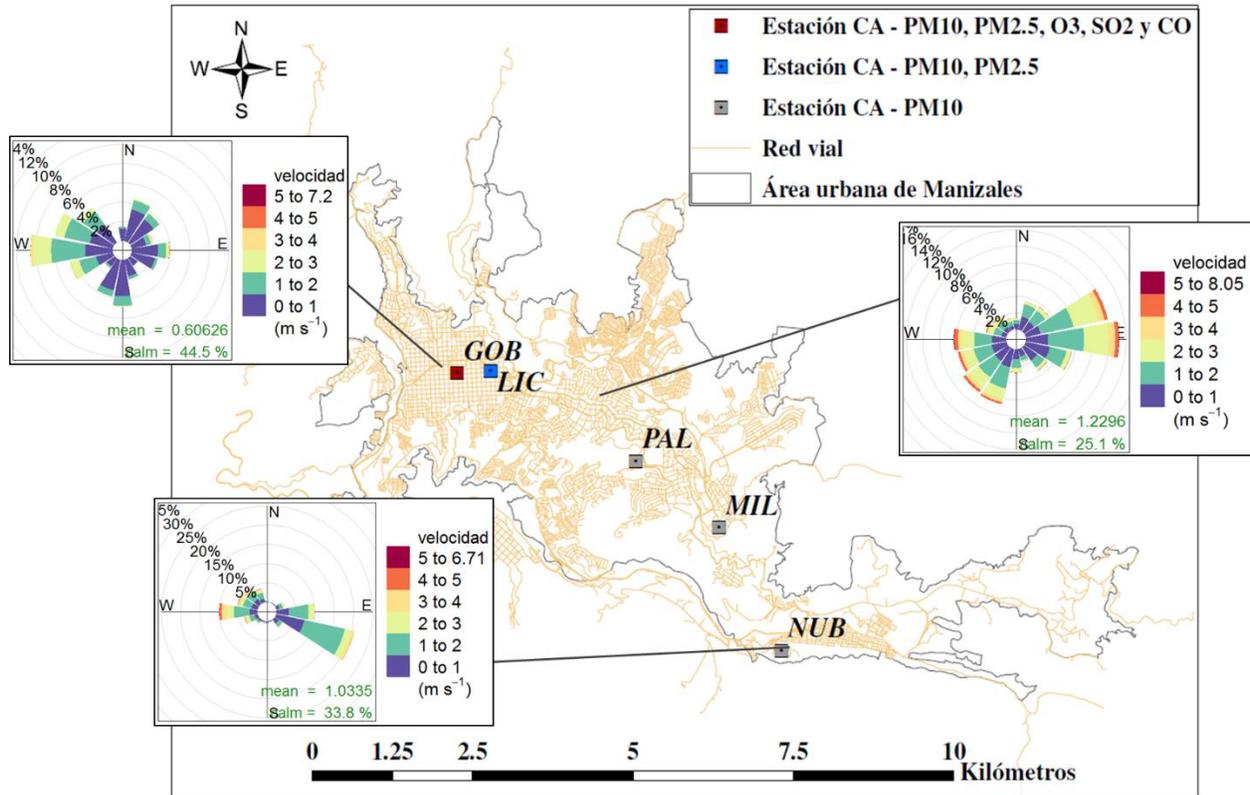


Figura 1. Mapa de Manizales con ubicación de las estaciones de calidad del aire y rosas de viento de estaciones meteorológicas representativas para el periodo enero-junio del 2019 (Estaciones meteorológicas en orientación occidente a oriente: Gobernación de Caldas, Hospital de caldas y La Nubia).

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

Estación – Contaminante	Características y fuentes de contaminantes*	Año Instalación	Año de óptima operación – histórico	Estado actual	Latitud / Longitud	Altitud msnm
Gobernación - PM ₁₀ ^a		2009	2009	Operación óptima.		
Gobernación - PM _{2.5} ^a		2009	2009	Operación óptima.		
Gobernación - SO ₂ ^b		2014	Desde el 2016 se presentan fallas de estabilización.	Se encuentra en revisión externa.		
Gobernación - O ₃ ^b	CU, SC – MTV, PAI	2014	Salió de operación durante los años 2016-2017 por fallas.	Operación óptima.	N 5° 4' 6.53" W 75° 31' 1.54"	2155
Gobernación - CO ^b		2014	2018 – Presentó múltiples fallas durante sus primeros años.	Operación óptima.		
Gobernación - PM ₁₀ , PM _{2.5} ^c		2019	2019	Operación óptima.		
Palogrande - PM ₁₀ ^d	ZC, SR - ATV, SAI	2009	2009	Operación óptima.	N 5° 3' 22.4" W 75° 29' 31.3"	2154

Estación – Contaminante	Características y fuentes de contaminantes*	Año Instalación	Año de óptima operación – histórico	Estado actual	Latitud / Longitud	Altitud msnm
La Nubia - PM ₁₀ ^d	ZSE, SR - BTV, AZI	2009	2017 – En la red.	Operación óptima.	N 5° 1' 47.0" W 75° 28' 18"	2091
Liceo - PM ₁₀ ^d	CU, SC - ATV, PAI	2000	2010 – En la red.	Operación óptima.	N 5° 4' 5.01" W 75° 30' 37.58"	2156
Liceo - PM ₁₀ , PM _{2.5} ^c		2019	2019	Operación óptima.		
Milán - PM ₁₀ ^d	ZC, SR - MAI, MTV	2012	2012	Operación óptima.	N 5° 2' 48.5" W 75° 28' 48.68"	2188

a- Equipo Partisol de bajo volumen (Low-Vol). b- Estación automática gases. c- Nefelómetro. d- 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 junio de 2019, así como los promedios consolidados para el periodo de enero a junio de los años 2018 y 2019. Se observa el comportamiento bimodal de las lluvias, con un nivel de precipitación bajo en enero (final de periodo seco) que ha aumentado a lo largo del año 2019, hasta el mes de junio, donde se evidencia el inicio del periodo seco. También se identifica la influencia del comportamiento en la temperatura, la radiación y la humedad relativa, con los mayores promedios de temperatura y radiación en el mes de enero y descenso progresivo hasta su nuevo incremento en el mes de junio. Por su parte la humedad relativa se relaciona de forma directa con las precipitaciones e inversa con la temperatura y radiación. Comparando los primeros 6 meses de año 2018 con los del 2019 se observa un aumento de 0.9 °C del año 2018 al 2019, así como un aumento considerable en la precipitación (319 mm más en 2019). 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 (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 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 atmosfera, 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 atmosfera 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]
2019 (ENE)	18.5	1.4	160.5	594.7	76.5	103.4	294.6
2019 (FEB)	18.4	1.3	149.7	594.6	81.9	173.0	239.5
2019 (MAR)	18.2	1.3	114.2	594.9	82.7	248.0	240.4
2019 (ABR)	17.8	1.2	114.3	595.7	84.0	309.8	216.0
2019 (MAY)	17.7	1.0	157.3	595.4	85.1	245.8	215.2
2019 (JUN)	18.3	1.2	103.6	595.7	81.4	77.4	212.4
2018 (ENE - JUN)*	17.3	1.2	178.7	595.6	82.9	838.4	226.6
2019 (ENE - JUN)*	18.2	1.2	133.3	595.2	81.9	1157.4	236.3

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

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

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

EQUIPOS MANUALES: ANÁLISIS DE PROMEDIOS DIARIOS PARA EL PERIODO ENERO - JUNIO DEL AÑO 2019

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-junio de 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.

Los resultados de la Tabla 3 muestran como la estación Milán registró los valores más altos de PM₁₀, con un promedio aritmético de 31 µg/m³ (desv. std = 8 µg/m³) seguida por la estación Liceo con un promedio aritmético de 29 µg/m³ (desv. std = 9 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, 2019), posiblemente influenciados por el tráfico vehicular característico de esta zona, con un flujo importante de buses y camiones que tienen un uso en 100% de diésel como combustible, asociado directamente a la emisión del contaminante PM₁₀. Por otra parte, los altos niveles de contaminación en la estación Milán pueden ser ocasionados por la influencia de la actividad industrial y el tráfico vehicular presentado en este sector, principalmente por la Avenida Kevin Ángel, caracterizado por alto flujo de vehículos particulares, así como de buses y camiones, estos últimos tienen especial importancia en la zona por la actividad industrial del sector. A pesar de que la flota de buses y camiones corresponde al 3.2% del total de vehículos de la ciudad,

este tipo de vehículos que hace uso de diésel como combustible, son responsables del 47% (362 ton/año) y 25% (192 ton/año) respectivamente del total de emisiones de PM₁₀ producto de la actividad de la flota vehicular en la ciudad (González y colaboradores, 2017).

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 22 µg/m³ en Gobernación (desv. std = 5 µg/m³), 21 µg/m³ en La Nubia (desv. std = 6 µg/m³) y 21 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*.

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 las emergencia por mala calidad del aire presentadas 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 junio 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 15 µg/m³ (desv. std = 4 µg/m³), un mínimo de 6 µg/m³ y un máximo de 28 µg/m³ presentado el sábado 13 de abril que coincide además con el máximo de concentración presentado en la estación Gobernación PM₁₀ con un valor de 35 µg/m³, 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 una disminución en el promedio del 20% para Liceo y 12% para Gobernación respecto al año 2018, mientras las demás estaciones se mantienen entre el 8% y -2% de variación promedio. De otra parte, comparando el año 2019 con el mismo periodo del año 2017 se evidenció una disminución en 16% para Liceo, 7% en Milán y una variación de 5% al -7% para el resto de 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 PM₁₀ en la ciudad. Para el caso de PM_{2.5} se identificó una disminución del 4% 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 junio la precipitación (1157.4 mm) fue 38% mayor que en 2018 (838.4 mm), lo que también pudo influir en la limpieza de la atmósfera en la ciudad a causa del fenómeno de *Scavenging*

Tabla 3. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio de PM₁₀ y PM_{2.5} (µg/m³) monitoreado en Manizales, durante el periodo enero – junio del año 2019.

Estadístico*	Año 2019						
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	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	22 ± 1.40
Desviación Estándar	6	4.5	3.2	6.3	5.6	5.1	5
Min. – Max.	10 -- 28	13 - 29	22 - 32	10 -- 35	13 - 30	14 - 29	10 - 35
Percentil 95%	28	27	31	31	29	29	29
Nº Datos	10	10	10	10	10	10	60
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	29 ± 0.04
Desviación Estándar	7	9	9.4	9.3	7.9	3	9
Min. – Max.	18 - 40	17 - 41	23 - 55	18 - 46	12 -- 40	15 -- 20	12 - 55
Percentil 95%	38	41	50	42	39	19	38
Nº Datos	9	8	8	6	10	2	43
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	21 ± 0.02
Desviación Estándar	5	6.8	7.3	7.7	5.5	3.8	6
Min. – Max.	11 -- 25	14 - 33	10 -- 33	11 -- 39	10 -- 27	10 -- 22	10 - 39
Percentil 95%	25	32	32	35	27	21	29
Nº Datos	10	10	9	10	10	10	59
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	31 ± 0.02
Desviación Estándar	8	9	5.8	9.1	7.6	9.4	8
Min. – Max.	17 - 40	14 - 45	24 - 43	13 -- 45	11 -- 40	17 -- 42	11 - 45
Percentil 95%	39	42	42	42	39	42	41
Nº Datos	10	10	10	10	10	10	60
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	21 ± 0.01
Desviación Estándar	6	6.9	4.6	4.8	5.6	5.8	6
Min. – Max.	9 -- 28	15 - 35	16 - 33	12 -- 29	9 -- 26	11 -- 31	9 - 35
Percentil 95%	27	35	32	28	24	27	29
Nº Datos	10	10	10	10	10	10	60
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	15 ± 1.76
Desviación Estándar	5	2.9	3	5.8	5	4.5	4
Min. – Max.	7 -- 15	10 -- 18	14 -- 22	6 -- 28	10 -- 23	7 -- 19	6 - 28
Percentil 95%	10	10	10	10	10	10	60

* 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.

De manera complementaria se presentan las figuras de evolución temporal de concentraciones diarias presentadas para PM₁₀ (Figura 2) y PM_{2.5} (Figura 3), 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).

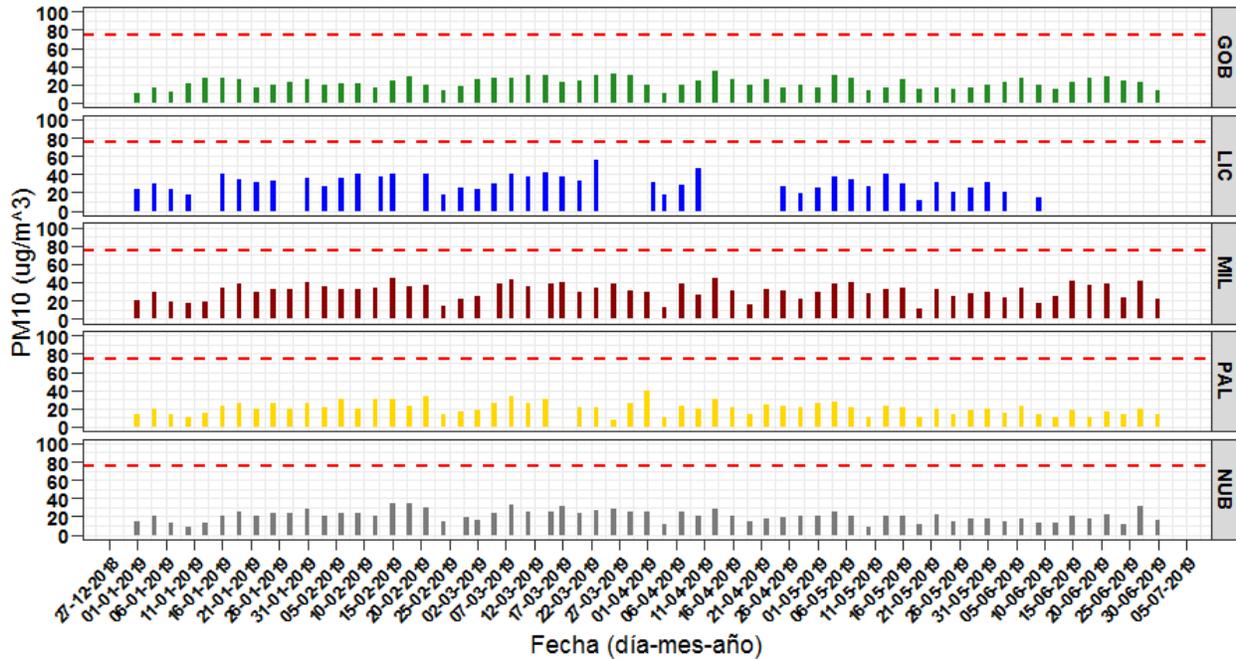


Figura 2. Evolución temporal de concentraciones de PM₁₀ diario durante el periodo enero – junio del año 2019 en el SVCA de Manizales. Equipos manuales. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM₁₀ establecido en la Resolución 2254 de 2017.

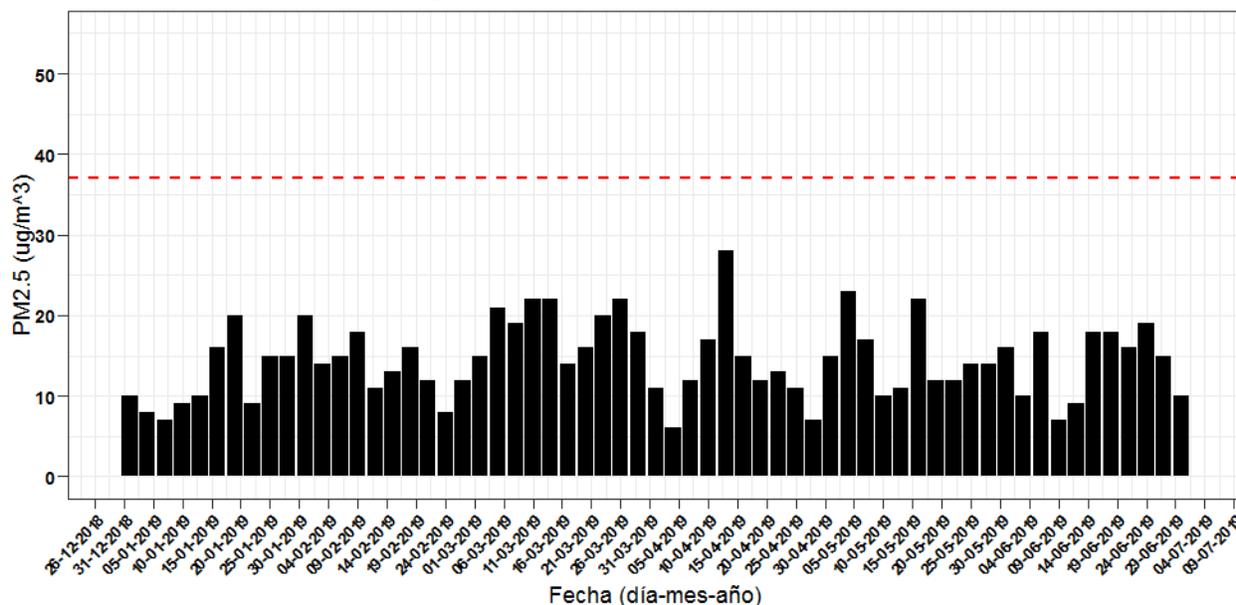


Figura 3. Evolución temporal de concentraciones de PM_{2.5} diario durante el periodo enero – junio del año 2019 en el SVCA de Manizales. Equipo manual. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM_{2.5} establecido en la Resolución 2254 de 2017.

EQUIPOS MANUALES ANÁLISIS DE PROMEDIOS PARA EL PERIODO DE ANÁLISIS Y COMPARACIÓN PRELIMINAR CON NORMA ANUAL

Se realizó un ejercicio de comparación del promedio aritmético obtenido para las concentraciones de PM_{10} (Figura 4) y $PM_{2.5}$ (Figura 5) para el periodo completo de análisis (enero – junio de 2019). 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 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

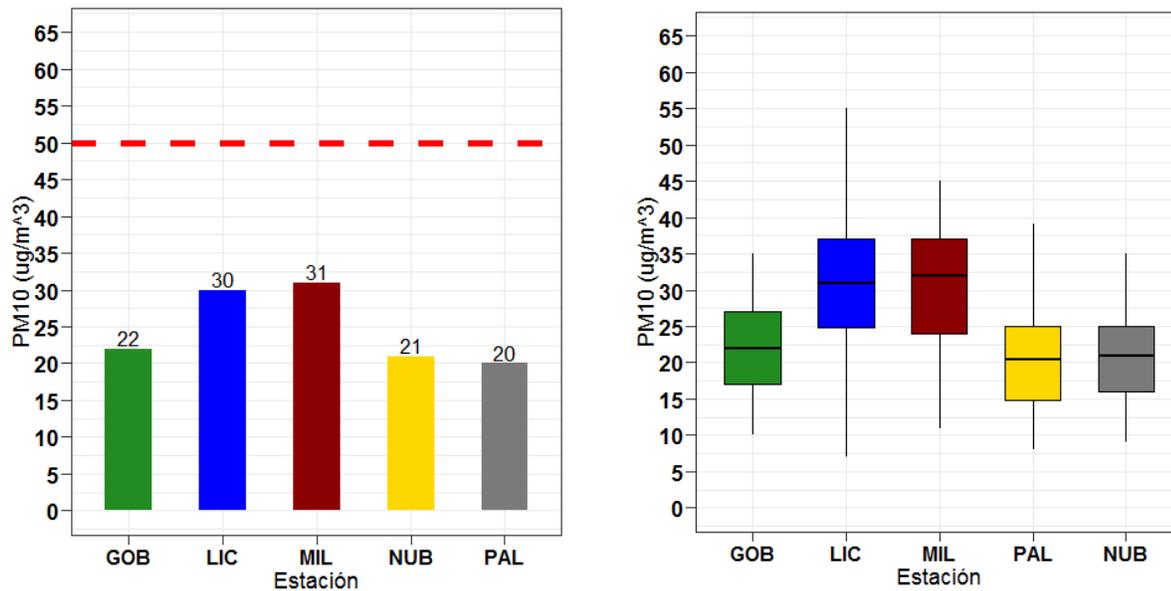


Figura 4. Diagrama de cajas (derecha) y concentración promedio de estaciones de PM_{10} (izquierda) entre enero – junio del 2019. Equipos manuales. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS.

En la Figura 6 se presenta la variación promedio de concentraciones de PM_{10} (Figura 6a) y $PM_{2.5}$ (Figura 6b) 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 días lunes presentan una concentración media menor a las registradas en los demás días laborales, comportamiento que se asocia al efecto de un remanente de atmósfera limpia producto de la disminución de concentración obtenida durante el domingo. Por su parte las estaciones Nubia y Palogrande presentan esta disminución los sábados y domingos, fenómeno asociado a la zona de influencia de cada estación, siendo ambas zonas Universitarias, cuya actividad disminuye los fines de semana. Finalmente la estación Milán presenta únicamente una disminución notable para el día domingo, asociado directamente a la actividad industrial del sector y disminución del tráfico vehicular.

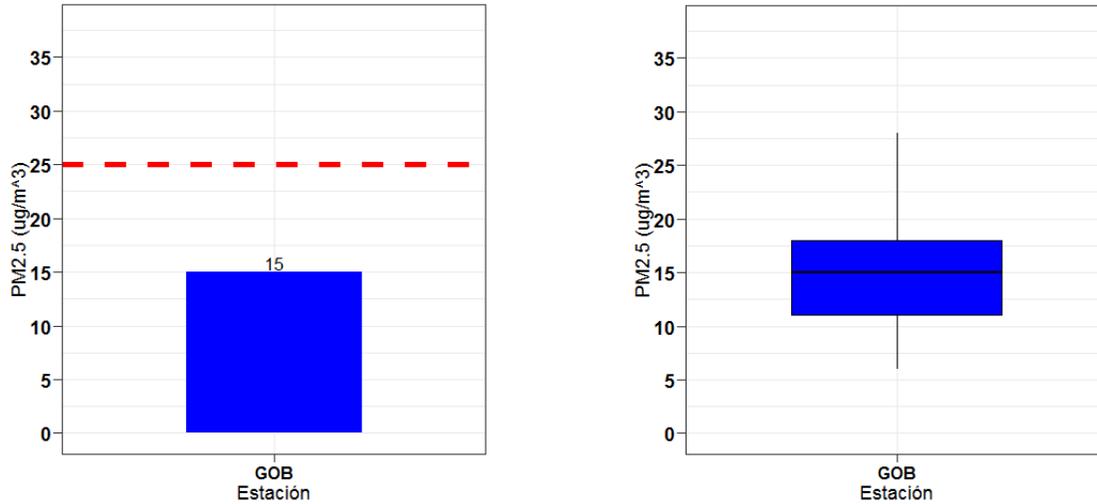


Figura 5. Diagrama de cajas (derecha) y concentración promedio de estaciones de PM_{2.5} (izquierda) entre enero – junio del 2019. Equipo manual. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS.

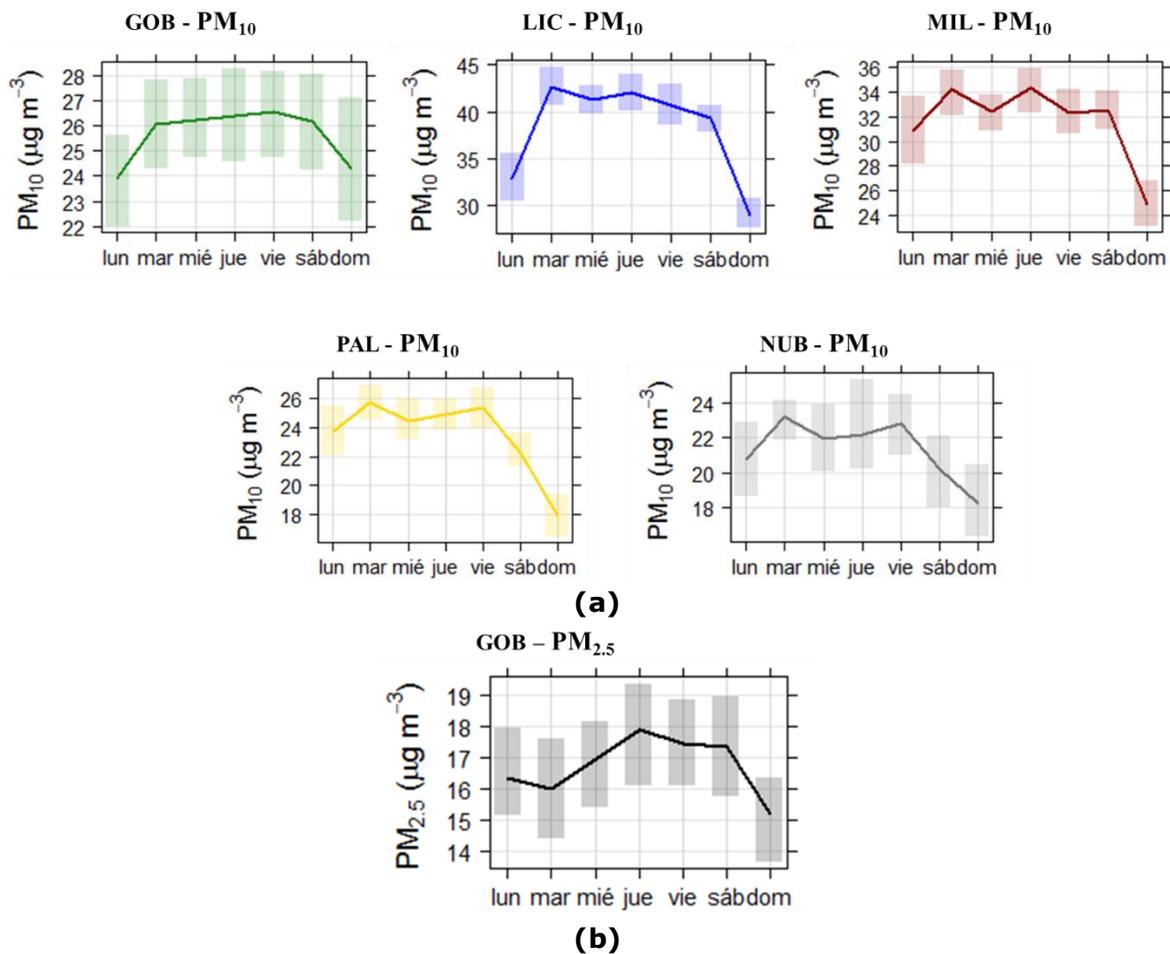


Figura 6. Variación por días de la semana de concentraciones de material particulado en periodo de enero – junio de 2019 para PM₁₀ y PM_{2.5}. Equipos manuales. La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROMEDIOS PARA 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 7 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).

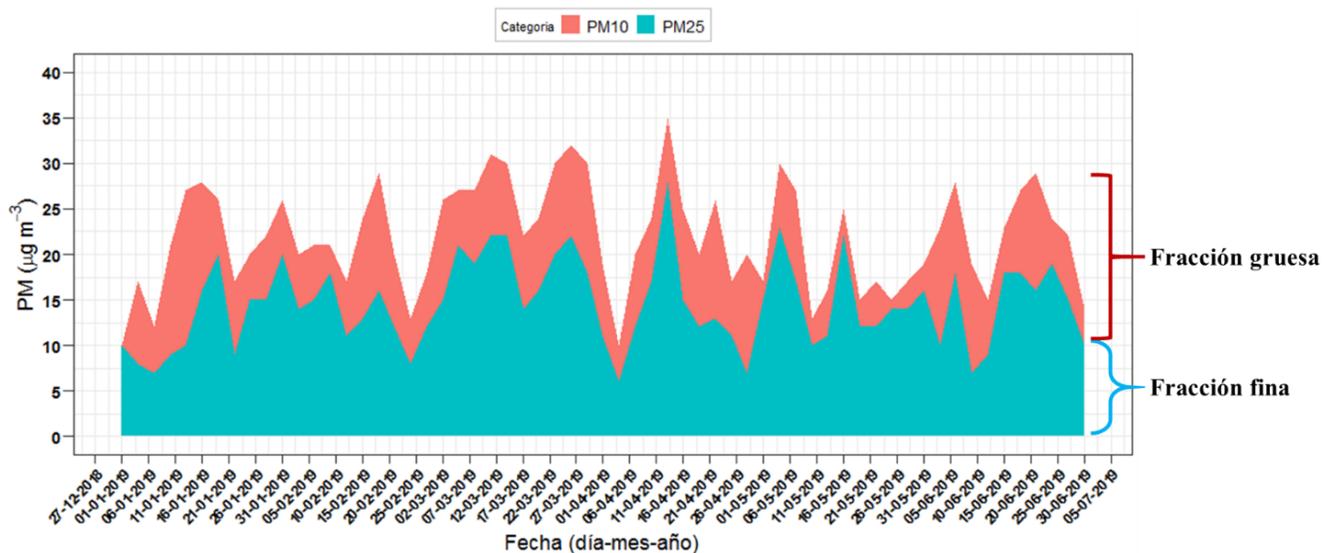


Figura 7. Relación entre el material particulado PM₁₀ - PM_{2.5} en la estación Gobernación durante el periodo de enero – junio de 2019. Equipos manuales.

EQUIPOS AUTOMÁTICOS: ANÁLISIS DE PROMEDIOS PARA EL PERIODO DE ANÁLISIS Y COMPARACIÓN PRELIMINAR CON NORMA ANUAL

La Figura 8 presenta la evolución horaria de las estaciones automáticas de PM (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 horaria en la estación Liceo registraron valores cercanos a los 28 µg/m³ para PM₁₀ y 20 µg/m³ para PM_{2.5}, con promedios horarios superiores en la tercer hora de movilidad del día, alrededor de las 6 a 8 pm. Por su parte la estación Gobernación registró valores de 22 µg/m³ para PM₁₀ y 15 µg/m³ para PM_{2.5} en ambos horarios de movilidad. Además, se observa el perfil 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 33% respecto al promedio semanal para ambas estaciones y para ambos contaminantes, indicando que tanto el PM_{10} como el $PM_{2.5}$ pueden provenir de la misma fuente de emisión.

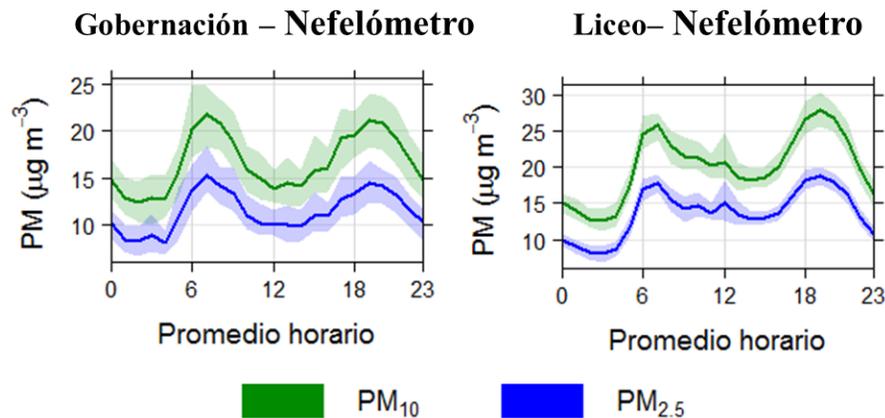


Figura 8. Promedio horario para PM_{10} y $PM_{2.5}$ durante los registros del mes de junio 2019. Equipos automáticos. Estaciones Gobernación y Liceo.

4. **ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE, ICA, PARA PM_{10} Y $PM_{2.5}$ EN EL SVCA DE MANIZALES**

La Figura 9 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo manual de PM. El ICA representa mediante un indicador de color, el estado de la calidad del aire de acuerdo a la concentración de material particulado y su posible afectación a la salud. Para el cálculo de este indicador (ICA) se utiliza la metodología propuesta por la resolución 2254 de 2017 (capítulo IV artículo 18 al 21) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS 2017). Se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena en la mayoría de las estaciones de PM_{10} , 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.

	Buena	Moderada	Dañina para la salud de grupos sensibles	Dañina para la salud	Muy dañina para la salud	Peligrosa
Rango PM ₁₀ (µg/m ³)	0 - 54	55 - 154	155 - 254	255 - 354	355 - 424	425 - 504
Rango PM _{2.5} (µg/m ³)	0-12	13-37	38-55	56-150	151-250	251-500

Estación Gobernación PM₁₀



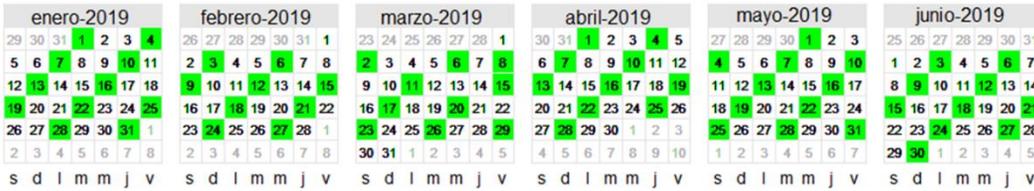
Estación Gobernación PM_{2.5}



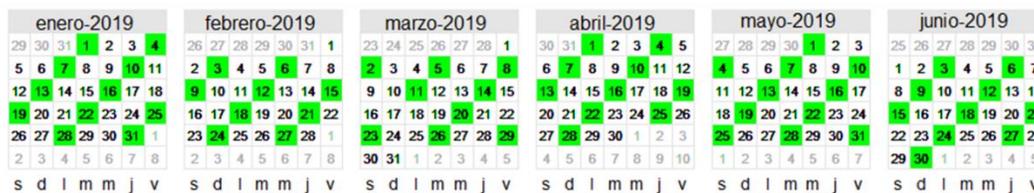
Estación Liceo PM₁₀



Estación Milán PM₁₀



Estación Palogrande PM₁₀



Estación Nubia PM₁₀

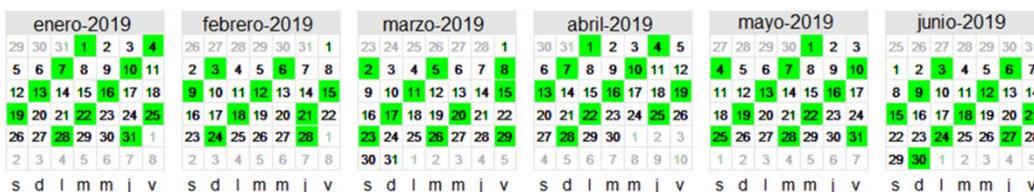


Figura 9. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ y PM_{2.5} en Manizales durante el periodo enero – junio del año 2019. Basado en la resolución 2254 de 2017 de MADS.

5. RESULTADOS MONITOREO DE GASES

MONITOREO DE OZONO, 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 10 se observa que los datos presentan un perfil coherente para este tipo de contaminante, con promedio octohorario de 21 µg/m³ ± 12.1, 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 el mes de mayo, esto se presentó por fallas técnicas del equipo y en tiempo que tomó realizar las reparaciones pertinentes.

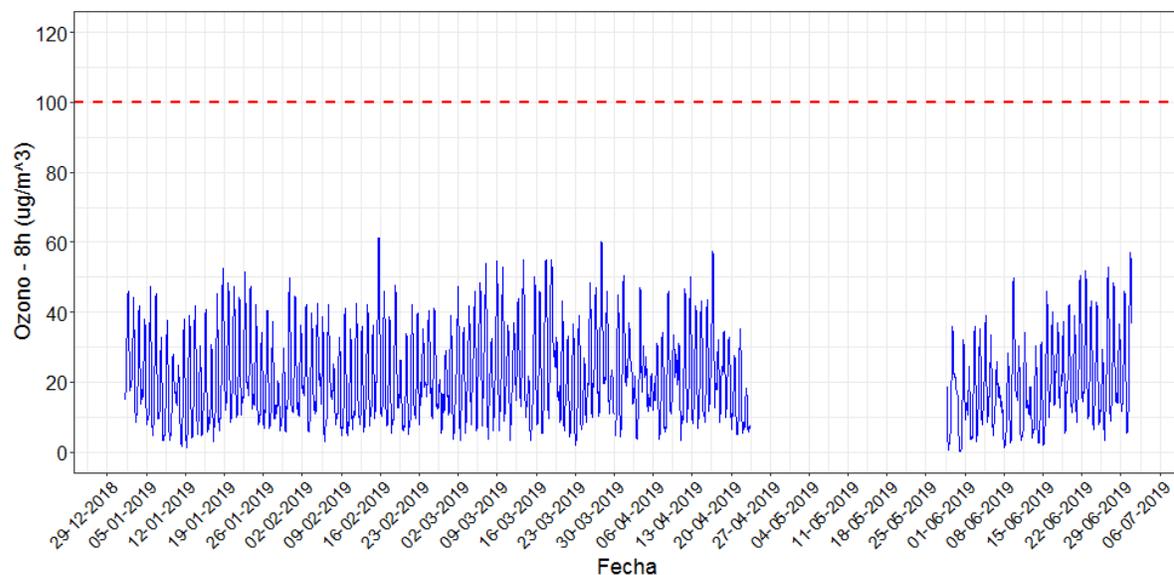


Figura 10. Variación de concentración de ozono troposférico entre enero – junio del 2019. Promedio octohorario. La línea punteada roja representa el límite máximo permisible establecido en la Res. 2254 de 2017 de MADS.

De manera alternativa se presenta en la Figura 11 el resumen de la variación de O₃ y Radiación Solar promedio horaria, semanal y mensual para todos los datos generados de enero a junio 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 cercana a los 43 µg/m³ y niveles de radiación promedio cercanos a los 500 W/m². 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 µg/m³, 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 11 se identificó que las concentraciones durante el día son aproximadamente 2 veces más elevadas que en las noches, con un promedio diurno de 29.1 µg/m³ y uno nocturno de 13.0

$\mu\text{g}/\text{m}^3$. Se evidencia que los promedios durante la noche no presentan relación con los días de la semana, esto se asocia a que en la noche no existe radiación solar y por tanto no hay generación de ozono. De otra parte, los promedios diurnos y mensuales evidencian que las variaciones tienen relación directa con la radiación solar, a excepción de los días 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).

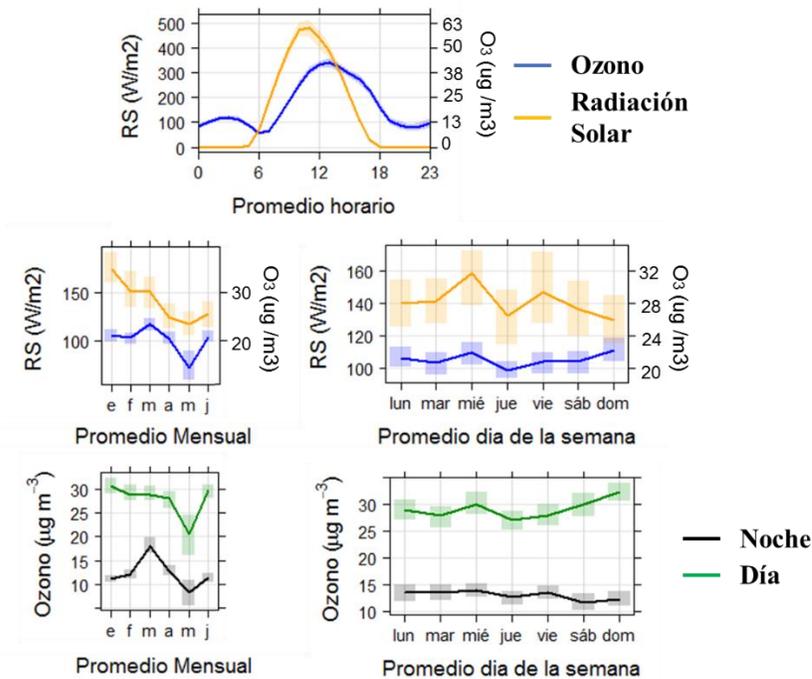


Figura 11. Variación promedio horario, semanal y mensual de ozono troposférico y radiación solar (Se incluye además el comportamiento promedio mensual y semanal entre las horas diurnas y nocturnas) entre enero – junio del 2019 (O_3) en la estación Gobernación.

MONITOREO DE MONÓXIDO DE CARBONO, CO

La Figura 12 muestra los resultados del monitoreo de CO entre enero y junio del año 2019. Se muestran los registros de concentración de CO octohorario (Figura 12). Se resalta que la concentración de CO, tanto horaria como octohorario, no se ha superado el límite promedio 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 13 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 $772 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 419$, 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 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 $650 \mu\text{g}/\text{m}^3$, es decir, una reducción del 19% 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.

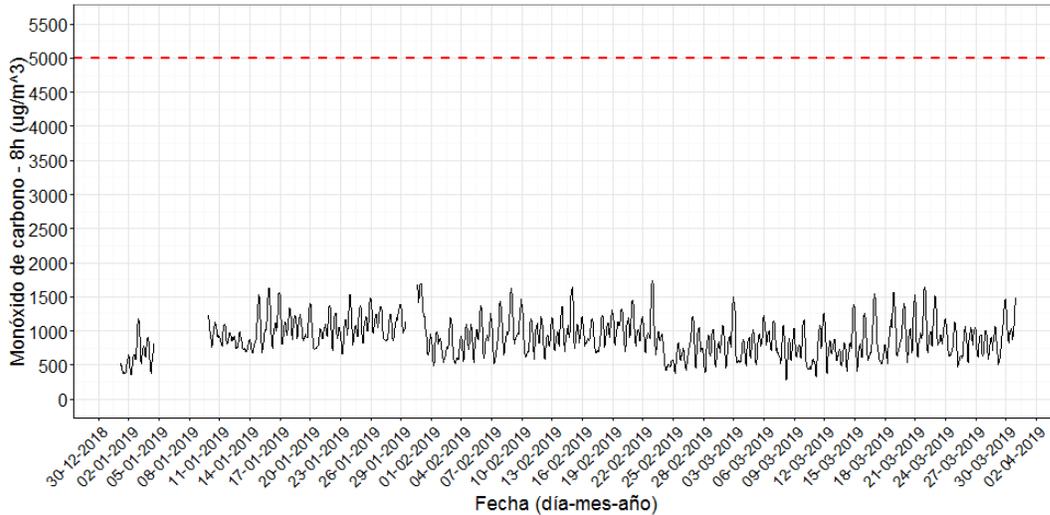


Figura 12. Variación de concentración de monóxido de carbono obtenida durante periodo enero – junio del año 2019 en la estación Gobernación. Promedio octohorario. La línea punteada roja representa el límite máximo permisible establecido en la Res. 2254 de 2017 de MADS.

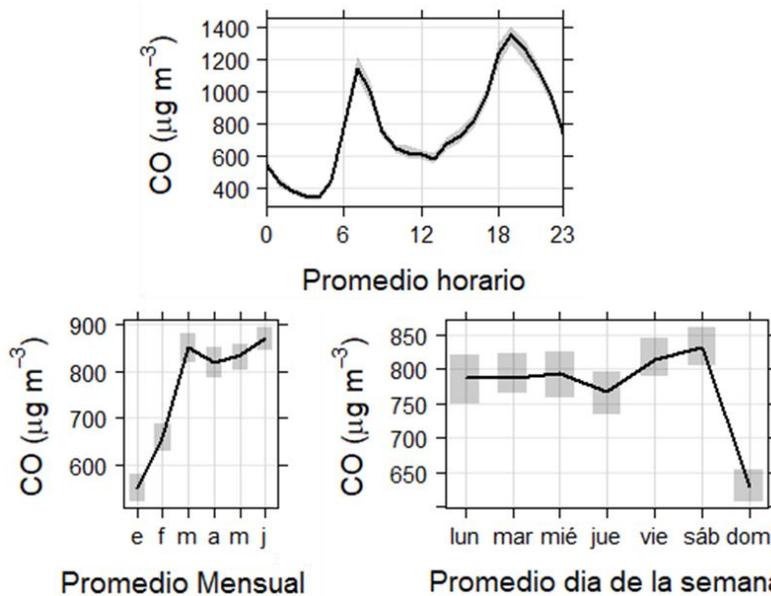


Figura 13. Variación promedio horaria, diaria y mensual de monóxido de carbono (CO) en la estación Gobernación entre enero – junio del 2019.

La Figura 14 la comparación en el periodo de abril a junio de las concentraciones horarias de CO y material particulado $PM_{2.5}$. Se observa la concordancia en los picos máximos y mínimos de ambos contaminantes, lo que evidencia que la procedencia de ambos contaminantes es de la misma fuente. Como se ha mencionado estos picos también concuerdan con los horas pico de tráfico vehicular de la ciudad, por lo tanto se infiere que el material particulado $PM_{2.5}$ en la ciudad de Manizales es principalmente un contaminante primario, al igual que el monóxido de carbono.

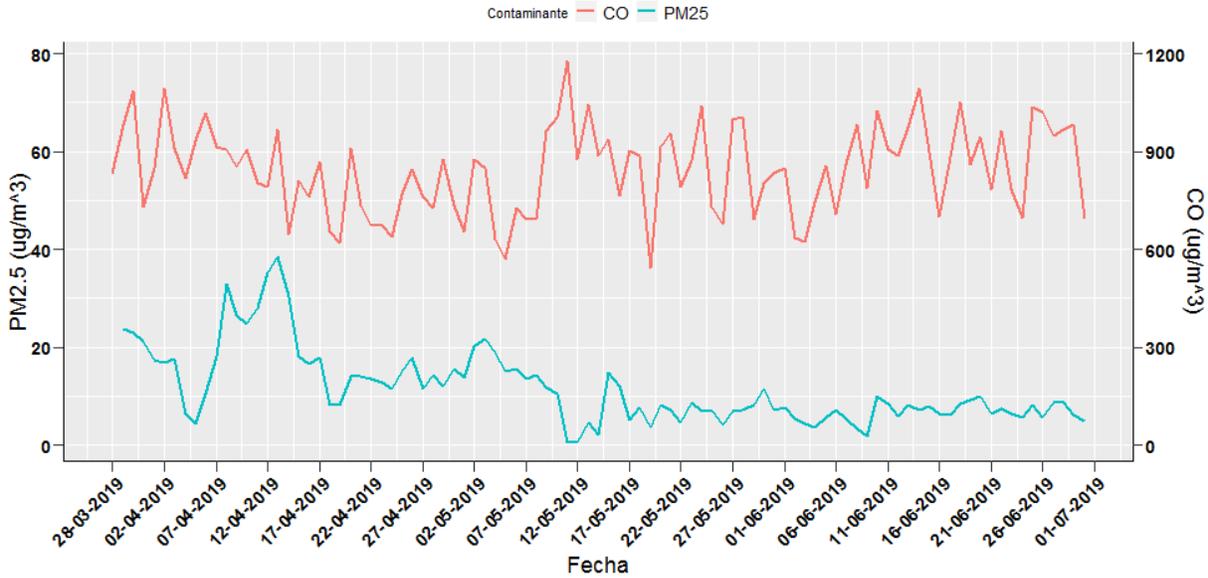


Figura 14. Variación promedio horaria de monóxido de carbono (CO) material particulado (PM_{2.5}) en la estación Gobernación entre abril – junio del 2019.

6. 7. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE, ICA, PARA CO Y O₃ EN EL SVCA DE MANIZALES

La Figura 15 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 CO y O₃ se utiliza la metodología propuesta por la resolución 2254 de 2017 (capítulo IV artículo 18 al 21) del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (MADS 2017). Se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena durante todo el periodo analizado para ambos 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

Estación Gobernación CO (Octohorario)



Estación Gobernación O₃ (Octohorario)



Figura 15. Índice de calidad del aire (ICA) para CO y O₃ en Manizales durante el periodo enero - junio del año 2019. Basado en la resolución 2254 de MADS.

7. 8. REFERENCIAS

- 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
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), 2017. Resolución 2254 de 2017. Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. Bogotá, D.C., Colombia.
- González, C.M., Gómez, C.D., Rojas, N.Y., Acevedo, H., Aristizábal, B.H., 2017. *Relative impact of on-road vehicular and point-source industrial emissions of air pollutants in a medium-sized Andean city*. *Atmospheric Environment* 152, 279-289. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.12.048>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), 2010. Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. Bogotá, D.C., Colombia.
- Servicio geológico colombiano (SGC), 2019. *Boletín semanal de actividad del volcán Nevado del Ruiz*. Manizales, Caldas. Dirección de geoamenazas.
- Steer Davies Gleave. (2017). Manizales plan maestro de movilidad . Manizales: Gaceta del concejo de Manizales. Recuperado el 06 de 17 de 2019, de <http://concejodemanizales.gov.co/wp-content/uploads/2018/06/GACETA-188-DE-2018-PLAN-MAESTRO-DE-MOVILIDAD-DEFINITIVA.pdf>

- G. Loosmore y R. Cederwall, «Precipitation scavenging of atmospheric aerosols for emergency response applications: testing an updated model with new real time data,» *Atmospheric Environment*, vol. 38, pp. 993-1003, 2004.
- M. Akyüz y H. Cabuk, «Meteorological variations of PM12.5/PM10 concentrations and particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Zonguldak,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 170, pp. 13-21, 2009.
- 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>