

BOLETÍN CALIDAD DEL AIRE EN MANIZALES PERÍODO ENERO - SEPTIEMBRE DE 2018

Instituto de Estudios Ambientales, Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

Subdirección de Evaluación y Seguimiento Ambiental CORPOCALDAS.

Camilo Zapata Mora^a, Angel David Gálvez Serna^a, Carlos Mario González Duque^a, Beatriz Helena Aristizábal Zuluaga^a, Mauricio Velasco García^b

^a Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental (GTAIHA), Universidad Nacional de Colombia sede Manizales.

Departamento de Ingeniería Química.

^b Corporación Autónoma Regional de Caldas, Corpocaldas.

1. RESUMEN

Se presentan en este informe los resultados del monitoreo de contaminantes atmosféricos realizado en Manizales durante el periodo de enero a septiembre de 2018. 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 el índice de calidad el aire de material particulado PM_{10} .

2. EL SISTEMA DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE EN MANIZALES

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 (SO_2), ozono troposférico (O_3). 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>, 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 SVCA conformado por 6 equipos para el monitoreo de material particulado (5 de PM_{10} , 1 de $PM_{2.5}$), aplicando técnicas de monitoreo activo. El SVCA de Manizales también cuenta con una estación automática para el monitoreo de los gases SO_2 , O_3 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.

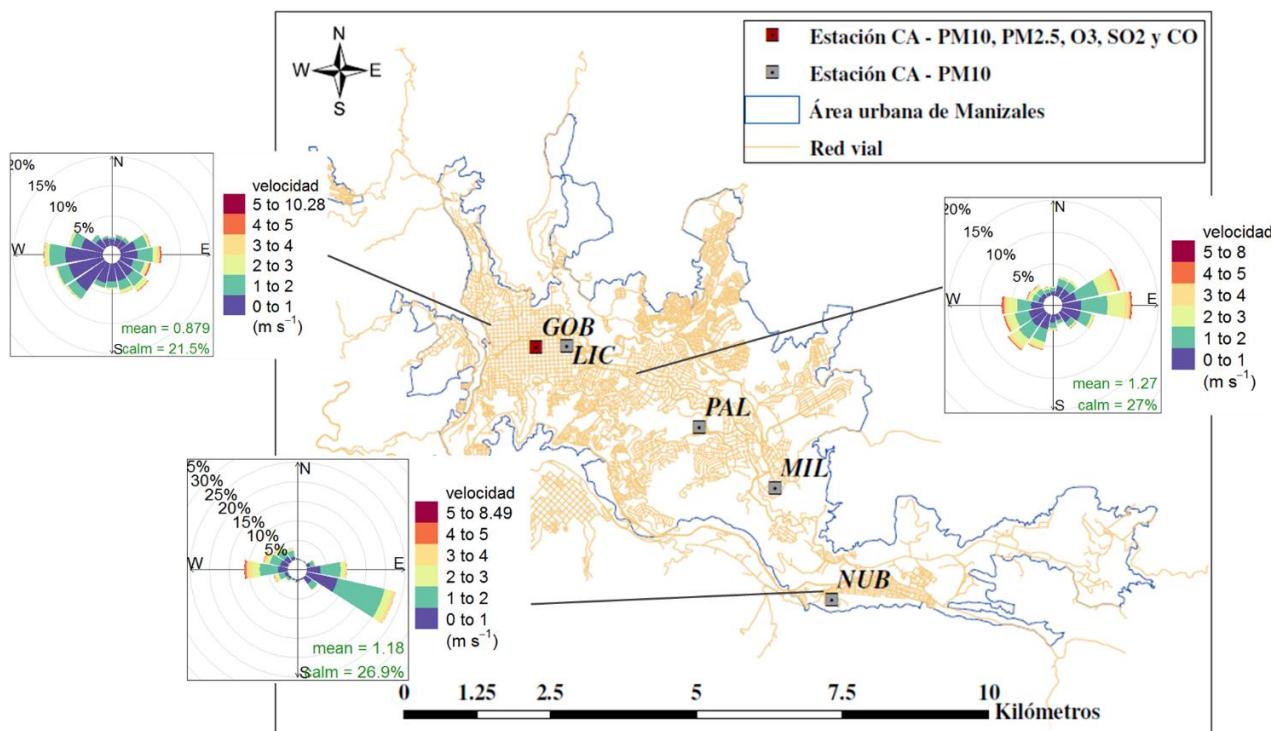


Figura 1. Mapa de Manizales con ubicación de las estaciones de calidad del aire y rosas de viento de estaciones meteorológicas representativas para el periodo enero-septiembre del 2018.

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

Estación – Contaminante	Características y fuentes de contaminantes*	Año Instalación	Latitud / Longitud	Altitud msnm
Gobernación - PM ₁₀		2009		
Gobernación - PM _{2.5}		2009		
Gobernación - SO ₂	CU, SC – MTV, PAI	2014	N 5° 4' 6.53" W 75° 31' 1.54"	2125
Gobernación - O ₃		2014		
Gobernación – CO		2018		
Palogrande - PM ₁₀	ZC, SR - ATV, SAI	2009	N 5° 3' 22.4" W 75° 29' 31.3"	2154
La Nubia - PM ₁₀	ZSE, SR - BTV, AZI	2009	N 5° 1' 47.0" W 75° 28' 18"	2091
Liceo - PM ₁₀	CU, SC - ATV, PAI	2000	N 5° 4' 5.01" W 75° 30' 37.58"	2156
Milán - PM ₁₀	ZC, SR - MAI, MTV	2012	N 5° 2' 48.5" W 75° 28' 48.68"	2188

*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.

El seguimiento de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) en Manizales se realiza mediante técnicas de monitoreo activas que permiten la obtención de registros promedio diario de la concentración en aire ambiente de dichos contaminantes

(muestras de 24 horas cada tres días). De otra parte, el seguimiento de gases (O_3 , SO_2 y CO) realizado actualmente en la estación automática de calidad del aire Gobernación (GOB), permite la obtención de registros cinco minútiales. A partir de los registros 5 minútiales se obtienen registros promedio horario (media aritmética) y registros promedio octohorario (media móvil a partir de registros horarios). Todos los registros obtenidos tanto de partículas como de gases en aire ambiente, son útiles además para comparar los límites máximos permisibles definidos en la normativa colombiana, actualmente mediante la Resolución 2254 de 2017 (MADS, 2017).

Para el presente informe, se muestran los resultados obtenidos para PM_{10} , $PM_{2.5}$ y los gases O_3 y CO. El equipo de monitoreo de SO_2 presentó algunos inconvenientes que han imposibilitado la recolección de información de este contaminante de manera continua durante el periodo de análisis, por ende no se muestran los registros de SO_2 .

3. RESULTADOS MONITOREO DE MATERIAL PARTICULADO, PM_{10} Y $PM_{2.5}$

ANÁLISIS DE PROMEDIOS DIARIOS PARA EL PERIODO ENERO - SEPTIEMBRE DEL AÑO 2018

En la Tabla 2 se presentan los estadísticos descriptivos para las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ obtenidas durante el periodo de análisis (enero-septiembre de 2018). Se muestra el promedio aritmético, desviación estándar, concentración mínima, concentración máxima, el percentil 95 y el porcentaje 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 muestran como la estación Liceo registró los valores más altos de PM_{10} , con un promedio aritmético para el periodo de análisis de $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $10.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) seguida por la estación Milán con un promedio aritmético de $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $7.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Mayores niveles de contaminación en la estación del Liceo pueden estar influenciados por el tráfico vehicular característico de esta zona. De otra parte, en Milán la influencia de la actividad industrial y el tráfico vehicular presentado en este sector, sugiere también su incidencia en los niveles de PM_{10} obtenidos. Con respecto a las estaciones Gobernación, Nubia y Palogrande, se observó que en general estas estaciones registraron las menores concentraciones de PM_{10} durante el periodo evaluado, con promedios de $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Gobernación (desv. std = $7.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$), $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Nubia (desv. std = $5.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Palogrande (desv. std = $5.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

La información de la Tabla 2 se complementa con las Figuras de evolución temporal de concentraciones diarias presentadas para PM_{10} (Figura 2) y $PM_{2.5}$ (Figura 3). En términos de PM_{10} , se observa la diferencia entre las mayores concentraciones obtenidas en Liceo y Milán con respecto a aquellas obtenidas en las estaciones Palogrande, Nubia y Gobernación. Asimismo, se destaca que en ninguna de las estaciones de monitoreo se superó el límite máximo diario para material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) establecido en la Resolución 2254 de 2017 (MADS, 2017). Un evento importante asociado a actividad volcánica se presentó durante los días 4 y 17 de septiembre en los cuales se informó sobre episodios de emisión de ceniza del volcán Nevado del Ruiz. Dicho comportamiento pudo estar relacionado con los valores de concentración de los días 18 y 21 de septiembre en todas las estaciones, tal como se observa en la Figura 2, donde se obtuvieron los valores máximos del mes de septiembre. El promedio diario obtenido durante el día 18 de septiembre se reportó como el máximo en todas las estaciones, superando la media del mes. Por ejemplo, en la estación de mayor concentración (Liceo) se obtuvo un valor diario de $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un promedio de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en septiembre; mientras que en la estación Nubia se obtuvo un valor diario de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un promedio en septiembre de $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A pesar de que en la ciudad solo se realiza monitoreo de partículas cada tres días, este comportamiento confirma la influencia de periodos de alta actividad volcánica con emisión de ceniza en el incremento de concentraciones de material particulado en la ciudad.

Tabla 2. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio de PM₁₀ y PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) monitoreado en Manizales durante enero a septiembre del año 2018.

Estadístico*	Mes									
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Total
Liceo PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ estándar)										
Promedio	46	39	38	33	32	29	28	30	30	33
Desv. Est.	9.2	14.9	12.9	6.9	6.7	6.7	8.1	5.9	6.6	10.2
Min. - Max	27 - 56	15 - 57	18 - 51	20 - 43	17 - 41	15 - 36	15 - 39	17 - 38	18 - 38	15 57
Percentil 95	56	56	51	43	40	30	37	37	37	53
% datos válidos	100	90	80	100	100	80	100	100	100	92
Milán PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ estándar)										
Promedio	32	28	32	29	25	24	28	25	29	27
Desv. Est.	5.8	7.9	11.8	6.1	5.9	6.4	7.9	5.4	7.5	7.6
Min. - Max	24 - 42	17 - 43	17 - 50	21 - 38	16 - 32	14 - 38	11 - 33	15 - 32	16 - 42	11 - 50
Percentil 95	41	39	48	38	32	35	32	32	39	42
% datos válidos	100	90	90	100	100	100	100	100	100	97
Palogrande PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ estándar)										
Promedio	21	20	26	22	19	15.6	18	18	18	20
Desv. Est.	3.4	7.1	7.6	4.8	3.7	3	6	4	5.1	5.6
Min. - Max	16 - 27	8 - 31	13 - 34	16 - 32	13 - 24	9 - 19	10 - 27	13 - 27	8 - 24	8 - 34
Percentil 95	25	30	33	29	23	19	24	24	23	30
% datos válidos	100	100	90	100	90	90	90	100	100	96
Nubia PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ estándar)										
Promedio	22	23	26	21	20	18	23	20	21	21
Desv. Est.	4.5	7.5	8.4	3.5	3.4	4.1	5.3	3.8	6.1	5.7
Min. - Max	16 - 30	11 - 34	14 - 45	15 - 26	15 - 261	10 - 21	11 - 26	13 - 25	13 - 30	10 - 45
Percentil 95	28	32	38	26	25	21	25	24	29	30
% datos válidos	100	100	100	100	100	90	80	100	100	96
Gobernación PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ estándar)										
Promedio	26	22	26	28	25	20	18	21	19	23
Desv. Est.	7.5	10.3	8.8	5.8	5.8	6.6	4.3	4.3	4.4	7.3
Min. - Max	13 - 33	9 - 41	10 - 38	22 - 39	12 - 31	10-32	9 - 23	16 - 27	13 - 25	9 - 41
Percentil 95	33	38	36	38	30	29.7	22	27	24	35
% datos válidos	100	100	100	100	90	100	100	70	1000	99
Gobernación PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ estándar)										
Promedio	15	9	17	20	17	14	11	16	12	14
Desv. Est.	2.5	3.6	5.3	4.2	3.6	4.7	3.2	3.2	3.9	4.8
Min. - Max	11 - 19	5 - 14	5 - 26	14 - 30	9 - 22	7 - 22	7 - 17	7 - 16	7 - 17	5 - 30
Percentil 95	18	14	24	26	21	20	16	16	15	23
% datos válidos	90	100	100	100	100	90	100	100	100	98

*Estadísticos calculados a partir de los registros de concentración promedio diarios

** n: Número total de datos obtenidos durante el periodo enero-septiembre de 2018

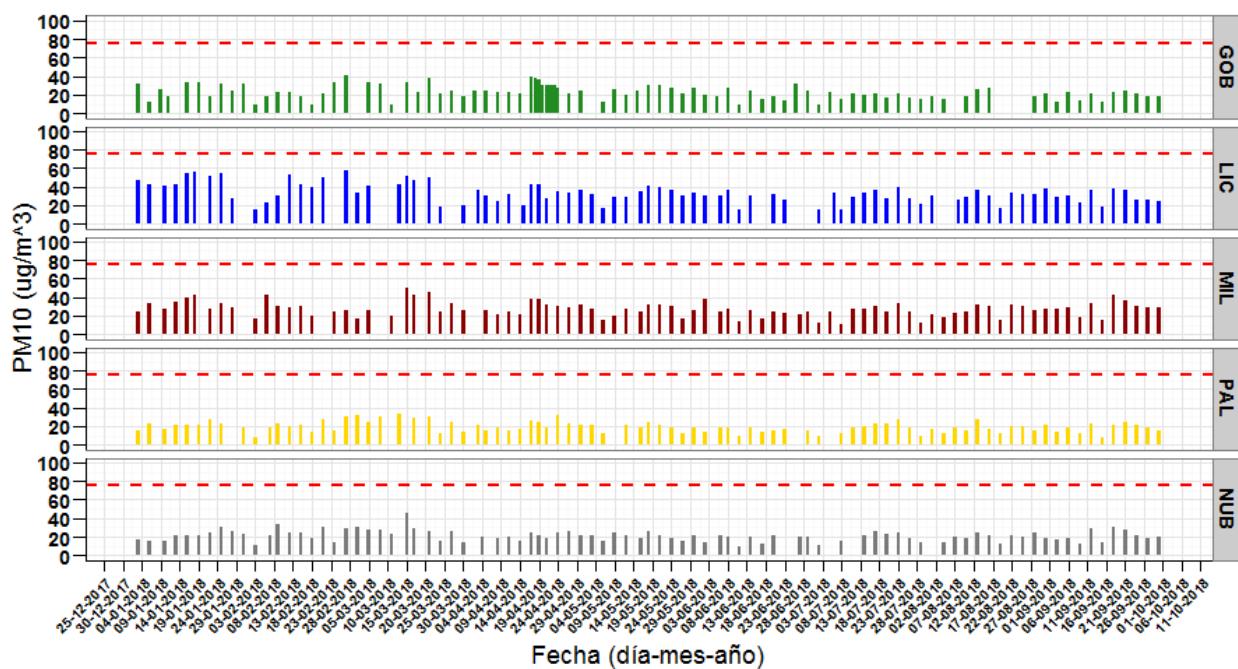


Figura 2. Evolución temporal de concentraciones de PM₁₀ diario durante enero a septiembre del año 2018 en el SVCA de Manizales. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM₁₀ establecido en la Resolución 2254 de 2017.

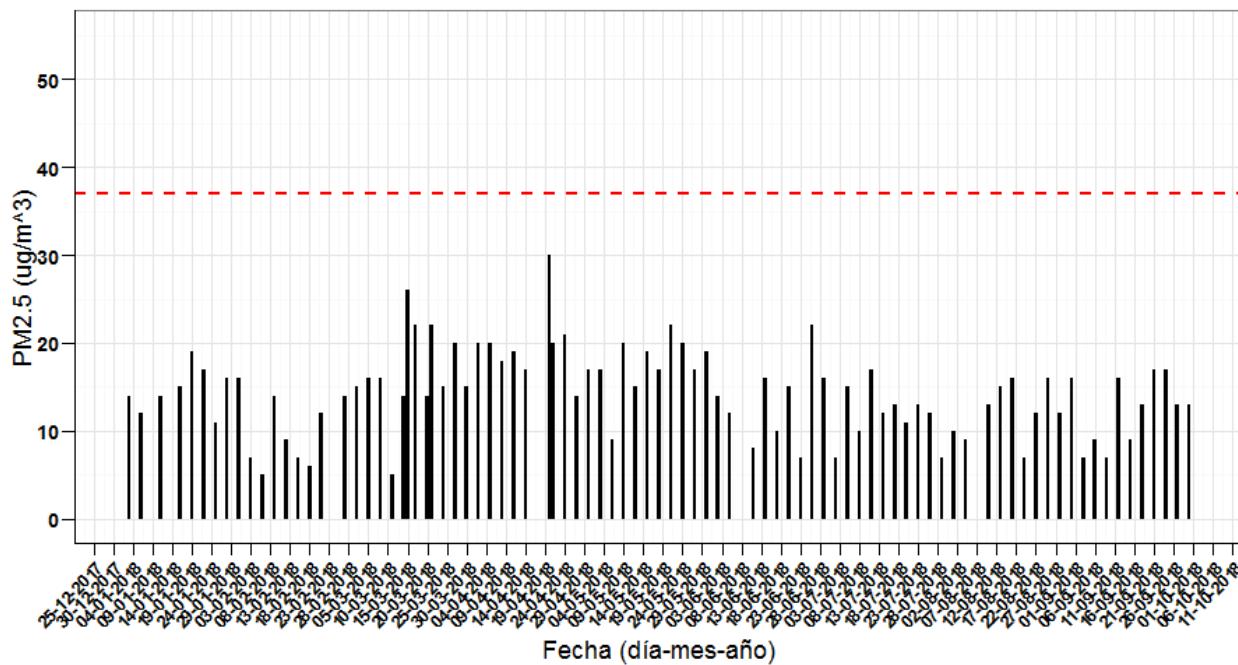


Figura 3. Evolución temporal de concentraciones de PM_{2.5} diario durante enero a septiembre del año 2018 en el SVCA de Manizales. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM_{2.5} establecido en la Resolución 2254 de 2017.

ANÁLISIS DE PROMEDIOS PARA EL PERÍODO 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 – septiembre de 2018). 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 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

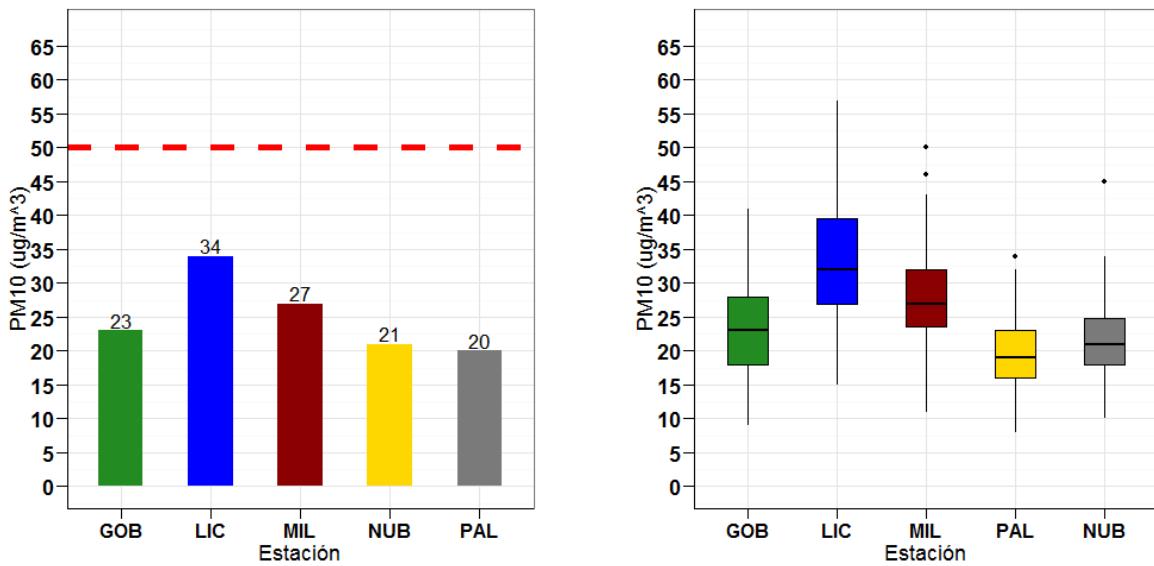


Figura 4. Diagrama de cajas (derecha) y concentración promedio de estaciones de PM_{10} (izquierda) entre enero y septiembre del 2018. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS.

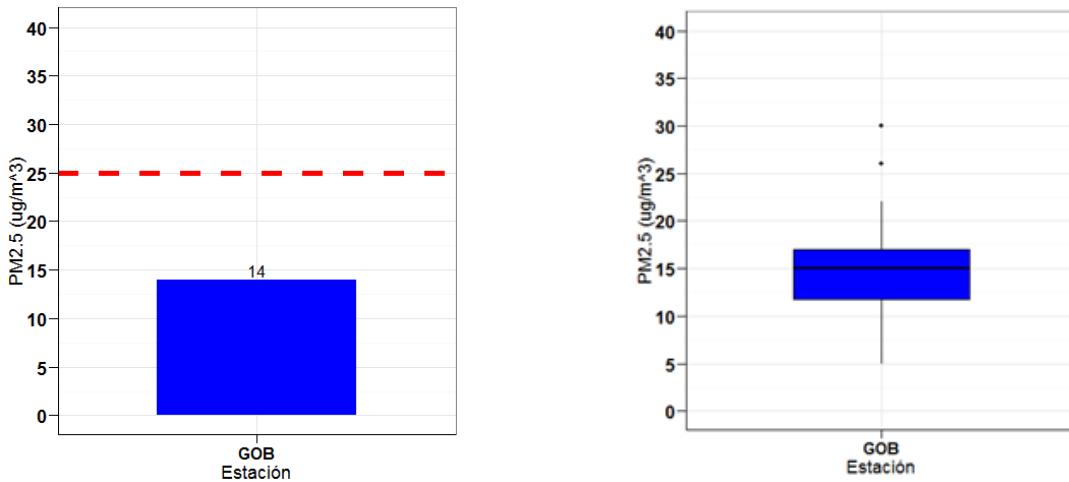


Figura 5. Diagrama de cajas (derecha) y concentración promedio de estaciones de $PM_{2.5}$ (izquierda) entre enero y septiembre del 2018. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS.

En la Figura 6 se presenta la variación promedio de concentraciones de PM_{10} (Figura 6a) y $\text{PM}_{2.5}$ (Figura 6b) por días de la semana en las estaciones de la ciudad. En esta 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 también una concentración media menor a las registradas en los demás días laborales, comportamiento que se podría asociar al efecto de un remanente de atmósfera limpia producto de la disminución de concentración obtenida durante el domingo.

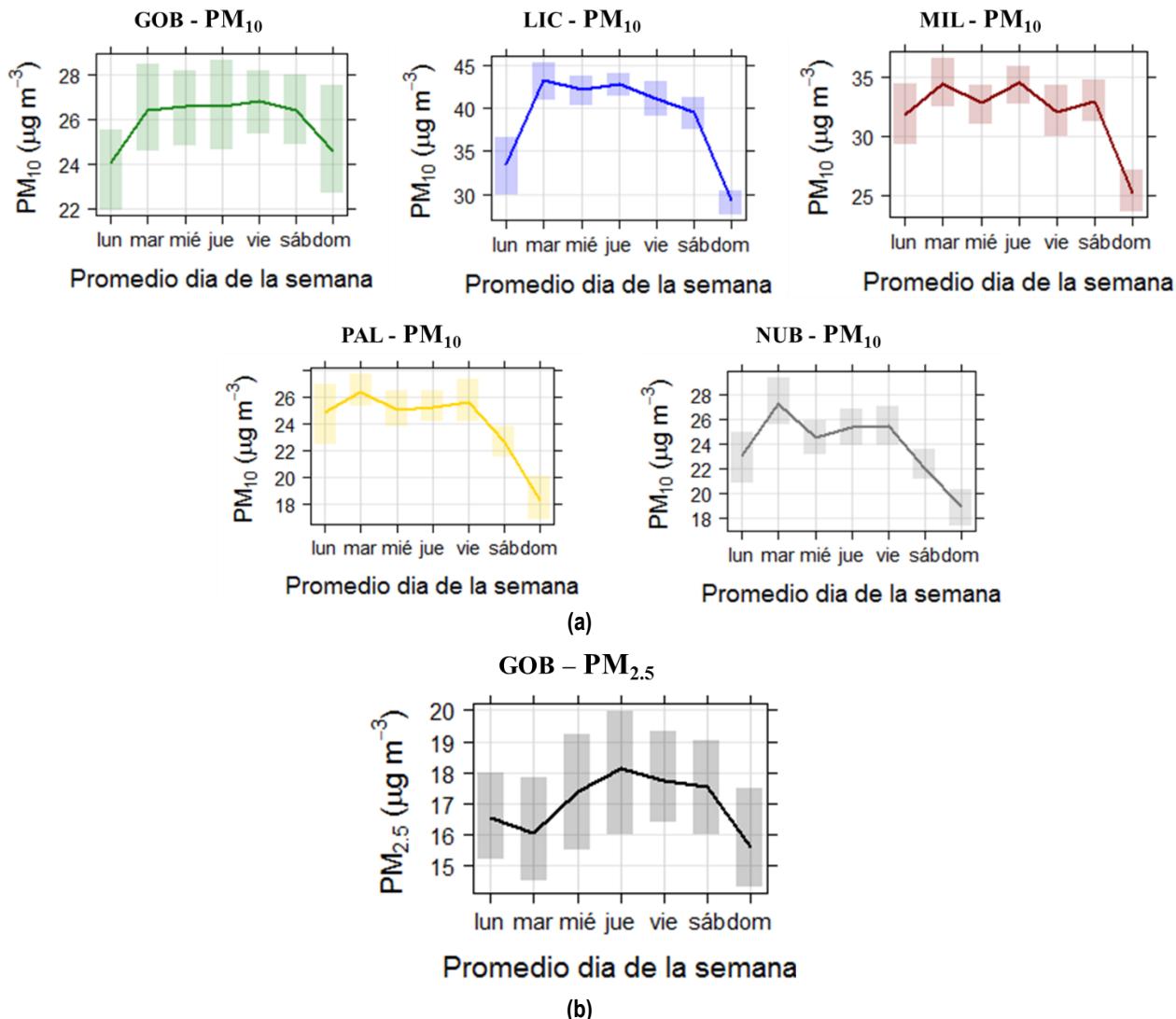


Figura 6. Variación por días de la semana de concentraciones de material particulado en periodo de enero a septiembre de 2018 para a) PM_{10} . b) $\text{PM}_{2.5}$. La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%

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

La Figura 7 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de PM_{10} . 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. Se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena en la mayoría

de las estaciones, sólo en Liceo se presentaron 3 días con calidad de aire moderada entre los meses de enero y febrero. El ICA se calcula siguiendo la metodología propuesta en el Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire del Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (actualmente Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible).

Rango PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Buena	Moderada	Dañina para la salud de grupos sensibles	Dañina para la salud	Muy dañina para la salud	Peligrosa
	0 - 54	55 - 154	155 - 254	255 - 354	355 - 424	425 - 504

Estación Liceo PM₁₀



Estación Gobernación PM₁₀



Estación Milán PM₁₀



Estación Palogrande PM₁₀



Estación Nubia PM₁₀



Figura 7. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ en Manizales durante enero a septiembre del año 2018.

5. RESULTADOS MONITOREO DE GASES

MONITOREO DE OZONO TROPOSFÉRICO, O_3

La Figura 8 muestra los resultados del monitoreo de O_3 durante enero a septiembre del año 2018. Se muestran los registros de concentración de O_3 horario (Figura 8a) y octohorario (Figura 8b). Este contaminante secundario presenta un perfil diurno caracterizado por mayores niveles en períodos de máxima radiación solar (medio día), comportamiento asociado a reacciones fotoquímicas de precursores de ozono (NOx y COV). Se observa que los datos presentan un perfil diurno coherente para este tipo de contaminante, con mayores concentraciones en horas de alta radiación solar y un descenso en horas de la noche. Para el cálculo de la variación de la concentración del ozono en períodos de 8 horas, se empleó la media móvil. Al comparar los valores de ozono octohorario con el límite máximo permisible ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$), establecido en la Resolución 2254 de 2017, se observa que la norma de ozono no fue superada durante el periodo de monitoreo.

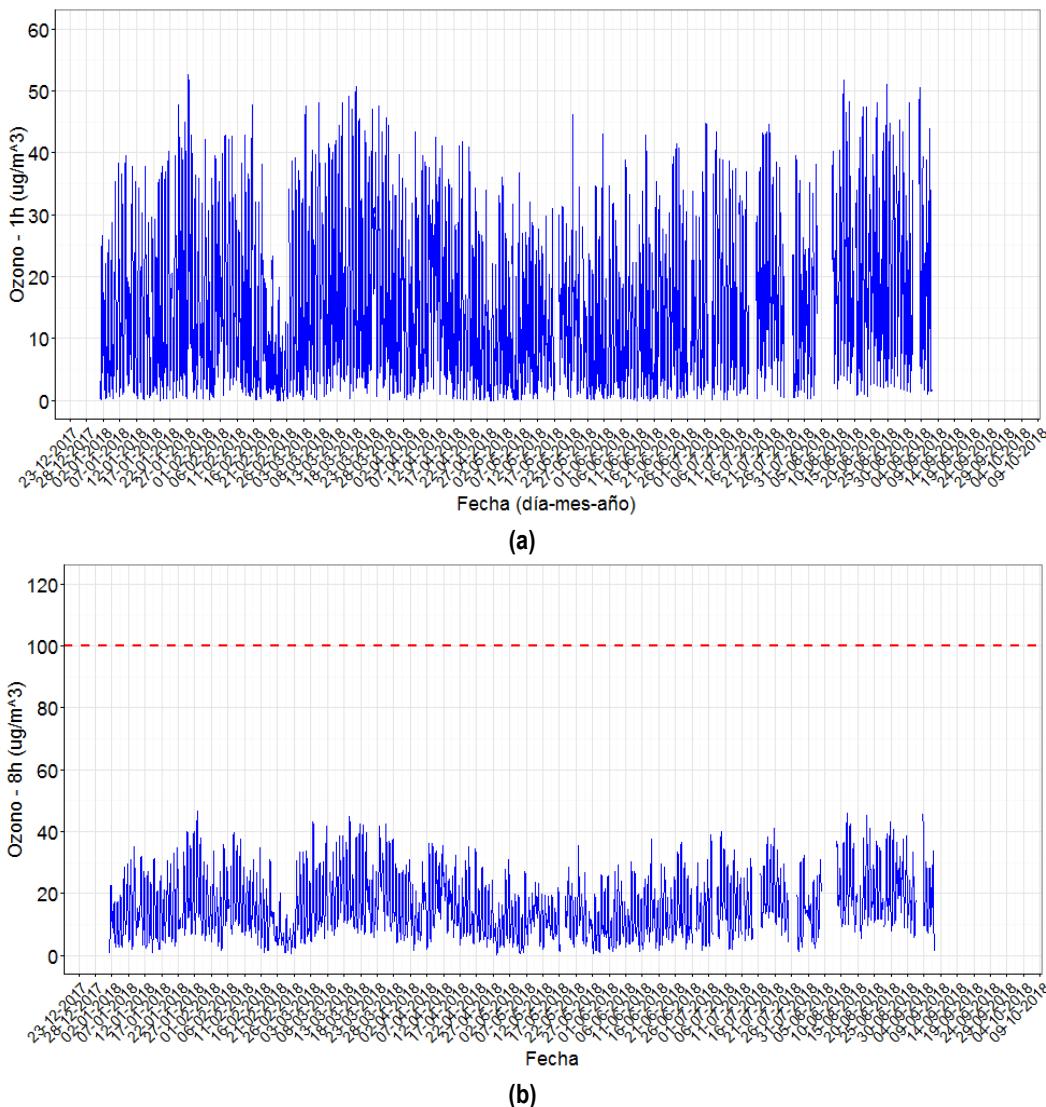


Figura 8. Variación de concentración de ozono troposférico entre enero y septiembre del 2018. a) Promedio horario. b) Promedio octohorario. La línea punteada roja representa el límite máximo permisible establecido en la Res. 2254 de 2017.

Un resumen de la variación promedio horaria, diaria y mensual presentada en la Figura 9 muestra que los picos máximos en las concentraciones de ozono ocurren al mediodía, alcanzando una concentración cercana a los $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De igual forma, el promedio mensual máximo ocurrió en los meses de agosto y marzo, que correspondieron a los meses de mayor radiación, con un promedio mensual de $344 \text{ W}/\text{m}^2$ y $270 \text{ W}/\text{m}^2$ respectivamente.

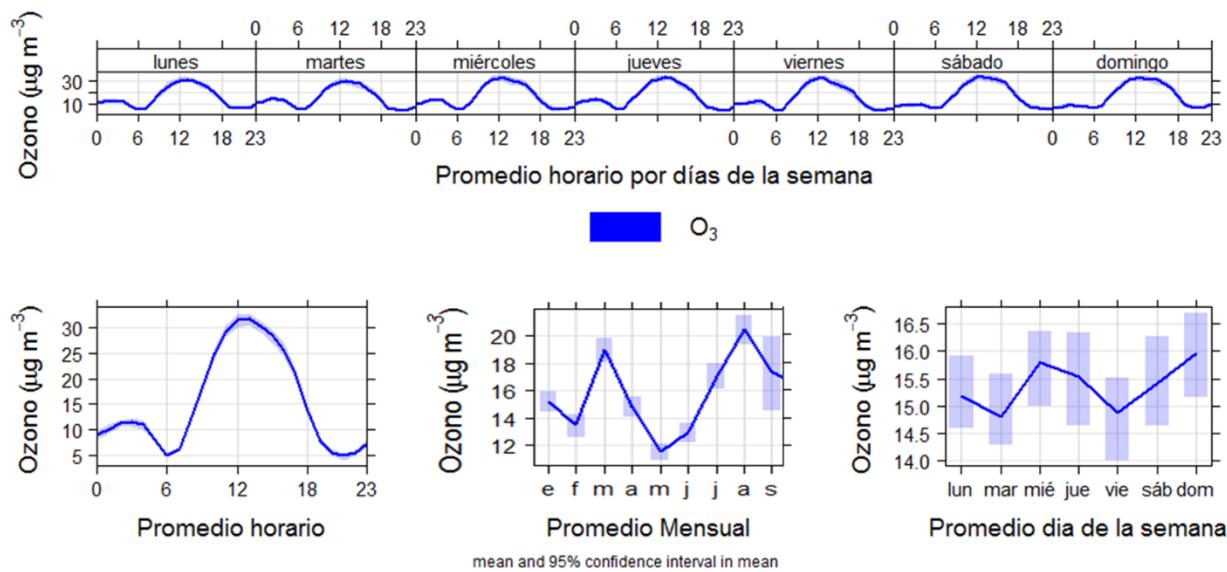


Figura 9. Variación promedio horario, diario y mensual de ozono troposférico entre enero y septiembre del 2018 (O_3) en la estación Gobernación.

MONITOREO DE MONÓXIDO DE CARBONO, CO

La Figura 10 muestra los resultados del monitoreo de CO durante enero a septiembre del año 2018. Se muestran los registros de concentración de CO horario (Figura 10a) y octohorario (Figura 10b). El monitoreo de CO comenzó el día 07 de julio de 2018 en la estación GOB. Se resalta que la concentración de CO, tanto horaria como octohoraria, no ha superado el límite promedio máximo establecido en la Resolución 2254 de 2017 ($5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedio horario y $35000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedio de 8 horas).

La variación promedio horaria, diaria y mensual presentada en la Figura 11 muestra que los picos máximos en las concentraciones del CO ocurren en las horas pico de tráfico vehicular al inicio y fin del horario laboral (alrededor de las 7am y las 6pm). También se destaca que los días de la semana que presentan mayor concentración corresponden a los días viernes con una concentración media alrededor de $850 \mu\text{g}/\text{m}^3$, así como los fines de semana (sábado y domingo) se presentan las menores concentraciones. Se espera que a medida que se recopile una mayor cantidad de información, se pueda realizar un análisis más profundo del comportamiento de este contaminante, teniendo en cuenta que el monitoreo comenzó apenas el día 07 de julio del 2018.

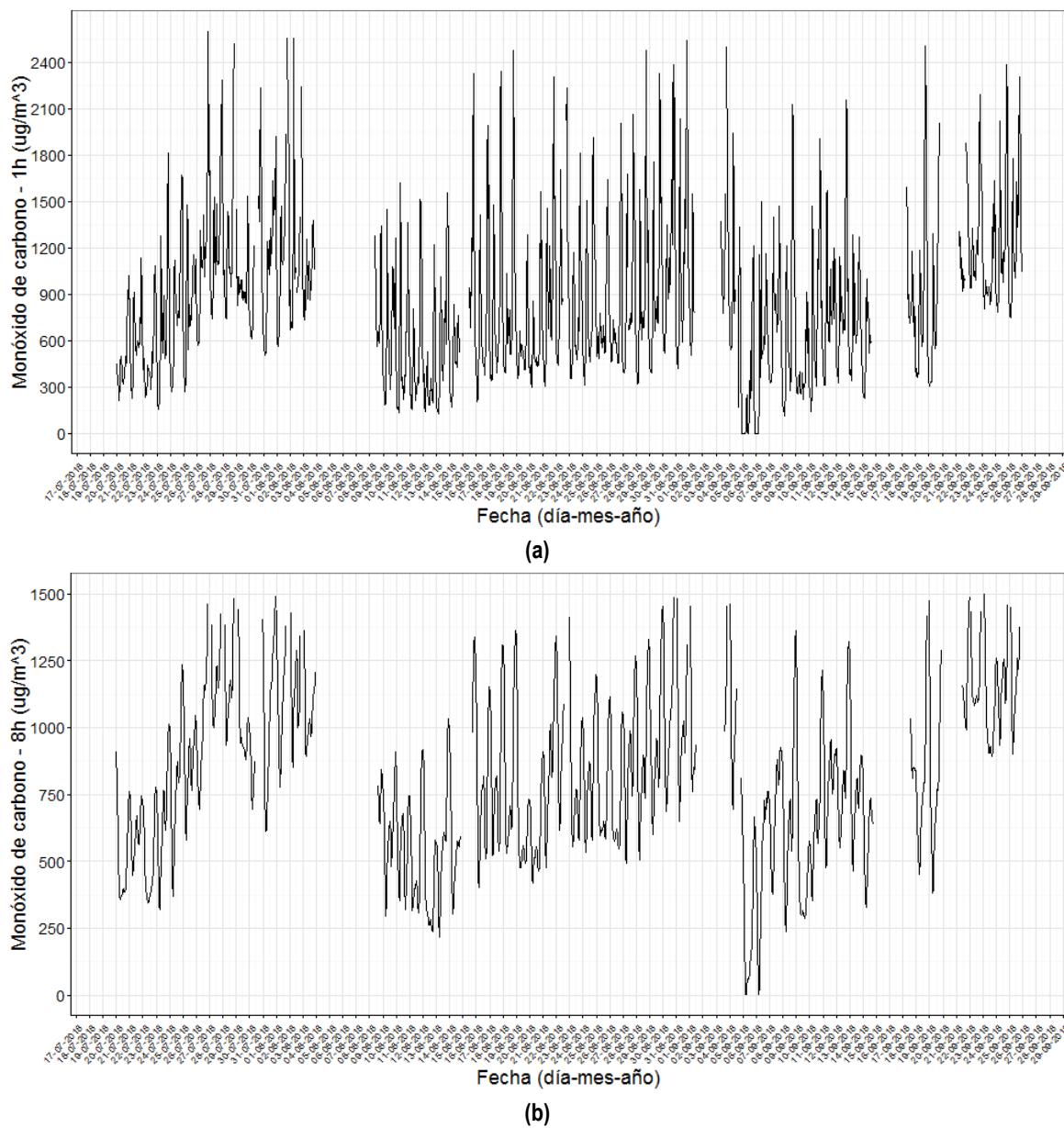


Figura 10. Variación de concentración de monóxido de carbono obtenida durante el año 2018 en la estación GOB.
 a) Promedio horario. b) Promedio octohorario.

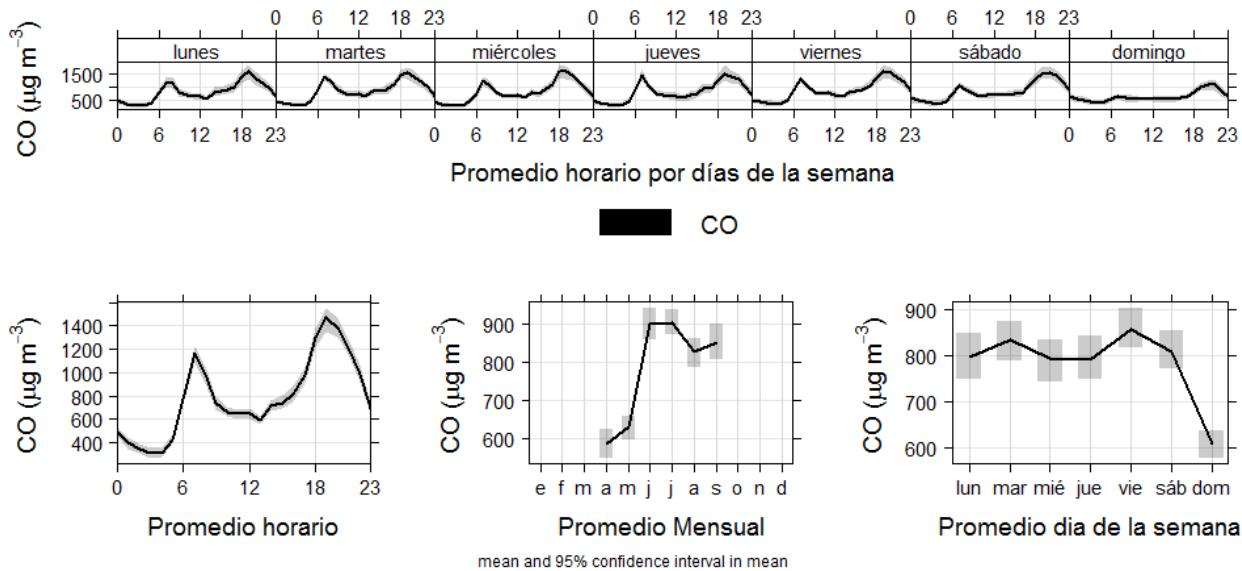


Figura 11. Variación promedio horaria, diaria y mensual de monóxido de carbono (CO) en la estación Gobernación entre septiembre y mayo del 2018.

6. CONCLUSIONES

- En ninguna de las estaciones de PM₁₀ en Manizales se superaron las normas diarias (100 µg/m³) y anual (50 µg/m³) definidas en la normativa colombiana para este contaminante. Asimismo, todas las estaciones fueron clasificadas con buena calidad de aire, según Índice de Calidad del Aire ICA. De otra parte, la única estación de PM_{2.5} (Gobernación) en Manizales, no superó las normas diarias (50 µg/m³) y anual (25 µg/m³) definidas en la normativa colombiana para este contaminante.
- La concentración de material particulado PM₁₀ en el aire está fuertemente influenciada por el tráfico vehicular. Los registros de mayor concentración se obtuvieron en las estaciones Liceo y Milán. Un evento importante asociado a actividad volcánica se presentó durante los días 4 y 17 de septiembre en los cuales se tuvo episodios de emisión de ceniza del volcán Nevado del Ruiz. Dicho comportamiento estuvo relacionado con los valores de concentración de los días 18 y 21 de septiembre en todas las estaciones del SVCA, confirmando la influencia de periodos de alta actividad volcánica con emisión de ceniza en el incremento de concentraciones de material particulado en la ciudad.
- Las concentraciones de ozono troposférico en la estación Gobernación para el periodo enero – septiembre de 2018 se encuentran dentro de los límites permitidos por la normatividad vigente, se identifica la influencia directa de la radiación en el perfil diario de generación de dicho contaminante.
- Las concentraciones de monóxido de carbono en la estación Gobernación para el periodo enero - septiembre de 2018 se encuentran dentro de los límites permitidos por la normatividad vigente. Este contaminante registra un perfil diurno asociado a mayores concentraciones en periodos del día de alta actividad vehicular y una atmósfera más estable (alrededor de las 7am y 6pm).
- Se identifica mayor concentración de material particulado y monóxido de carbono en días entre semana y una disminución importante durante los fines de semana (sábado y domingo), en todas las estaciones de la ciudad, lo que ratifica la influencia del tráfico vehicular en la dinámica los contaminantes atmosféricos en Manizales.

7. REFERENCIAS

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.