



SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO AMBIENTAL DE CALDAS



BOLETÍN CALIDAD DEL AIRE MANIZALES PERÍODO ENERO - JUNIO DE 2020

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

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

****Subdirección de Evaluación y
Seguimiento Ambiental CORPOCALDAS**

RESUMEN

Se presentan en este informe los resultados del monitoreo de contaminantes atmosféricos realizado en Manizales durante el período de enero a junio de 2020. En el mismo sentido, se presentan los análisis comparativos para los datos registrados durante las diferentes dinámicas de movilidad asociadas a confinamiento por COVID-19. Se realizó el seguimiento de material particulado (PM_{10} , $PM_{2.5}$) y los gases ozono troposférico (O_3), dióxido de azufre y monóxido de carbono (CO). Se muestran las gráficas resumen obtenidas y tablas de estadísticos (promedio, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo y percentil 95). Asimismo, se muestran los resultados obtenidos para los índices de calidad del aire y otros análisis complementarios como registros de calidad del aire por imágenes satelitales de emisiones volcánicas y algunos contaminantes.

TABLA DE CONTENIDO

1. EL SISTEMA DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE EN MANIZALES (SVCA). 2	
2. ANÁLISIS METEOROLÓGICO 5	
3. RESULTADOS MONITOREO DE MATERIAL PARTICULADO: PM₁₀ Y PM_{2.5} 9	
3.1. Equipos manuales: análisis de promedios diarios durante el año 20209	
3.2. Equipos manuales: Análisis de promedios durante el año 2020 y comparación preliminar con norma anual 13	
3.3. Equipos automáticos: Análisis de promedios diarios durante el año 2020 y comparación de eventos relacionados a días de confinamiento por pandemia del covid-19 16	
3.4. Índice de calidad del aire (ICA) para PM ₁₀ y PM _{2.5} en el SVCA de Manizales 22	
4. RESULTADOS MONITOREO DE GASES.....25	
4.1. Monitoreo de monóxido de carbono (CO) 25	
4.2. Monitoreo de dióxido de azufre (SO ₂) 28	
4.3. Monitoreo de ozono troposférico (O ₃) 31	
4.4. Índices de calidad del aire (ICA) para CO, SO ₂ y O ₃ 36	
5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS37	
5.1. Emisiones volcánicas 37	
5.2. Imágenes satelitales 38	
5.3. Incendio forestales..... 44	
5.4. Relación entre contaminantes, ejemplo estación Gobernación..... 44	
6. REFERENCIAS45	

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

El crecimiento poblacional y las actividades industriales han incrementado considerablemente las emisiones de contaminantes y sus niveles en aire ambiente. Entre los contaminantes de interés por sus impactos en el recurso aire en zonas urbanas y ecosistemas naturales, se destacan el material particulado (PM), además de gases como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y ozono troposférico (O₃).

El seguimiento a los fenómenos de contaminación del aire en Manizales y la información entregada por el Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), es un sustento para tomar acciones que permitan controlar aquellas zonas donde se superen las normas de calidad del aire, además un insumo para establecer medidas de prevención donde la calidad del aire sea catalogada como perjudicial para la salud. Los datos obtenidos en la red de monitoreo de calidad del aire alimentan las bases de datos del CDIAC (Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas) y el subsistema del IDEAM: SISAIRE. El CDIAC, por medio de la página web <http://cdiac.manizales.unal.edu.co/indicadores/public/searchAirMenu>, 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 dos (2) equipos automáticos (nefelómetros) que miden simultáneamente PM₁₀ y PM_{2.5} y una (1) estación automática para el monitoreo de los gases O₃, SO₂ y CO; además se cuenta con cinco (5) equipos manuales de PM₁₀ y uno (1) de PM_{2.5}. Los equipos automáticos se encuentran actualmente en funcionamiento, mientras que los equipos manuales se encuentran en retorno paulatino de operación debido al confinamiento y las restricciones de movilidad. 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. Los equipos automáticos de (PM₁₀ y PM_{2.5}) y el seguimiento de gases (O₃, SO₂ y CO) permiten la obtención de registros cinco minútales, a partir de los cuales se obtienen registros promedio horario (media aritmética) y registros promedio octohorario (media móvil a partir de registros horarios). Todos los registros obtenidos de partículas y gases en aire ambiente son útiles para comparar los límites máximos permisibles definidos en la normativa colombiana: Resolución 2254 de 2017 (MADS, 2017).

Se han presentado cambios en las dinámicas de la ciudad provocados por la pandemia del COVID-19. Durante el año 2020 se presentó una normalidad económica hasta el viernes 20 de marzo, día en que se decretó una orden de cuarentena obligatoria en la ciudad, en donde se restringió la libre movilidad de los ciudadanos durante todo el día con algunas excepciones contempladas, como la circulación de algunos vehículos de carga, un porcentaje del transporte público y vehículos particulares que aplicaron a personal de salud, distribución de bienes básicos, prestación de servicios básicos, entre otros.

A partir del 27 de abril se dio paso a la primera reapertura económica de la ciudad donde se flexibilizaron las medidas de confinamiento y se aplicaron medidas como el pico y cédula para ciudadanos. Esta medida fue nuevamente flexibilizada a partir del 11 de mayo, donde se hace una segunda reapertura a más sectores económicos, generando un aumento paulatino en el flujo de ciudadanos y medios de transporte motorizados en las vías de la ciudad. A partir del 01 de junio se dio paso a una nueva etapa de cuarentena, llamada aislamiento inteligente, en donde se dio reapertura a la mayoría de las actividades económicas y hubo una mayor flexibilización en la movilidad. Sin embargo, hay que destacar que medidas como el pico y cédula ha seguido vigente.

Finalmente, se destaca que durante el mes de abril en casi toda la zona centro de la ciudad, aproximadamente entre las calles 19 a 24 y carreras 23 a 22, se presentó además un acceso restringido en estas vías y por ende existió una ausencia casi total de los medios de transporte motorizados como vehículos particulares, camiones y buses del transporte público. Esta medida afecta directamente el perímetro de la estación Gobernación, ubicada en la esquina de la carrera 21 con calle 23. Esta restricción sería paulatinamente flexibilizada pero no eliminada en su totalidad para el segundo período de reapertura económica.

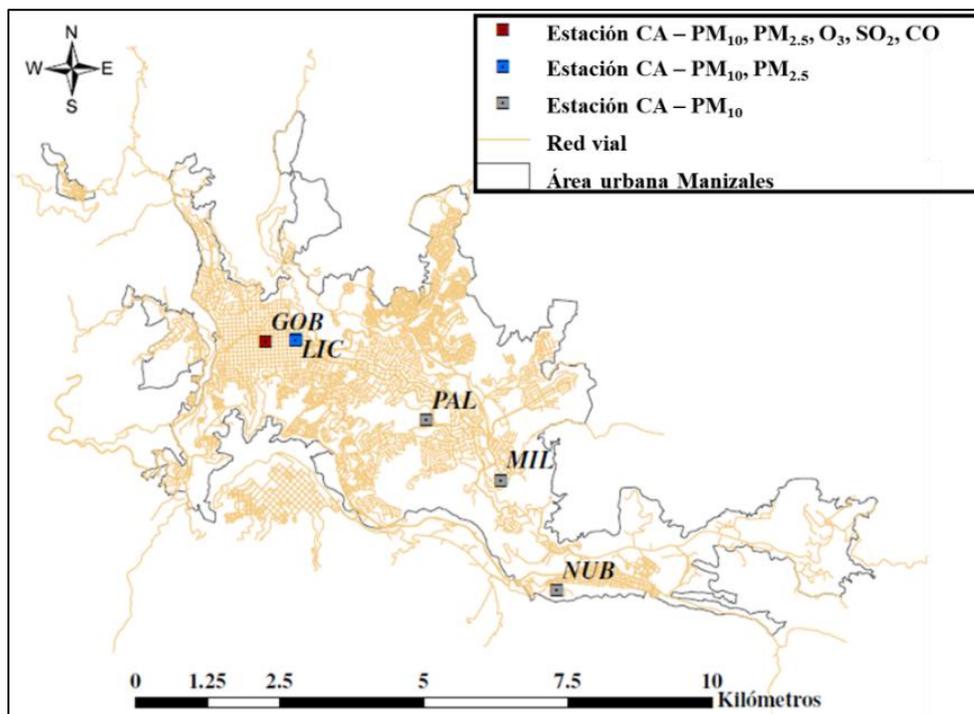


Figura 1. Mapa de Manizales con ubicación de las estaciones de calidad del aire.

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

Estación	Características y fuentes de contaminantes*	Equipos	Propietario	Año Instalación	Año de óptima operación – histórico	Estado actual	Latitud / Longitud	Altitud msnm
Gobernación	CU, SC – MTV, PAI	PM ₁₀ – Manual ^a	Corpocaldas	2009	2009	Retoma actividades desde el 19 de mayo.	N 5° 4' 6.53" W 75° 31' 1.54"	2155
		PM _{2.5} - Manual ^a	Corpocaldas	2009	2009	Retoma actividades desde el 19 de mayo.		
		SO ₂ - Automático	UN	2014	Desde el 2019 – problemas de estabilización previos.	Operación óptima		
		O ₃ - Automático	UN	2014	Salió de operación durante los años 2016-2017 por fallas.	Operación óptima.		
		CO - Automático	Corpocaldas	2014	2018 – Múltiples fallas durante sus primeros años.	Operación óptima.		
		PM ₁₀ y PM _{2.5} - Automático ^b	Corpocaldas	2019	2019	Operación óptima.		
Palogrande	ZC, SR – ATV, SAI	PM ₁₀ - Manual ^c	UN	2009	2009	Detenido desde el 13 de marzo tras cuarentena	N 5° 3' 22.4" W 75° 29' 31.3"	2154
Nubia	ZSE, SR – BTV, AZI	PM ₁₀ - Manual ^c	UN	2009	2017 – En la red.	Detenido desde el 13 de marzo tras cuarentena	N 5° 1' 47.0" W 75° 28' 18"	2091
Liceo	CU, SC – ATV, PAI	PM ₁₀ - Manual ^c	Corpocaldas	2000	2010 – En la red.	Retoma actividades desde el 20 de mayo.	N 5° 4' 5.01" W 75° 30' 37.58"	2156
		PM ₁₀ y PM _{2.5} - Automático ^b	Corpocaldas	2019	2019	Operación óptima.		
Milán	ZC, SR – MAI, MTV	PM ₁₀ - Manual ^c	Corpocaldas	2012	2012	Retoma actividades desde el 20 de mayo.	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 junio del año 2020, así como los promedios consolidados para el primer semestre de los años 2019 y 2020, con el fin de realizar un análisis comparativo con el año anterior. Esta estación es elegida como punto de referencia debido a que es una estación que ha presentado registros estables durante el periodo de análisis, además por su ubicación en el centro geográfico de Manizales y una altura de más de 10m (sobre la terraza del edificio del Hospital de Caldas). Estas características permiten considerarla como una estación de tipo mesoescala representativa para la mayoría de las variables meteorológicas. No obstante, se aclara que todas las concentraciones estimadas para las estaciones de calidad del aire de la red se calculan con base en los datos de las estaciones meteorológicas más cercanas.

Durante el primer semestre del 2020 se observa de enero a abril el incremento mensual en los niveles de precipitación y posteriormente una disminución en los meses de mayo y junio, indicando el período de bajas lluvias, un comportamiento característico del régimen bimodal de lluvias de la ciudad. Para todo el semestre fue registrada una precipitación acumulada de 614 mm. Para el caso de la temperatura del aire se registró el mayor promedio en el mes de febrero con un valor de 19.1 °C, mientras que la radiación solar presentó un mayor promedio en el mes enero con un valor de 364.9 W/m².

Por su parte la humedad relativa se relaciona de forma directa con las precipitaciones y de manera inversa con la temperatura y radiación solar, obteniendo por lo tanto la mayor humedad relativa en el mes de abril con un valor de 84.7 %, mes en el cual se obtuvo la mayor precipitación acumulada promedio y una de las menores temperaturas promedio. Al comparar el primer semestre del año 2020 con el mismo período del 2019, se presentó un incremento de 0.7 °C en la temperatura del aire, un aumento de 105.1 W/m² (144%) y una reducción de 527.2 mm (142%) de la precipitación acumulada.

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

Las condiciones climáticas juegan un papel importante en la dinámica de los contaminantes en el aire. Existen contaminantes secundarios como el ozono troposférico (O₃) que dependen de las reacciones en presencia de radiación solar para formarse en el aire, a partir de contaminantes primarios (COV y NO_x) emitidos directamente por fuentes antropogénicas y naturales. La humedad en el aire y la lluvia también tienen una influencia, especialmente en las concentraciones de material particulado.

El aumento de la humedad relativa se asocia al aumento en la humedad de las partículas, y por lo tanto, 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 influye en la concentración de contaminantes de forma inversa, puesto que a mayor velocidad del viento la dispersión de los contaminantes en dirección horizontal será mayor y su concentración en la atmósfera disminuirá.

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

Período (Año)	Temperatura del Aire (°C)	Velocidad de Viento (m/s)	Dirección Viento (°)	Presión Atmosférica (mm Hg)	Humedad Relativa (%)	Precipitación Acumulada (mm)	Radiación Solar** (W/m ²)	Max Radiación Solar (W/m ²)
Ene. (2020)	18.8	1.4	156.1	594.7	77.0	61.8	364.9	1164
Feb. (2020)	19.1	1.3	146.1	594.4	77.6	86.2	328.5	1202
Mar. (2020)	18.7	1.4	164.7	595.4	79.7	144.0	334.5	985
Abr. (2020)	18.2	1.1	138.0	595.8	84.7	151.0	258.7	1392
May. (2020)	18.7	1.1	127.4	595.2	83.4	77.6	259.2	1223
Jun. (2020)	17.8	0.9	152.9	595.9	84.1	94.2	250.8	1199
Ene – Jun (2020) *	18.9	1.4	155.6	594.8	78.1	614.4	342.6	1117.0
Ene – Jun (2019) *	18.2	1.2	134.4	595.1	81.9	1141.6	237.5.6	1102.8

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

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

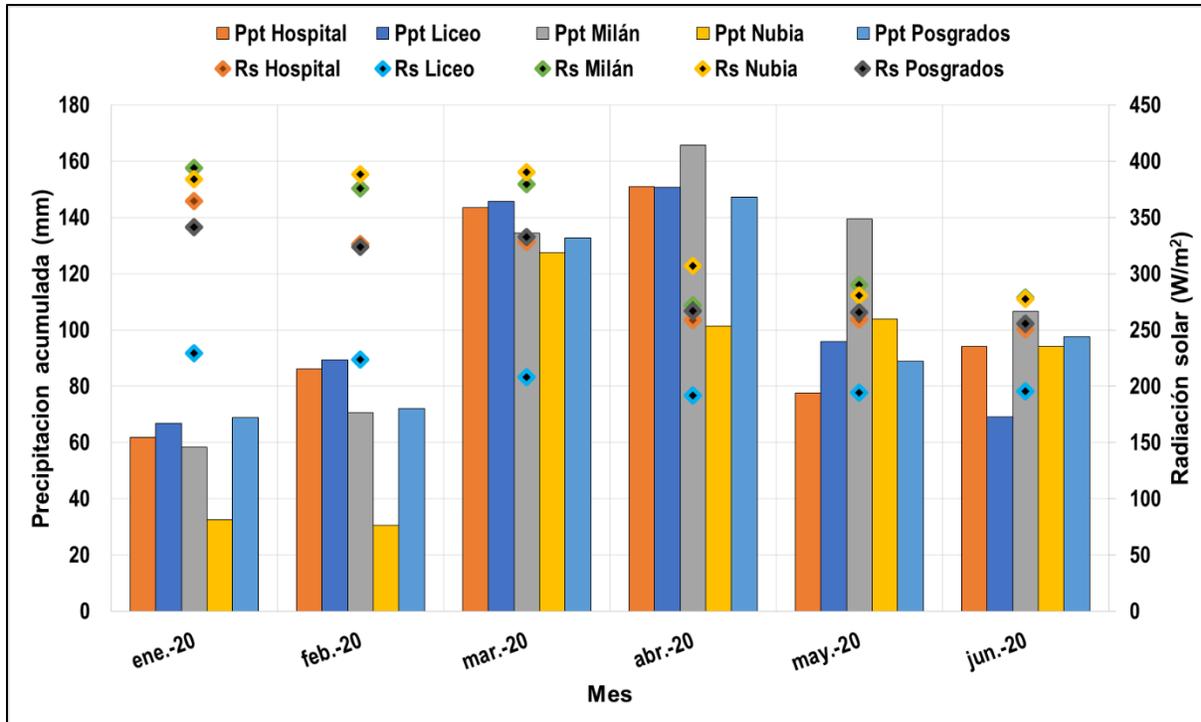


Figura 2. Promedios mensuales de precipitación y radiación solar en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante el año 2020.

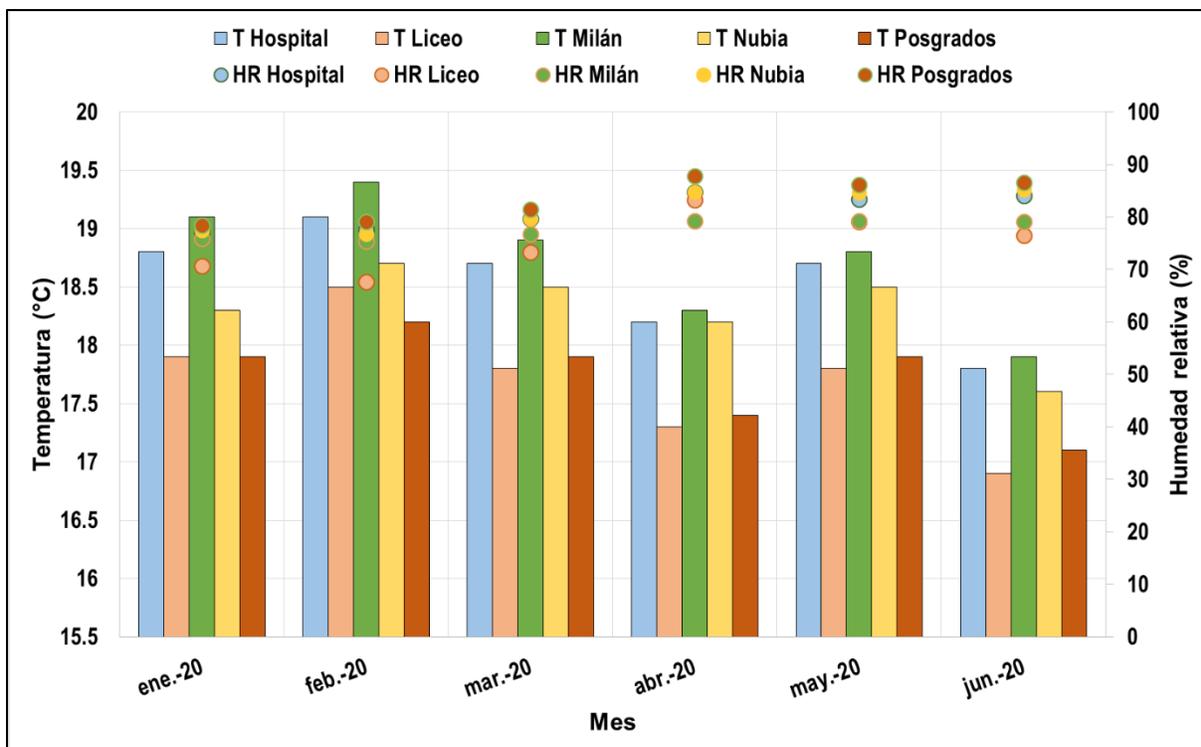


Figura 3. Promedios mensuales de temperatura del aire y humedad relativa en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante el año 2020.

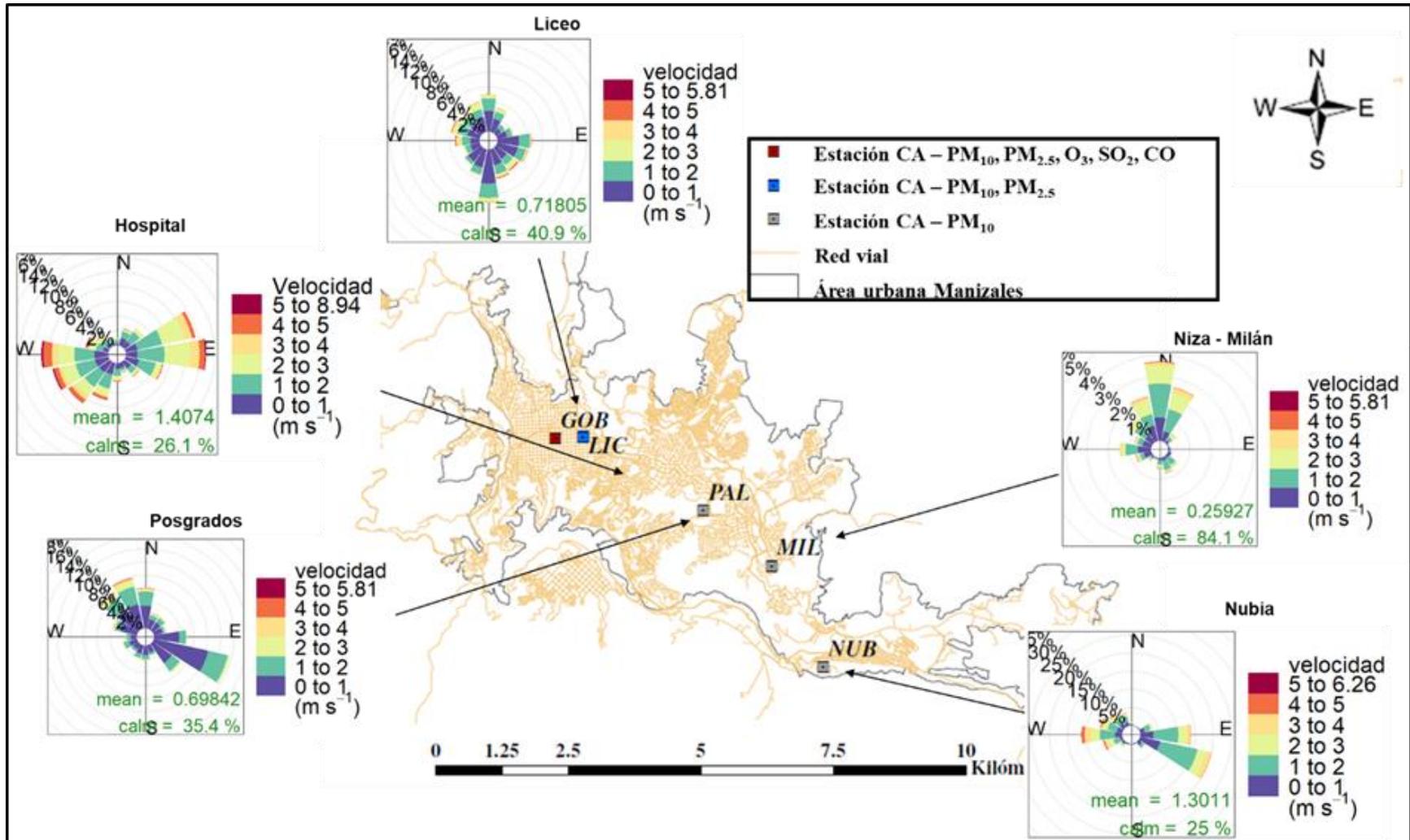


Figura 4. Ubicación de las estaciones meteorológicas más próximas a las estaciones de calidad del aire y sus respectivas rosas de vientos promedio diarias durante el año 2020.

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

3.1. EQUIPOS MANUALES: ANÁLISIS DE PROMEDIOS DIARIOS DURANTE EL AÑO 2020

En la Tabla 3 se presentan los estadísticos descriptivos para las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales obtenidas durante el período de análisis (enero - junio de 2020). Se muestra el promedio aritmético con su respectiva incertidumbre asociada, mediana, 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 (Carslaw y Ropkins, 2015). Los equipos de PM – Manuales operaron con normalidad desde el 01 de enero hasta el 18 de marzo (con excepción de los equipos semiautomáticos, los cuales operaron hasta el 25 de marzo); debido a las medidas de cuarentena se detuvo la medición de estos equipos hasta el 16 de mayo, para posteriormente retomar su funcionamiento paulatinamente; razón por la cual se presentarán algunos baches durante los resultados de este semestre.

Los resultados de la Tabla 3 muestran que, durante el período de análisis, las estaciones de Milán y Liceo registraron las concentraciones más altas de PM₁₀ en toda la ciudad, el mismo comportamiento que se ha observado para los años 2018 y 2019. En el año 2020 la estación Milán presentó los mayores niveles de concentración de PM₁₀ con promedios mensuales aritméticos entre 23 µg/m³ (desv. std = 10 µg/m³) en mayo y 42 ± 0.18 µg/m³ (desv. std = 7 µg/m³) en febrero; seguida por la estación Liceo con promedios mensuales aritméticos entre 17 µg/m³ (desv. std = 2 µg/m³) en mayo y 37 ± 0.01 µg/m³ (desv. std = 8 µg/m³) en febrero.

En el año 2019 los valores más altos de PM₁₀ también los presentaron las estaciones Milán y Liceo con promedios mensuales máximos de 35 µg/m³ (desv. std = 6 µg/m³) y 37 µg/m³ (desv. std = 9 µg/m³) respectivamente, ambos máximos obtenidos en el mes de marzo. Para el caso de la estación Milán, en todos los meses se registró un aumento en el año 2020 comparado con el año 2019, como excepción se tuvo el mes de mayo en donde hubo una disminución del 23%, valor posiblemente asociado a las restricciones de movilidad durante este mes.

La estación de Milán presentó para febrero de 2020 un aumento del 50% y 31% con respecto a los años 2018 y 2019 respectivamente, lo cual puede ser derivado de las obras de construcción en la empresa "Invermec" que pueden estar alterando los niveles de concentración, por lo que se hace necesario aclarar el tipo de estación considerándose ésta como "Industrial". Las demás estaciones presentaron también un ligero aumento durante el mes de febrero con respecto a los años 2018 y 2019, por lo tanto no se descarta además el posible efecto de un fenómeno a escala regional relacionado con los incendios forestales que ocurrieron en el mes de febrero en la Orinoquía Colombo-Venezolana, el Sumapaz y la zona caribe Colombiana, acrecentados por la temporada de bajas lluvias (86.2 mm), los cuales afectaron la calidad de aire en otras ciudades como Bogotá y Medellín durante los primeros meses del año 2020, ver sección 0.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio disponibles de PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales (µg/m³) durante el período enero y junio del año 2020.

Estadístico*	Año 2020					Año 2020					
	Ene.	Feb.	Mar.	May.	Jun.	Ene.	Feb.	Mar.	May.	Jun.	
Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar)						Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar)					
Promedio	21	26	29	19	21	16	18	21	12	13	
Mediana	20	25	28	18	20	15	17	22	11	12	
± Incertidumbre**	1.20	1.18	1.18	1.15	1.15	1.1	1.26	1.26	1.13	1.13	
Desviación Estándar	8	6	7	4	7	3	4	3	4	5	
Min. – Max.	12-41	19-37	19-42	14-26	12-35	11-21	12-26	18-25	7-16	6-20	
Percentil 95%	33	35	40	25	32	20	25	25	15	19	
N° Datos	10	8	9	6	8	10	10	6	5	8	
Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar)						Milán PM₁₀ (µg/m³ estándar)					
Promedio	24	37	36	17	28	32	42	38	23	38	
Mediana	25	37	35	17	30	34	40	38	23	38	
± Incertidumbre**	0.01	0.01	0.01	NA***	0.53	0.18	0.18	0.18	NA	0.53	
Desviación Estándar	3	8	7	2	12	7	7	7	10	6	
Min. – Max.	15-34	24-49	28-44	15-19	11-41	21-37	31-53	29-49	16-30	30-47	
Percentil 95%	33	48	43	19	40	37	51	47	29	46	
N° Datos	10	9	4	4	5	5	10	5	2	7	
Palogrande PM₁₀ (µg/m³ estándar)						Nubia PM₁₀ (µg/m³ estándar)					
Promedio	22	28	30	NA	NA	20	27	28	NA	NA	
Mediana	24	28	30	NA	NA	22	28	29	NA	NA	
± Incertidumbre**	0.02	0.16	NA	NA	NA	0.21	0.03		NA	NA	
Desviación Estándar	4	7	8	NA	NA	7	6	6	NA	NA	
Min. – Max.	16-29	18-39	19-41	NA	NA	9-30	17-37	20-35	NA	NA	
Percentil 95%	28	37	39	NA	NA	28	35	34	NA	NA	
N° Datos	9	10	5	NA	NA	9	9	5	NA	NA	

* 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.

*** No se obtienen datos debido a problemas de acceso por pandemia.

Por otro lado, teniendo en cuenta que estadísticamente la distribución de los datos no es normal, en la Tabla 3 se presentan además los estadísticos descriptivos comparativos basados en la mediana de los datos. De este análisis se identificó que los datos presentan un sesgo estadístico hacia la derecha, en donde hay datos de concentración altos que alteran el valor del promedio. No obstante, en todas las estaciones tanto para PM_{10} como $PM_{2.5}$ se observa que las concentraciones medianas estuvieron cercanas a las concentraciones promedio, variando en la mayoría de los casos solo de 1 a 2 $\mu g/m^3$.

Históricamente el SVCA de Manizales ha registrado valores más altos de contaminación en la estación Liceo (Corpocaldas y Unal, 2019), valores 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 PM_{10} . Sin embargo, para el primer semestre del año 2020 se han presentado los mayores niveles de contaminación en la estación Milán. Lo anterior puede ser ocasionado por la influencia de la actividad industrial y el tráfico vehicular presentado en este sector, principalmente por la Avenida Kevin Ángel, caracterizada 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 solo al 3.2% del total de vehículos de la ciudad, estos tipo de vehículos emplean diésel como combustible, cuyo aporte a las emisiones de PM_{10} corresponde a cerca de 503 ton/año del total de las emisiones (Corpocaldas y Unal, 2019).

En las estaciones de PM_{10} Gobernación, La Nubia y Palogrande, para el año 2020 se observó que en general registraron menores concentraciones durante el período evaluado. La estación Gobernación presentó promedios mensuales aritméticos entre $19 \pm 1.15 \mu g/m^3$ (desv. std = $4 \mu g/m^3$) en mayo y $29 \pm 1.18 \mu g/m^3$ (desv. std = $7 \mu g/m^3$) en marzo. Por su parte, la estación La Nubia presentó promedios mensuales aritméticos entre $20 \pm 0.21 \mu g/m^3$ (desv. std = $7 \mu g/m^3$) en enero y $28 \mu g/m^3$ (desv. std = $6 \mu g/m^3$) en marzo. Asimismo, la estación Palogrande presentó promedios mensuales aritméticos entre $22 \pm 0.02 \mu g/m^3$ (desv. std = $4 \mu g/m^3$) en enero y $30 \pm 1.18 \mu g/m^3$ (desv. std = $8 \mu g/m^3$) en marzo.

La estación Nubia fue la que registró los mínimos de concentración en toda la red con valores de $11 \mu g/m^3$ y $9 \mu g/m^3$ para los días jueves 02 de enero y domingo 26 de enero. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que estos datos no contemplan las concentraciones obtenidas durante las épocas de cuarentena obligatoria, en donde los equipos manuales no fueron operados. El primer día (02 de enero) se registraron concentraciones bajas en todas las estaciones con $12 \mu g/m^3$ en Gobernación y $20 \mu g/m^3$ en Liceo, valores posiblemente asociados a los eventos de lluvia del 31 de diciembre del 2019, donde la atmósfera es lavada y las partículas suspendidas en el aire son llevadas a tierra con el agua, este fenómeno es conocido como *Scavenging*, además, el día 01 de enero es festivo, por lo tanto, el flujo vehicular es bajo lo que genera al día siguiente baja carga de contaminantes. El segundo día (26 de enero) también se registraron bajas concentraciones en las demás estaciones con valores de $15 \mu g/m^3$ en Liceo y $11 \mu g/m^3$ en Palogrande, valores posiblemente relacionados a que esa fecha corresponde a un domingo, en donde las concentraciones disminuyen producto del bajo flujo vehicular.

En lo referente al monitoreo de $PM_{2.5}$, registraron promedios mensuales aritméticos entre $13 \pm 1.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en junio y $21 \mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 1.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en marzo. Asimismo, se registraron promedios diarios mínimos en los meses de mayo y junio con valores de $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, lo cual está posiblemente asociado a las medidas de restricciones que han ocurrido durante estos meses. De otra parte, se obtuvo un promedio diario máximo durante el mes de mayo con un valor de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el día 08 de mayo, día en el cual se obtuvo la más alta concentración en la estación Gobernación PM_{10} con un valor de $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$, razón por la cual no se descarta la posible influencia por aumento del tráfico vehicular para esta estación, en especial de vehículos pesados (buses y camiones) relacionados con emisiones de estos contaminantes.

Se observó que los valores promedio de $PM_{2.5}$ para enero, febrero y marzo de 2020, meses en los que no hubo restricciones, se encuentran por encima de los valores promedio para los mismos meses del año 2019; al realizar la misma comparación para mayo y junio, meses en los que hubo restricciones, los valores estuvieron por debajo del año 2019. Lo anterior está posiblemente asociado a los incendios forestales presentados durante el primer trimestre y a las restricciones de movilidad de los vehículos durante el segundo trimestre.

Se presentan las figuras de evolución temporal de concentraciones diarias para PM_{10} (Figura 5) y $PM_{2.5}$ (Figura 6), destacando que en ninguna de las estaciones de monitoreo se superó el límite máximo diario para material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) establecido en la Resolución 2254 de 2017 (MADS, 2017).

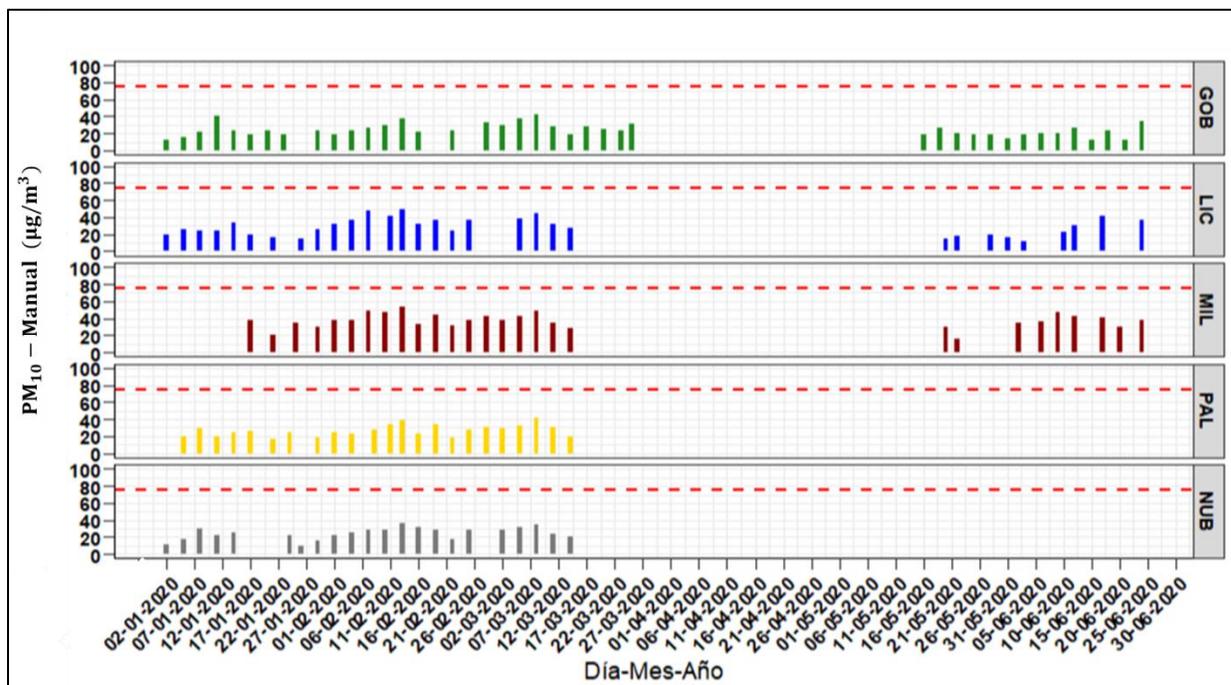


Figura 5. Evolución temporal de concentraciones de PM_{10} - Manual durante el año 2020. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM_{10} establecido en la Resolución 2254 de 2017 = $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

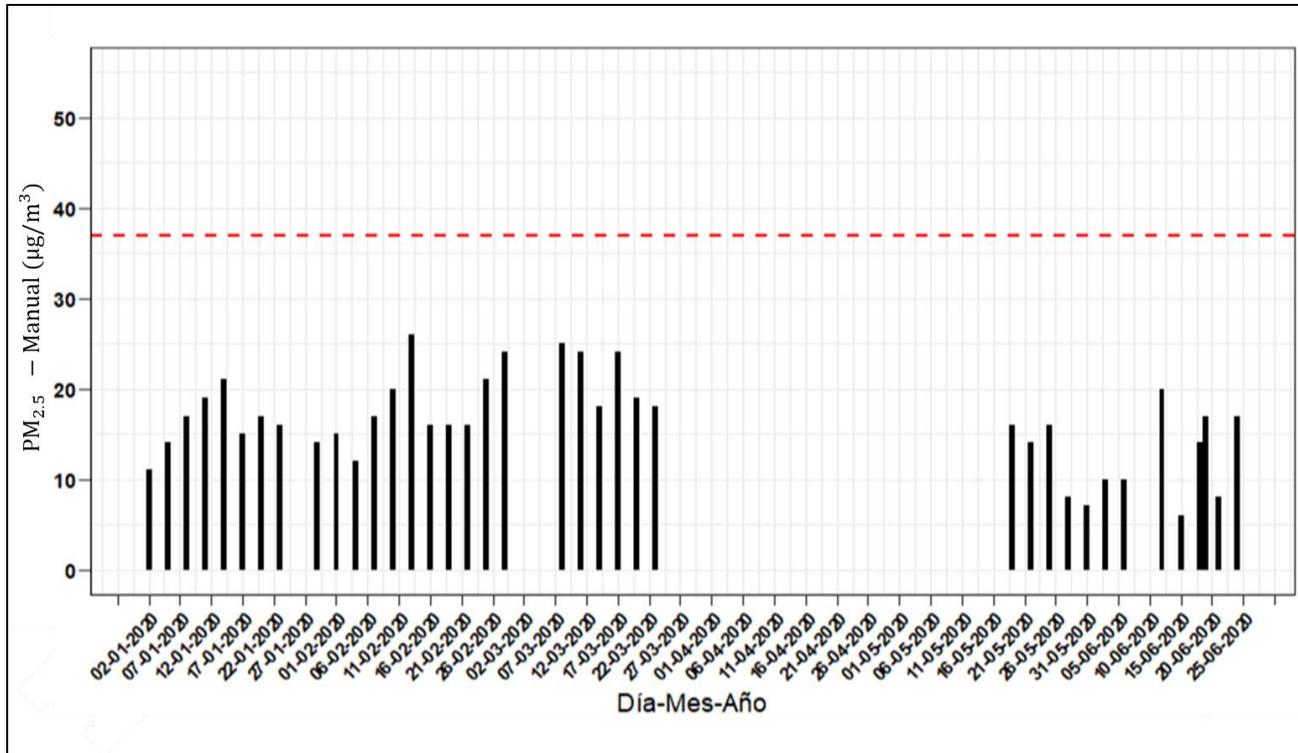


Figura 6. Evolución temporal de concentraciones de PM_{2.5} - Manual durante el año 2020. La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM_{2.5} establecido en la Resolución 2254 de 2017 = 37 µg/m³.

3.2. EQUIPOS MANUALES: ANÁLISIS DE PROMEDIOS DURANTE EL AÑO 2020 Y COMPARACIÓN PRELIMINAR CON NORMA ANUAL

Se realizó un ejercicio de comparación del promedio aritmético obtenido para las concentraciones de PM₁₀ (Figura 7) y PM_{2.5} (Figura 8) para el período de análisis (enero – junio de 2020). Lo anterior con el fin de analizar de forma preliminar las diferencias con respecto a los límites normativos anuales establecidos en la Resolución 2254 de 2017 para PM₁₀ (50 µg/m³) y PM_{2.5} (25 µg/m³). En ninguna de las estaciones se ha superado la norma anual colombiana. Sin embargo, es importante destacar que en el caso de PM₁₀, los promedios obtenidos en todas las estaciones superan la recomendación propuesta por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 20 µg/m³ 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 µg/m³.

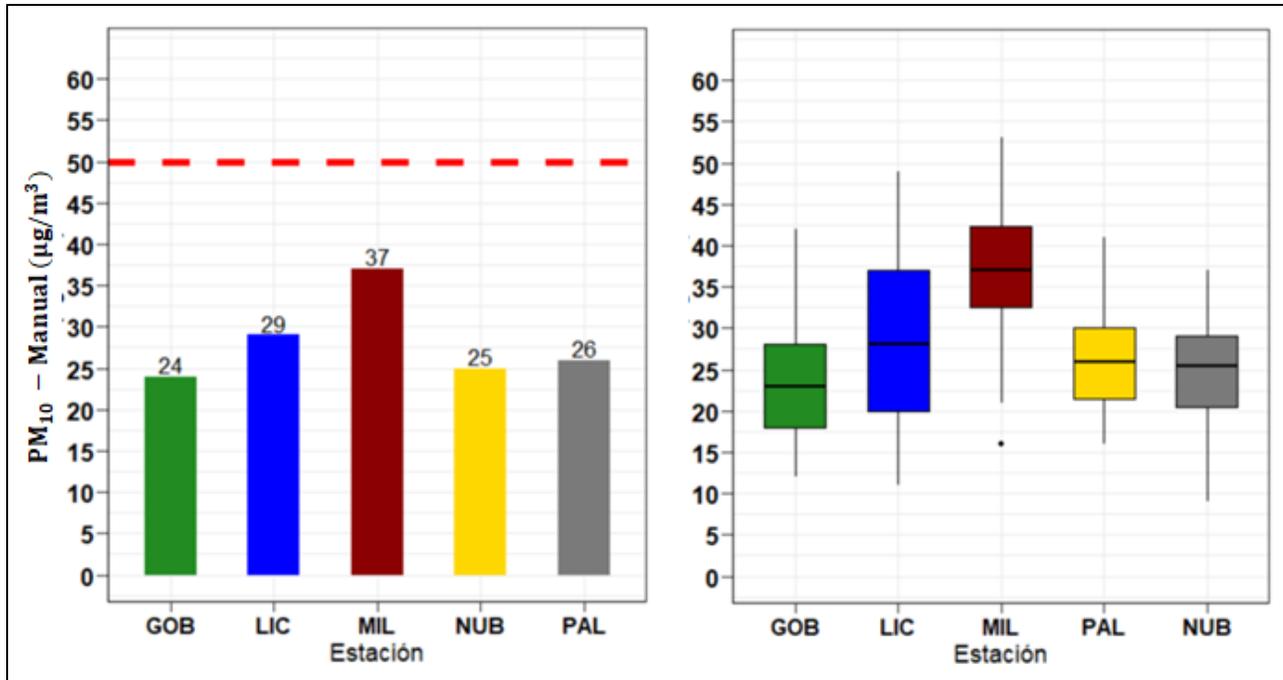


Figura 7. Diagrama de cajas (derecha) y concentración promedio de estaciones de PM₁₀ - Manual (izquierda) durante el año 2020. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS = 50 µg/m³.

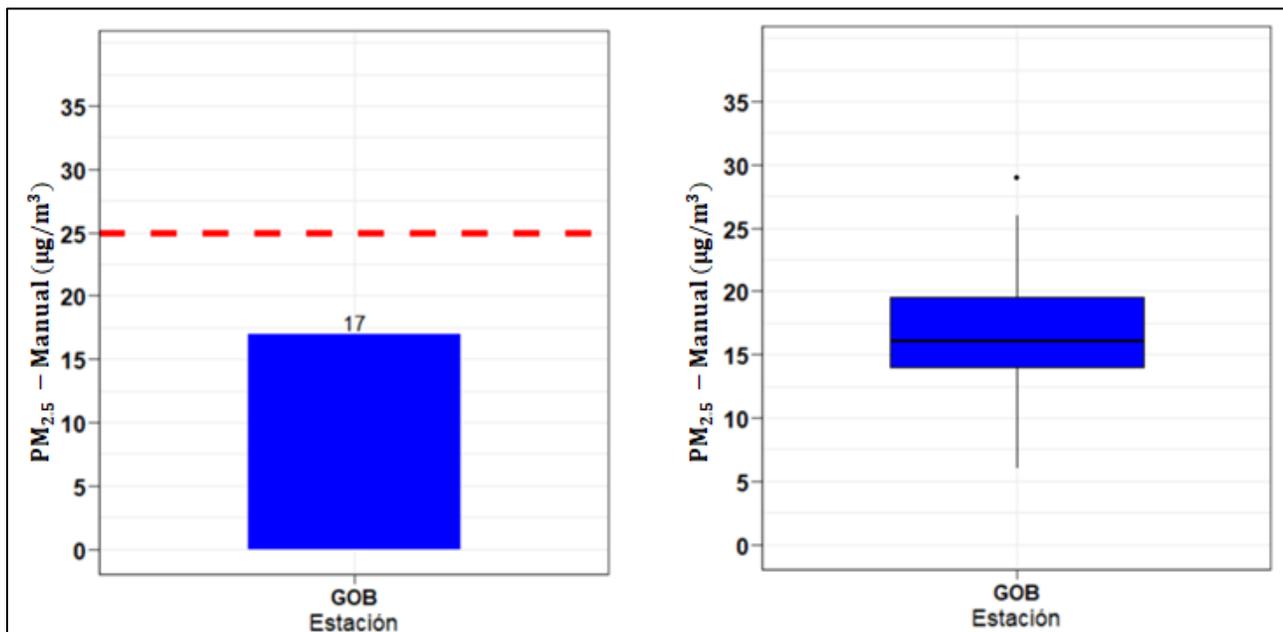


Figura 8. Diagrama de cajas (derecha) y concentración promedio de estaciones de PM_{2.5} - Manual (izquierda) durante el año 2020. La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS = 25 µg/m³.

En la Figura 9 se presenta la variación promedio de concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ por días de la semana en las estaciones de la ciudad. En ésta se observa que las menores concentraciones se obtienen los fines de semana (específicamente los días domingo) demostrando así la influencia de las emisiones por tráfico vehicular en las cercanías de las zonas de monitoreo. En las estaciones Liceo y Gobernación, los 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.

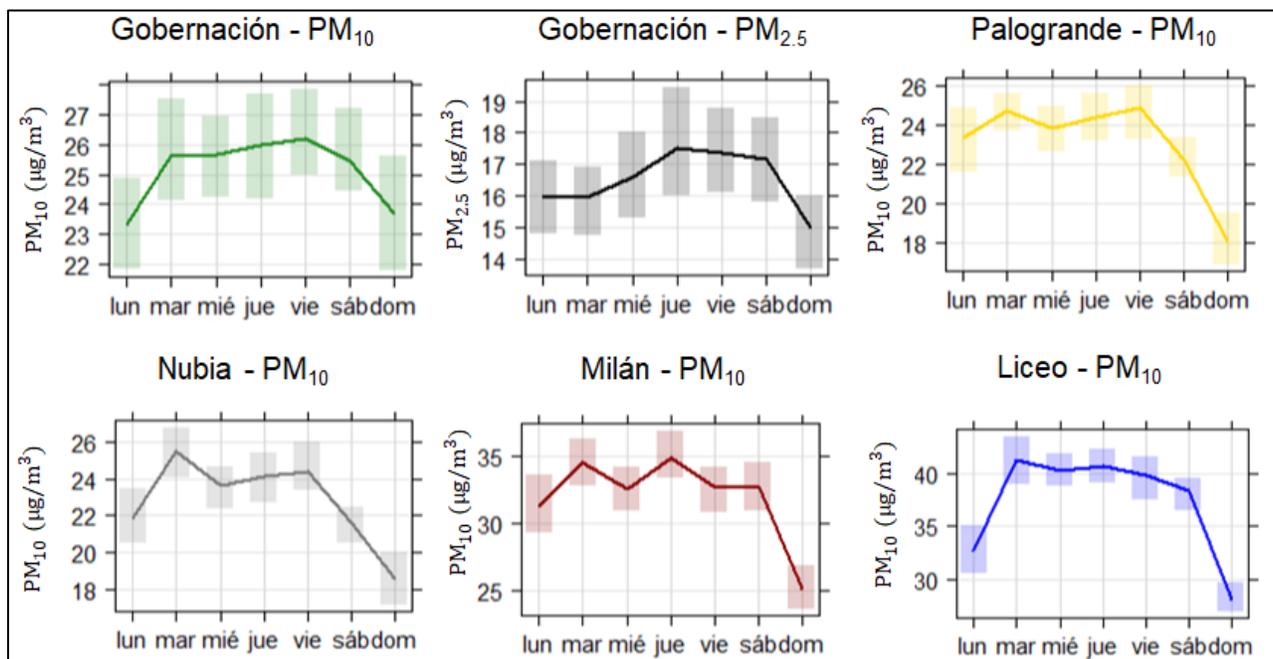


Figura 9. Variación por días de la semana de concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ - Manuales durante el año 2020. La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%.

3.3. EQUIPOS AUTOMÁTICOS: ANÁLISIS DE PROMEDIOS DIARIOS DURANTE EL AÑO 2020 Y COMPARACIÓN DE EVENTOS RELACIONADOS A DÍAS DE CONFINAMIENTO POR PANDEMIA DEL COVID-19

Para el análisis de los equipos automáticos se tuvieron en cuenta los diferentes cambios en las dinámicas de la ciudad provocados por la pandemia del COVID-19, por lo tanto el semestre fue dividido de la siguiente manera: normalidad Año 2020 (entre 01 de enero al 19 de marzo) en donde no hubo restricciones, primera etapa de la cuarentena obligatoria (20 de marzo al 26 de abril), segunda etapa de la cuarentena con reapertura de algunos sectores económicos (27 de abril al 10 de mayo), tercera etapa de la cuarentena con reapertura de nuevos sectores económicos (11 de mayo al 31 de mayo) y por último la cuarta etapa de la cuarentena, en donde se cambió a aislamiento inteligente (01 de junio al 30 de junio).

En la Tabla 4 y Tabla 5 se presentan los estadísticos descriptivos comparativos de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en ambas estaciones durante el período de análisis. Se observó que, durante periodos con normalidad en la movilidad, los promedios de Gobernación para PM_{10} y $PM_{2.5}$ se encuentran alrededor de los $27.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $15.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. De otra parte, los promedios de Liceo para PM_{10} y $PM_{2.5}$ se encuentran alrededor de los $30.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $17.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

En la estación Gobernación, durante la primera etapa de las medidas de restricción los promedios de concentración presentaron una reducción del 33% para PM_{10} y 23% para $PM_{2.5}$ respecto a la normalidad de movilidad. Durante esta cuarentena obligatoria, se registraron las menores concentraciones anuales de estos caminantes con promedios diarios de $4.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$. Para la segunda y tercera etapa, donde hubo reapertura de algunos sectores económicos, esta reducción de los promedios observados se mantuvo e incluso tuvo un efecto positivo en la calidad del aire de la ciudad, hasta obtener reducciones de concentración del 39% en PM_{10} y 35% para $PM_{2.5}$ comparados con los promedios de normalidad en movilidad.

En la tercera etapa, en la cual se dio paso a la cuarentena inteligente y hubo una reapertura de la mayoría de los sectores económicos, la reducción de los promedios observados también se mantuvo hasta obtener reducciones del 35% para PM_{10} y 38% para $PM_{2.5}$. Este fenómeno de reducción se atribuye a las medidas como el pico y cédula y al cierre de las vías cercanas a la estación de monitoreo, indicando el efecto de las fuentes móviles en ruta en los niveles de concentración de material particulado. Entre estas fuentes se destaca el aporte de los camiones de carga y vehículos de transporte público cuyo aporte a las emisiones de PM_{10} corresponde a cerca de 503 ton/año del total de las emisiones, de acuerdo con el último inventario de emisiones año base 2017 de la ciudad (Corpocaldas – Unal, 2019).

De otra parte, para el caso de la estación Liceo se presentó un comportamiento similar observándose una reducción entre el 13 y 28% para PM_{10} y 26 y 55% para $PM_{2.5}$ para las diferentes etapas de cuarentena en la ciudad. Se destaca que algunos de los ciudadanos han optado por medios autónomos de transporte, como la caminata y el uso de bicicletas públicas cuyo número de usuarios aumentó a 7431 para mayo del presente año, una alternativa ideal para evitar aglomeraciones y propagación del virus (Manizales campus universitario, 2020).

Por otro lado, teniendo en cuenta que estadísticamente la distribución de los datos no es normal, en la Tabla 4 y Tabla 4 se presentan además los estadísticos descriptivos comparativos basados en la mediana de los datos. De este análisis se identificó que los datos presentan un sesgo estadístico hacia la derecha, en donde hay datos de concentración altos que alteran el valor del promedio. No obstante, para PM₁₀ en la estación Gobernación se observa que las concentraciones promedio medianas durante la normalidad de movilidad, se encuentran alrededor de los 26.8 µg/m³. Al comparar con las etapas de la cuarentena, se observó que al igual que con las concentraciones promedio, se presenta una disminución en todas las etapas con valores del 41, 33, 40 y 46 % para la primera, segunda, tercera y cuarta etapa respectivamente. Pese al sesgo estadístico, se destaca que los porcentajes de disminución obtenidos a partir de la mediana estuvieron cercanos a los obtenidos con la media estadística.

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

Estadísticos*	Normalidad Año 2020 (01 de enero al 19 de marzo)	Primera etapa: Cuarentena obligatoria (20 de marzo al 26 de abril)		Segunda etapa: Cuarentena con reapertura de algunos sectores económicos (27 de abril al 10 de mayo)		Tercera etapa: Cuarentena con reapertura de nuevos sectores económicos (11 de mayo al 31 de mayo)		Cuarta etapa: Cuarentena inteligente (01 de junio al 30 de junio)	
GOBERNACIÓN									
Promedio	27.5	18.3	↓ 33%	19.0	↓ 30%	16.9	↓ 39%	17.9	↓ 35%
Mediana	26.8	15.7	↓ 41%	17.9	↓ 33%	15.9	↓ 40%	14.4	↓ 46%
Desv. Est.	8.5	10.8		2.9		3.1		9.4	
Min.	10.2	4.5		15.3		11.5		9.6	
Max.	47.3	43.2		23.8		22.6		43.3	
Percentil 95	42.7	40.3		23.1		21.8		40.1	
N° de días	78	36		14		21		26	
LICEO									
Promedio	30.3	25.1	↓ 17%	26.2	↓ 13%	22.5	↓ 26%	21.8	↓ 28%
Mediana	29.7	20.7	↓ 30%	25.1	↓ 15%	21.5	↓ 27%	18.8	↓ 36%
Desv. Est.	9.1	15.7		3.2		3.9		11.5	
Min.	10.0	6.8		21.9		14.3		9.9	
Max.	49.6	61.9		31.1		29.8		63.0	
Percentil 95	46.1	56.7		30.7		27.8		46.1	
N° de días	75	35		14		21		31	

* Estadísticos estimados a partir de datos promedios diarios del equipo.

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

Estadísticos	Normalidad Año 2020 (01 de enero al 19 de marzo)	Primera etapa: Cuarentena obligatoria (20 de marzo al 26 de abril)	Segunda etapa: Cuarentena con reapertura de algunos sectores económicos (27 de abril al 10 de mayo)	Tercera etapa: Cuarentena con reapertura de nuevos sectores económicos (11 de mayo al 31 de mayo)	Cuarta etapa: Cuarentena inteligente (01 de junio al 30 de junio)
GOBERNACIÓN					
Promedio*	15.7	12.1 ↓ 23%	11.5 ↓ 26%	10.3 ↓ 35%	9.6 ↓ 38%
Mediana	15.1	9.9 ↓ 34%	11.4 ↓ 24%	10.1 ↓ 33%	8.9 ↓ 41%
Desv. Est.	5.4	7.9	1.6	2.1	3.4
Min.	4.9	2.8	8.8	6.4	4.2
Max.	30.1	30.7	14.2	14.0	17.5
Percentil 95	25.2	28.1	13.5	13.6	15.7
N° de días	78	35	11	21	26
LICEO					
Promedio*	17.3	12.8 ↓ 26%	12.6 ↓ 27%	8.9 ↓ 48%	7.7 ↓ 55%
Mediana	16.9	10.3 ↓ 39%	12.1 ↓ 28.4%	8.8 ↓ 48%	7.8 ↓ 53%
Desv. Est.	5.9	9.2	1.8	1.8	3.7
Min.	5.5	2.0	9.8	3.6	2.5
Max.	33.3	34.2	15.7	12.0	16.2
Percentil 95	27.5	31.5	15.6	11.1	15.5
N° de días	75	35	14	21	31

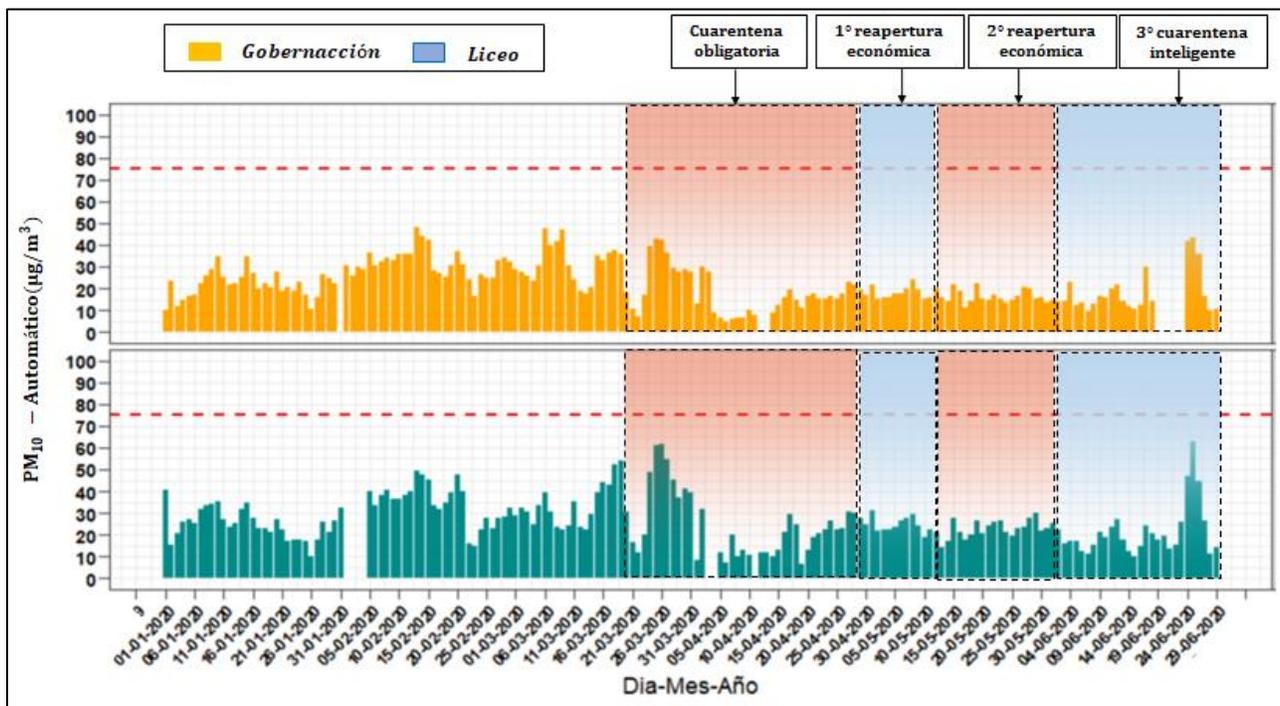
* Estadísticos estimados a partir de datos promedios diarios del equipo.

De manera alternativa, en la Figura 10 se presenta el comportamiento temporal de las concentraciones de los equipos PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos (promedio diario) durante el año 2020 para las estaciones Gobernación y Liceo. Se destaca este semestre las diferentes dinámicas que han ocurrido en la ciudad debido a las medidas tomadas por las autoridades para enfrentar el COVID-19 que iniciaron a partir del viernes 20 de marzo.

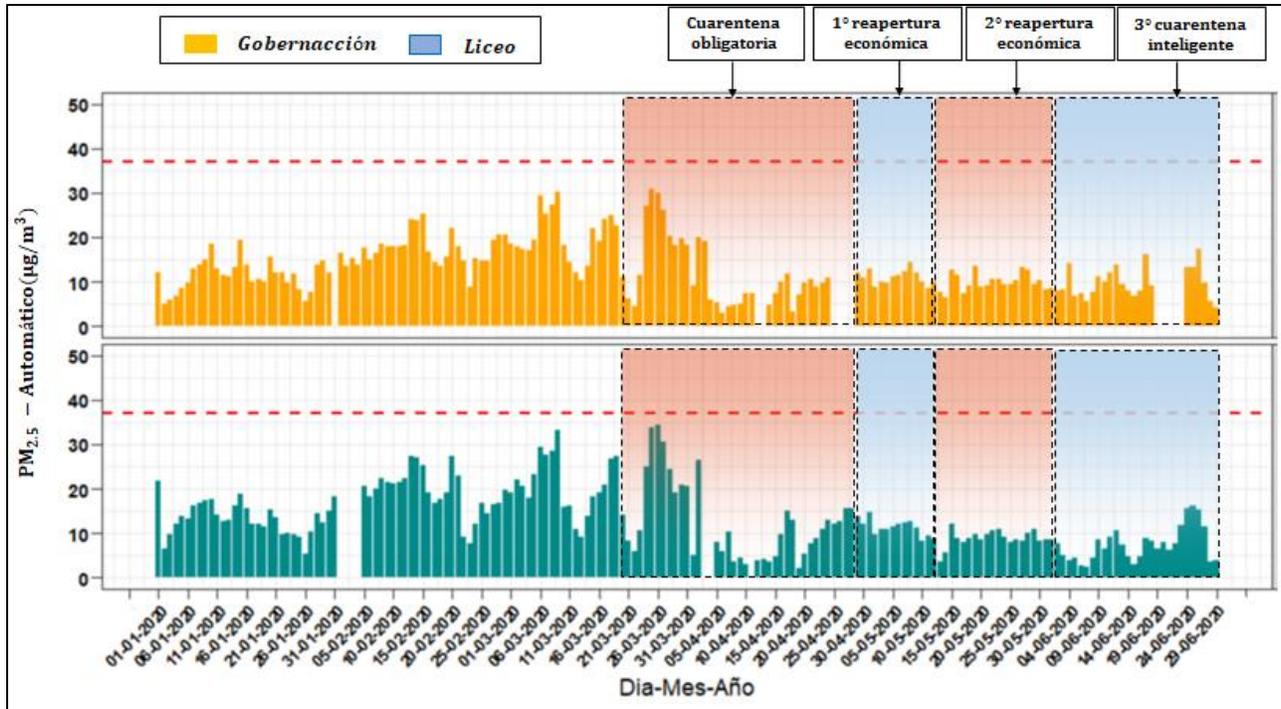
Se puede identificar inicialmente que durante los primeros días de la cuarentena obligatorio (23 de marzo al 3 de abril) las medidas tomadas no tuvieron un impacto significativo en las concentraciones obtenidas en ninguna de las estaciones, con registros similares a los días de normalidad económica (entre enero y marzo).

A partir de 01 de abril, con el cierre de las vías principales del centro de la ciudad, entre las calles 19 a 24 y carreras 23 a 22, las concentraciones observadas presentaron una reducción, seguida de una estabilización con valores alrededor de los 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ en ambas estaciones, comportamiento que se mantuvo hasta el final de la segunda apertura económica (30 de mayo).

Por último, a finales del mes de junio se observó un aumento en las concentraciones registradas en ambas estaciones y ambos contaminantes con promedios diarios que superaron los 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$, valores posiblemente relacionados a la alerta emitida por el IDEAM sobre el fenómeno de mesoescala del polvo proveniente del desierto del Sahara, en donde una capa de aire seco cargada de material particulado llegó a Colombia impactando mayoritariamente la zona norte de Colombia (Semana, 2020).



(a)



(b)

Figura 10. Evolución temporal de concentraciones diarias de los equipos PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos durante el año 2020. (a) PM₁₀ (b) PM_{2.5}. La línea punteada roja hace referencia a los límites máximos permisibles de promedio diario de PM₁₀ y PM_{2.5} respectivamente establecidos en la Resolución 2254 de 2017 de MADS: 75 µg/m³ para PM₁₀ y 37 µg/m³ para PM_{2.5}.

Finalmente, de manera alternativa se presenta la Figura 11 con la evolución promedio horaria, por día de la semana y mensual de las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticas en las estaciones Gobernación y Liceo para todo el período de análisis.

Se identifica que los máximos de concentración horaria se presentan 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 anterior 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 35 µg/m³ para PM₁₀ y 20 µg/m³ para PM_{2.5}. Por su parte la estación Gobernación registró valores de 30 µg/m³ para PM₁₀ y 18 µg/m³ para PM_{2.5}.

Para el caso particular del medio día, no se observan estos picos de concentración debido a las dinámicas de las masas de aire en la ciudad, que, al calentarse por acción de la radiación solar, cuyo valor máximo supera los 1100 W/m² entre las 11 am y 1 pm, ganan flotabilidad y ascienden en la atmósfera, por consiguiente se aumenta la altura de la capa límite planetaria, dando lugar a una mayor dispersión de los contaminantes emitidos (Cuesta y otros, 2020).

Adicionalmente, se presentan de manera general el perfil promedio para los días de la semana, se observa un patrón similar a los datos de los equipos manuales, en donde se presenta una disminución del promedio diario para ambas estaciones durante el domingo, donde se presenta una reducción aproximada del 30% respecto al promedio semanal para ambas estaciones y para ambos contaminantes. Lo anterior sugiere que tanto el PM_{10} como el $PM_{2.5}$ provienen de la misma fuente de emisión. Se destaca que, para el caso de los sábados no se presenta una reducción significativa en los valores promedio diarios comparados con el promedio semanal (5%), indicando que este día se comporta como un día laboral en la ciudad. Finalmente, en los promedios mensuales se identifica nuevamente el fenómeno de reducción relacionada a las medidas de restricción.

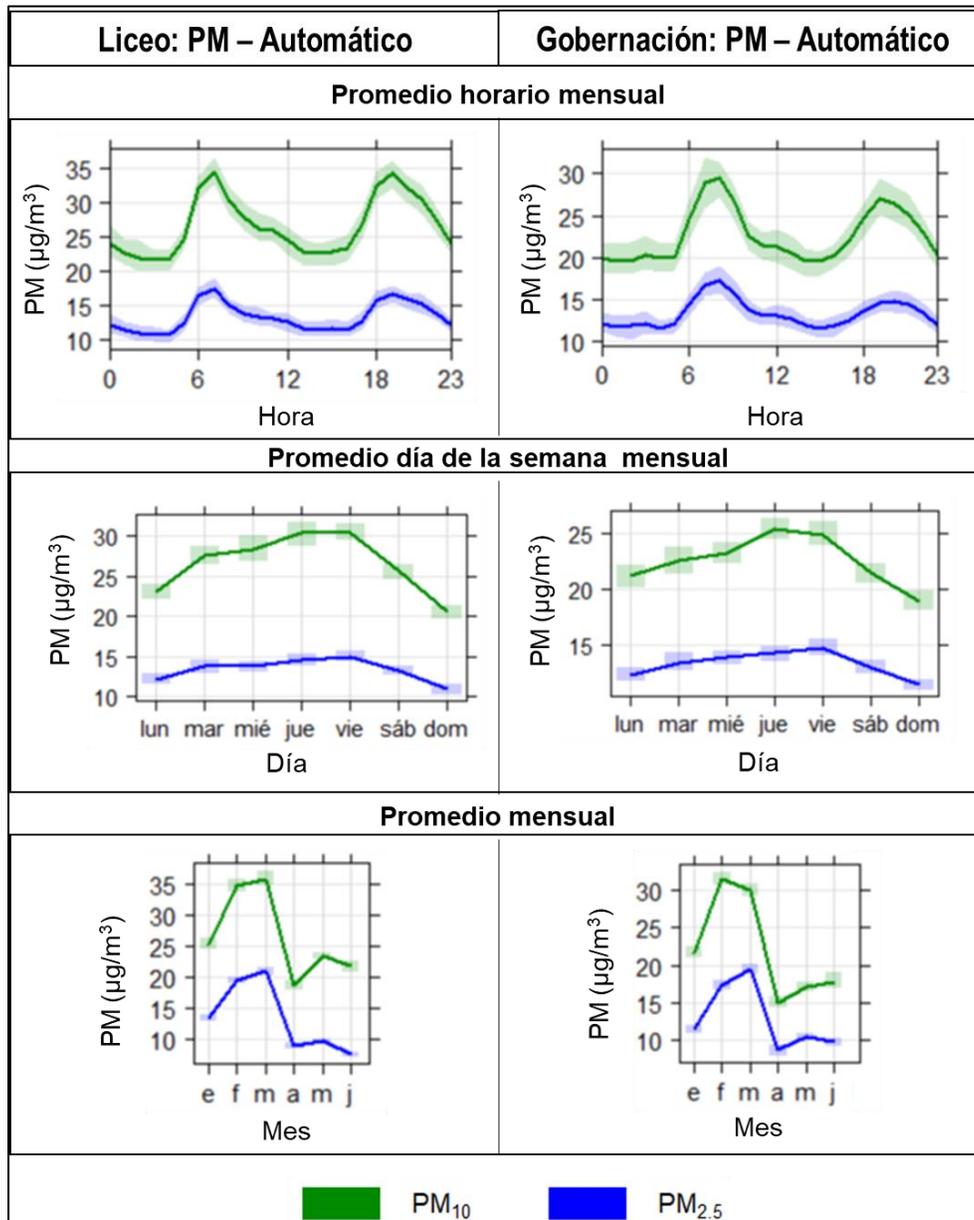


Figura 11. Promedio horario, semanal y mensual para PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Automáticos durante el año 2020 en las estaciones Gobernación y Liceo.

3.4. ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE (ICA) PARA PM₁₀ Y PM_{2.5} EN EL SVCA DE MANIZALES

Las Figura 12 y Figura 13 presentan los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de PM – manual y PM – Automático. 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).

Con base en la concentración de PM₁₀ – manual, se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena en las cinco estaciones en todos los días analizados. Para el caso de PM_{2.5} en la estación Gobernación, un 80% de calidad del aire estuvo en calidad moderada y el 20% en calidad buena. El PM_{2.5} al ser una fracción del PM más pequeña posee mayor afectación a salud humana, por lo tanto, se destaca la importancia de continuar con medidas que permitan identificar escenarios de riesgo para la ciudadanía.

Por otro lado, con base en la concentración de PM₁₀ - automático, se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena en todos los días en la estación Gobernación y en el 96% de los días en la estación Liceo, en donde los días 19, 25, 26 y 27 de marzo, se tuvo una calidad moderada, fenómenos sin explicación atribuible. Por otra parte, para el caso de PM_{2.5} en ambas estaciones se tuvo un promedio del 48% de los días con calidad del aire en estado moderado, principalmente en los tres primeros meses del semestre. Se resalta que para los días 24, 25 y 26 de junio se presentaron ICAs con estado moderado en ambas estaciones de PM_{2.5} y en PM₁₀ de Liceo, en donde las concentraciones registradas de material particulado en la ciudad reflejan la posible afectación por el fenómeno de macro escala de la arena proveniente del desierto del Sahara.

Al comparar el segundo trimestre (abril – junio) del año con el primero (enero – marzo), se identifica el mejoramiento de la calidad del aire en términos de material particulado PM_{2.5} debido a las medidas de restricción para enfrentar el COVID-19, generándose tan solo 18 días (28% de los datos) con calidad del aire moderado desde el inicio de la cuarentena obligatoria (20 de marzo) hasta la cuarentena inteligente (30 de junio).

	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

Gobernación PM₁₀ – Manual



Gobernación PM_{2,5} – Manual



Liceo PM₁₀ – Manual



Milán PM₁₀ – Manual



Palogrande PM₁₀ – Manual



Nubia PM₁₀ – Manual



Figura 12. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ y PM_{2,5} - Manual en Manizales durante el año 2020. Basado en la resolución 2254 de 2017 de MADS.

	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

Gobernación PM₁₀ – Automático



Liceo PM₁₀ – Automático



Gobernación PM_{2.5} – Automático



Liceo PM_{2.5} – Automático



Figura 13. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos en Manizales durante el año 2020. Basado en la resolución 2254 de 2017 de MADS.

4. RESULTADOS MONITOREO DE GASES

4.1. MONITOREO DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

En la Tabla 6 se presentan los estadísticos descriptivos comparativos para CO durante el año 2020 y la relación entre las diferentes dinámicas presentadas en la ciudad asociadas a las medidas para combatir el COVID-19. Se observa que las concentraciones horarias promedio durante los primeros meses del año de normalidad económica (01 de enero al 19 de marzo) se encuentran alrededor de los de $653.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Al comparar con la primera etapa de cuarentena obligatoria (entre el 20 de marzo al 26 de abril) se presentó una reducción de concentraciones observadas con un promedio horario de $555.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\downarrow 15\%$), fenómeno atribuible a la ausencia casi total de fuentes de emisión, vehículos particulares, debido a la baja actividad económica y al cierre de vías próximas a la estación, que se encuentra ubicada actualmente en la carrera 21 con calle 23.

Una vez ocurrió la reapertura económica (a partir del 27 de abril al 31 de mayo) se observaron concentraciones similares e incluso superiores comparados con la etapa de normalidad con promedios horarios de $666.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\uparrow 2\%$) y $771 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\uparrow 18\%$) para la primera y segunda reapertura económica respectivamente. De manera similar durante la cuarentena inteligente (01 de junio al 30 de junio) se observó un promedio horario de $844.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\uparrow 29\%$). Este incremento de concentraciones puede estar relacionado a la intensificación paulatina de las fuentes de emisión, las cuales aumentaron debido al retorno de la actividad económica y la apertura de vías próximas a la estación. Al comparar el promedio del semestre 2020 ($675 \mu\text{g}/\text{m}^3$) con el mismo periodo del año 2019 ($764 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se observa una reducción del 12% debido a las dinámicas del presente año.

Por otro lado, teniendo en cuenta que estadísticamente la distribución de los datos no es normal y se encuentra sesgada hacia la derecha, en la Tabla 6 también se presentan los estadísticos descriptivos comparativos basados en la mediana de los datos. Se observa que las medianas de concentraciones horarias durante la normalidad económica se encuentran alrededor de los $581.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Al comparar con las etapas de la cuarentena, se observó que la tendencia en cada una de las etapas tuvo un comportamiento similar al obtenido con las concentraciones horarias promedio, presentado una disminución del 8% durante la cuarentena obligatoria, una variabilidad no significativa durante la primera reapertura económica con 3% y un aumento durante la segunda reapertura económica y la cuarentena inteligente en un 24% y 35%.

Al comparar los mínimos en los promedios horarios obtenidos, se observa que el mínimo anual fue registrado durante la primera etapa de normalidad económica con un promedio de $49.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor registrado el fin de semana entre el 13 al 15 de marzo. Fenómeno atribuible a la reducción de fuentes de emisión durante este fin de semana acrecentadas por las fuertes precipitaciones de estos días, en donde se registró una precipitación acumulada equivalente a 58.8 mm (40% del total de lluvias del mes de marzo). De otra parte, al observar los máximos horarios, durante la normalidad económica y la cuarentena inteligente se registraron valores superiores a los $2000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, no obstante, al comparar el percentil 95 de los datos se identifica que la cuarentena inteligente presentó valores atípicos por encima de los $1366.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ indicando que durante este periodo los promedios horarios máximos fueron más representativos.

Cabe resaltar que este fenómeno de concentraciones opuestas al PM₁₀ y PM_{2.5} está relacionado directamente con las fuentes de emisión, particularmente con el tipo de vehículos y combustibles, siendo el CO mayoritariamente dominado por la combustión de gasolina proveniente de motocicletas y vehículos particulares, mientras que la emisión de PM tiene un aporte asociado principalmente al uso de diésel, característico en vehículos como camiones de carga, buses y busetas (Corpocaldas – Unal, 2019).

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

Estadísticos*	Normalidad Año 2020 (01 de enero al 19 de marzo)	Primera etapa: Cuarentena obligatoria (20 de marzo al 26 de abril)		Segunda etapa: Cuarentena con reapertura de algunos sectores económicos (27 de abril al 10 de mayo)		Tercera etapa: Cuarentena con reapertura de nuevos sectores económicos (11 de mayo al 31 de mayo)		Cuarta etapa: Cuarentena inteligente (01 de junio al 30 de junio)	
Promedio	653.6	555.1	↓ 15%	666.5	→ 2%	771.0	↑ 18%	844.5	↑ 29%
Mediana	581.4	536.8	↓ 8%	598.5	→ 3%	723.1	↑ 24%	785.2	↑ 35%
± Incertidumbre**	1.408	1.408		1.408		1.408		1.408	
Desv. Est.	339.1	141.0		162.7		221.3		289.5	
Min.	49.8	210.9		451.2		453.1		393.3	
Max.	2044.4	1320.5		1320.5		1578.0		2204	
Percentil 95	1294.8	805.1		968.5		1204.9		1366.6	
N° de datos	1865	888		312		480		720	

* Estadísticos estimados a partir de datos promedios horarios del equipo.

** Unidades: ppm. Las fuentes de incertidumbre están relacionadas principalmente con los procedimientos de calibración multipunto realizados con empresa externa: Comparación con patrones de referencia, desempeño por repetibilidad y resolución del instrumento.

De manera complementaria, en la Figura 14 se presenta la evolución de concentraciones octohorarias de CO durante el 2020 y la identificación de las diferentes etapas de análisis. El promedio aritmético es estimado a partir de los datos cinco minútales del equipo según lo estipulado por el "Manual de operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire" del MADVT (MAVDT, 2010).

De manera general se puede identificar la reducción de los picos de concentración máximos durante la cuarentena obligatoria y la primera y segunda reapertura económica. Sin embargo, a medida que ocurría la reapertura estos picos de concentración se han acrecentado, debido a las nuevas dinámicas de movilidad y apertura de vías. Lo anterior indica nuevamente un aumento en la presencia de fuentes de emisión, en especial vehículos particulares y motocicletas, fuentes identificadas como las principales responsables de emisiones de CO con un aporte de 22552 ton/año, 38% atribuible a vehículos particulares y 41% a motocicletas (Corpocaldas – Unal, 2019).

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 octohorario y 35000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedio horario).

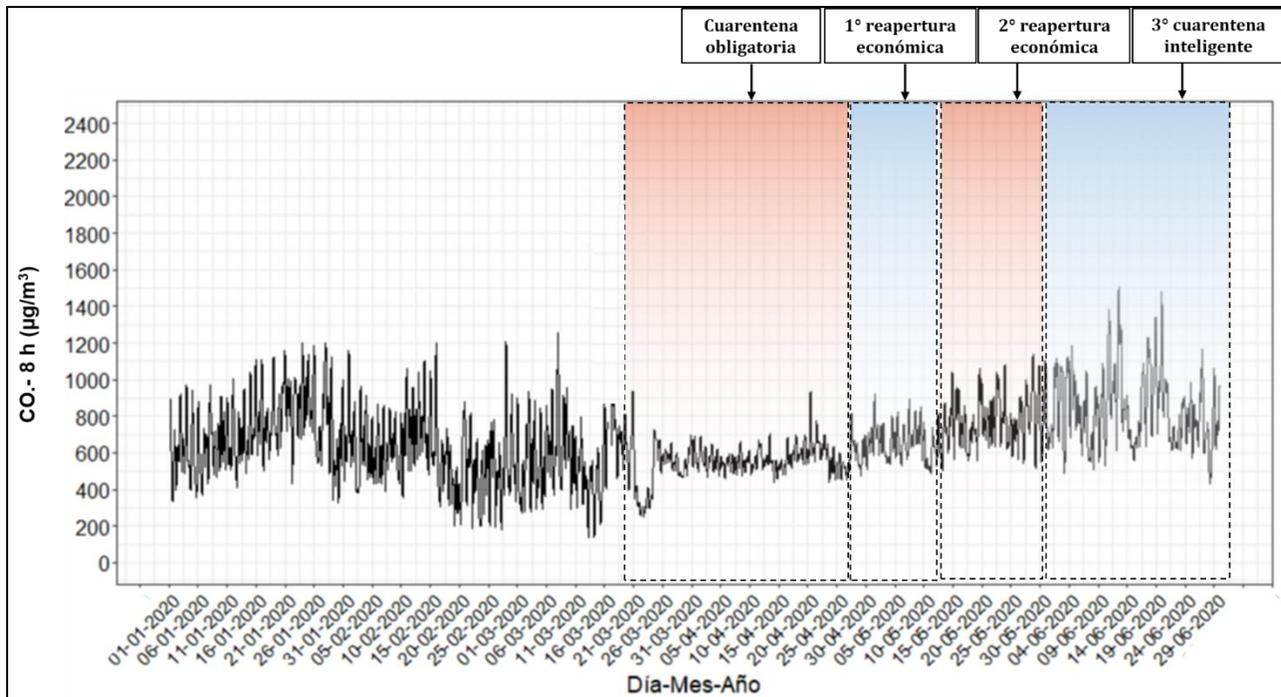


Figura 14. Variación de concentración promedio octohoraria de monóxido de carbono (CO) durante el año 2020. El nivel máximo permisible octohorario de la Resolución 2254 de 2017 = 5000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no fue superado en ningún día.

Adicionalmente, en la Figura 15 se presenta la variación promedio horaria mensual, por día de la semana y mensual para el año 2020. Se observa que los máximos horarios de concentración ocurren en las horas pico de tráfico vehicular (al inicio y final de la jornada laboral) alrededor de las 7 am y las 6 pm, con promedios horarios de 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 960 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Por otra parte, se observan mínimos alrededor de los 450 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en horas de la madrugada (entre la 3 y 5 am, hora de menor actividad vehicular). Estos resultados son congruentes con el último plan de movilidad de Manizales, donde se indica 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) (Steer Davies Gleave, 2017).

Se destaca finalmente que para el caso de la hora pico del medio día se registran concentraciones alrededor de los 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valor relacionado directamente con las dinámicas que se presentan en la atmósfera de la ciudad. Debido a la presencia de radiación solar se incrementa la temperatura de las masas de aire y aumenta la flotabilidad de estas. Consecuentemente se genera la elevación de la capa límite planetaria generando una mayor dispersión de los contaminantes en la atmósfera, además de la intensificación de los procesos de reacción química que generan contaminantes secundarios como el ozono troposférico (O_3) (Cuesta y otros, 2020).

Al comparar el promedio entre los días de semana, se observa que la concentración máxima se presenta los viernes con un valor promedio alrededor de los $740 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una concentración mínima los domingos (día con la menor actividad económica de la ciudad) con un valor promedio de $570 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este valor es 15% inferior comparado con el promedio semanal, indicando la representatividad del aporte de las fuentes de emisión en las concentraciones de CO observadas.

Finalmente se observa el comportamiento mensual de las concentraciones, se identifica un mínimo promedio mensual para marzo con un valor de $570 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un máximo promedio mensual durante junio con un valor de $850 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Valores relacionados directamente a las dinámicas de la ciudad siendo marzo caracterizado por altas precipitaciones (144 mm) e inicios de la cuarentena obligatoria, mientras junio fue se caracterizó por presentar movilidad asociada a cuarentena inteligente.

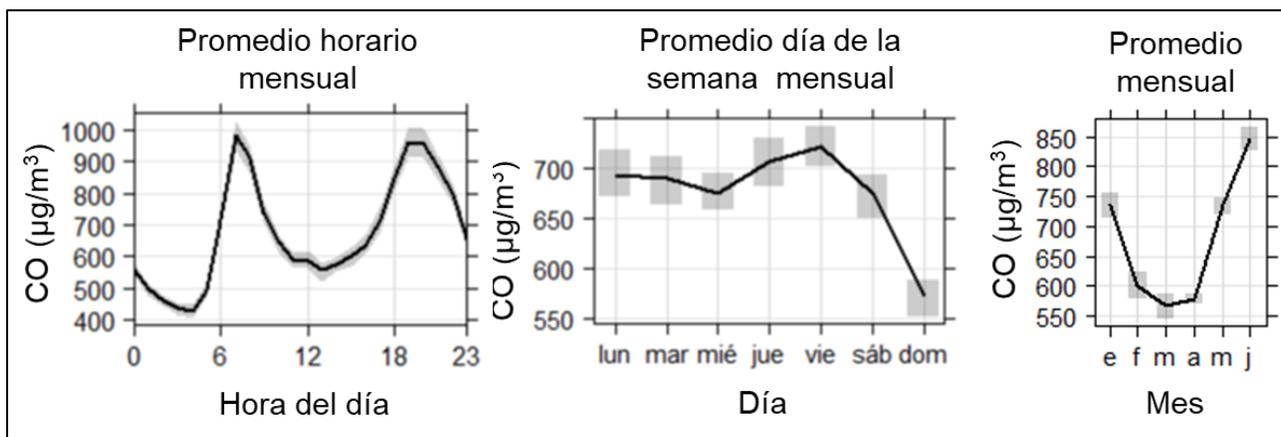


Figura 15. Variación promedio de monóxido de carbono (CO) horario mensual, por día de la semana y mensual durante el año 2020.

4.2. MONITOREO DE DIÓXIDO DE AZUFRE (SO_2)

En la Tabla 7 se presentan los estadísticos descriptivos comparativos para SO_2 durante el año 2020 y la relación entre las diferentes dinámicas presentadas en la ciudad asociadas a las medidas para combatir el COVID-19. Se identificó que, para este contaminante en particular, durante todas las etapas de cuarentena existió una reducción en las concentraciones registradas comparadas con la normalidad económica (01 de enero al 19 de marzo), cuyo promedio horario fue de $4.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Este fenómeno de reducción puede estar relacionado con la baja actividad volcánica durante las etapas de cuarentena (ver sección 5.1), en donde se identificó que las mayores emisiones de la columna de gases provenientes del volcán fueron superiores durante los meses de febrero y marzo con registros de emisión de gases desde la boca del volcán con alturas superiores a los 1370 m. Estas emisiones generan picos máximos de concentración con valores hasta de $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, una desviación estándar de $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un percentil 95 de $7.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ indicando la alta variabilidad de los datos durante este periodo.

De manera general se puede observar como el promedio de reducción ha disminuido paulatinamente pasando del 47% de reducción desde la cuarentena obligatoria (20 de marzo al 26 de abril) al 34% de reducción durante la cuarentena inteligente (01 de junio al 30 de junio). Este fenómeno puede ser atribuible a la reapertura de las vías que han generado el retorno de las fuentes de emisión más representativas en la estación, fuentes móviles que utilizan combustibles con contenido de azufre como gasolina y diésel.

Por otro lado, teniendo en cuenta que estadísticamente la distribución de los datos no es normal y se encuentra sesgada hacia la derecha, en la Tabla 7 se presentan además los estadísticos descriptivos comparativos basados en la mediana de los datos. Se observa que las concentraciones horarias medianas durante la normalidad se encuentran alrededor de los 3.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Al comparar con las etapas de la cuarentena, se observó que al igual que con las concentraciones horarias promedio, se obtuvo una disminución en todas las etapas de cuarentena con valores del 48, 46, 46 y 38 % para cada etapa respectivamente. Se destaca que los porcentajes de disminución obtenidos a partir de la mediana fueron similares a los obtenidos con la media de los datos.

Tabla 7. Estadísticos comparativos para la concentración de SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) entre los registros del año 2020 y las dinámicas económicas producto de las medidas para afrontar el COVID-19.

Estadísticos*	Normalidad Año 2020 (01 de enero al 19 de marzo)	Primera etapa: Cuarentena obligatoria (20 de marzo al 26 de abril)		Segunda etapa: Cuarentena con reapertura de algunos sectores económicos (27 de abril al 10 de mayo)		Tercera etapa: Cuarentena con reapertura de nuevos sectores económicos (11 de mayo al 31 de mayo)		Cuarta etapa: Cuarentena inteligente (01 de junio al 30 de junio)	
Promedio	4.1	2.2	↓ 47%	2.1	↓ 49%	2.2	↓ 46%	2.7	↓ 34
Mediana	3.7	1.9	↓ 48%	2.0	↓ 46%	2.0	↓ 46%	2.3	↓ 38
± Incertidumbre**	1.931	1.549		1.549		1.549		1.549	
Desv. Est.	2.6	0.9		0.6		0.7		2.4	
Min.	0.4	1.0		1.2		0.6		0.5	
Max.	32.0	10.7		5.1		5.9		38.8	
Percentil 95	7.6	3.5		3.4		3.7		5.0	
N° de datos	1772	888		312		480		720	

* Estadísticos estimados a partir de datos promedios horarios del equipo.

** Unidades: ppb. Las fuentes de incertidumbre están relacionadas principalmente con los procedimientos de calibración multipunto realizados con empresa externa: Comparación con patrones de referencia, desempeño por repetibilidad y resolución del instrumento.

De manera complementaria, la Figura 16 presenta la evolución de concentraciones horarias de SO_2 durante el 2020, con la identificación de las diferentes etapas de análisis y registros de emisiones volcánicas, como los registrados el 20 de febrero, 9 de marzo y 2 de abril. El promedio aritmético es estimado a partir de los datos cinco minútales del equipo según lo estipulado por el "Manual de operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire" del MADVT (MAVDT, 2010).

De manera general se puede identificar la reducción de los picos de concentración máximos durante la cuarentena obligatoria, la primera reapertura económica y la segunda reapertura económica; con valores que no superaron los $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a excepción del día 02 de abril cuyo registro pudo ser alterado debido a emisiones volcánicas registradas y reportadas por el servicio geológico colombiano (SGC). Finalmente, durante el año 2020 se registraron concentraciones horario promedio mínimas de $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y máximas de $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, estos valores están dentro de los límites permitidos por la normatividad vigente ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 1 hora).

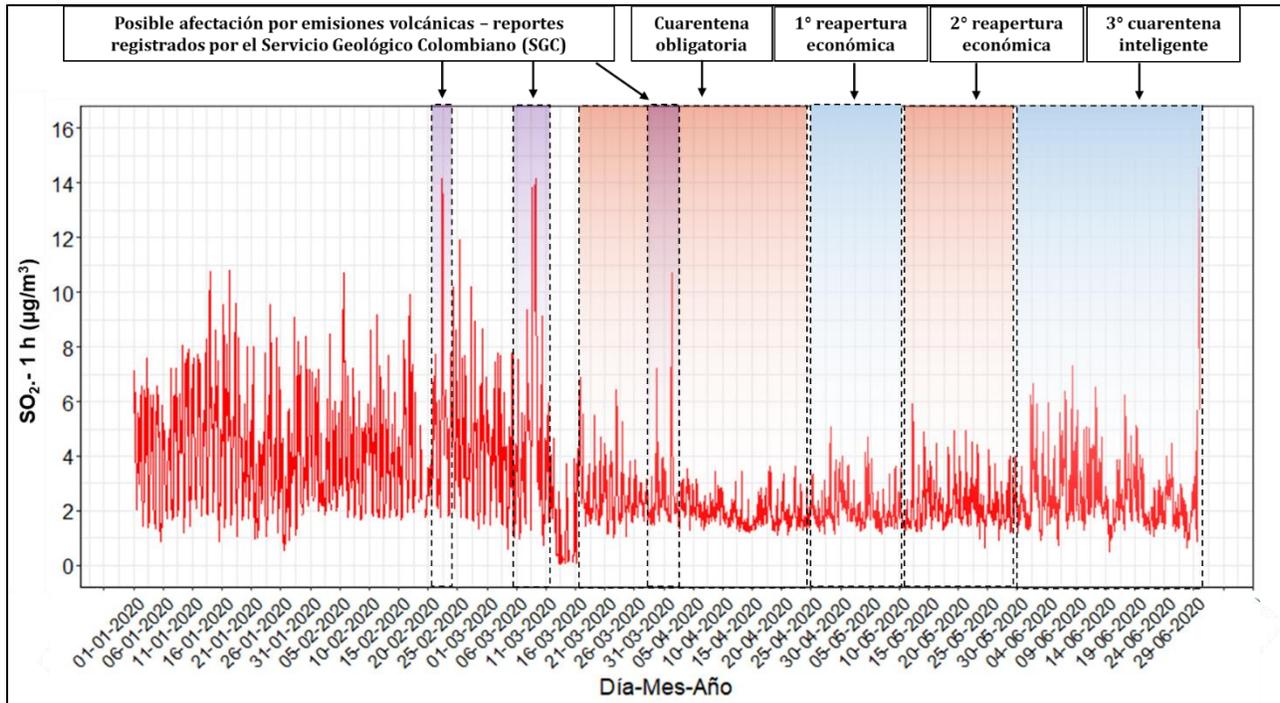


Figura 16. Variación de concentración promedio horario de dióxido de azufre (SO_2) durante el año 2020. El nivel máximo permisible horario de la Resolución 2254 de 2017 = $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no fue superado en ningún día.

Adicionalmente, en la Figura 17 se presenta la variación promedio horaria mensual y por día de la semana para el mes de marzo 2020. Se observa un comportamiento horario mensual similar al CO con valores máximos de concentración cercanos a las horas pico de tráfico vehicular al inicio y fin de la jornada laboral, alrededor de las 7 am y las 8 pm, con promedios horarios de $5.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Asimismo, se observan mínimos alrededor de los $2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al medio día (entre la 11 am y 1 pm). Al comparar el promedio por día de la semana mensual, no se observa un comportamiento definido observándose máximos de concentración los lunes con un valor alrededor de los $4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y mínimos los domingos alrededor de los $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Finalmente se observa el comportamiento mensual de las concentraciones, se identifica un mínimo promedio mensual durante abril y mayo ambos con un valor de $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un máximo promedio mensual durante enero y febrero con un valor de $4.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Valores relacionados posiblemente a la actividad volcánica de cada periodo (ver sección 5.1), ocurriendo mayor actividad durante el inicio del año, posterior a una reducción de actividad del fenómeno natural durante marzo hasta junio, sumado a la reducción de las actividades económicas durante las etapas de cuarentena.

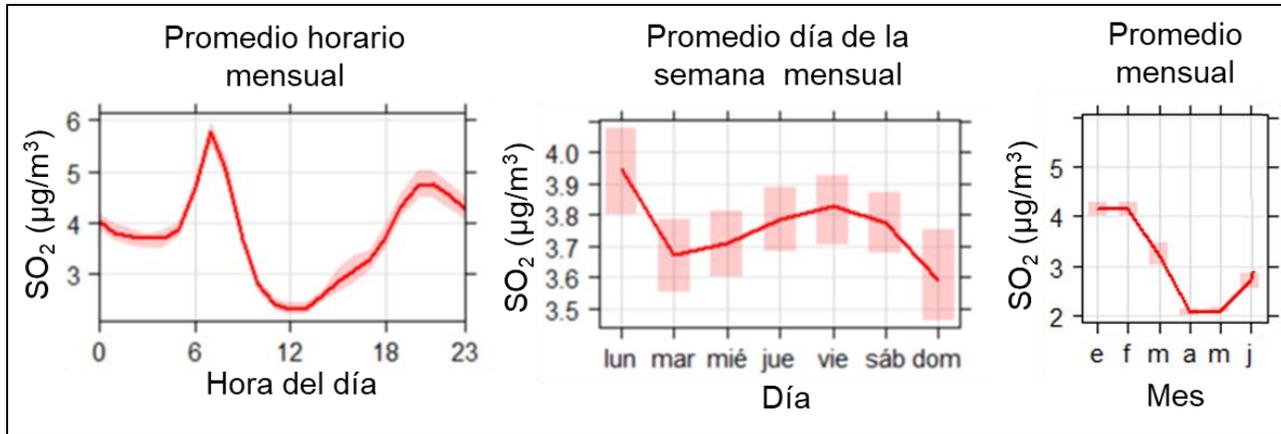


Figura 17. Variación promedio de dióxido de azufre SO₂ horaria mensual, por día de la semana y mensual durante el año 2020.

4.3. MONITOREO DE OZONO TROPOSFÉRICO (O₃)

En la Tabla 8 se presentan los estadísticos descriptivos comparativos para O₃ durante el año 2020 y la relación entre las diferentes dinámicas presentadas en la ciudad asociadas a las medidas para combatir el COVID-19. Se observa que las concentraciones horarias promedio durante los primeros meses del año de normalidad económica (01 de enero al 19 de marzo) se encuentran alrededor de los de 17 µg/m³.

Al comparar con la primera etapa de cuarentena obligatoria (entre el 20 de marzo al 26 de abril), se presentó un aumento de las concentraciones con un promedio de 22.9 µg/m³ (↑35%). Este fenómeno de aumento en concentraciones continuó hasta la primera reapertura económica (27 de abril al 10 de mayo) cuyo promedio fue de 20.9 µg/m³ (↑23%). Para la segunda apertura económica (11 de mayo al 31 de mayo) los promedios de concentraciones registraron valores similares a la normalidad económica con un promedio de 15.6 µg/m³ (↓8%). Finalmente, durante la cuarentena inteligente el promedio horario presentó una reducción hasta obtener un valor de 14 µg/m³ (↓17%).

Por otro lado, teniendo en cuenta que estadísticamente la distribución de los datos no es normal, en la Tabla 8 también se presentan los estadísticos descriptivos comparativos basados en la mediana de los datos. Se observa que las concentraciones horarias medianas durante la normalidad se encuentran alrededor de los 13.6 µg/m³. Al comparar con las etapas de la cuarentena, se observó un aumento de concentraciones durante la cuarentena obligatoria y la primera apertura económica del 57 y 47 % respectivamente, para la segunda apertura económica no se obtuvo una variabilidad significativa con valor similar a la etapa de normalidad, mientras que para la cuarentena inteligente se registró una reducción del 10%. Para este contaminante en particular, se observó un cambio significativo en los porcentajes de variación al comparar la media con la mediana, siendo más evidente el efecto de la distribución no normal de los datos.

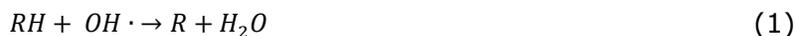
Para poder explicar el comportamiento de este contaminante, se resalta que el O₃ es un contaminante secundario que es formado en la atmósfera debido a las reacciones fotoquímicas en presencia de contaminantes primarios conocidos como precursores. Los principales precursores del O₃ son los óxidos de nitrógeno (NO_x, que representa especies NO y NO₂) y compuestos orgánicos volátiles (COVs). En la ciudad de Manizales ambos precursores son dominados por emisiones vehiculares (Corpocaldas – Unal, 2019). La formación de O₃ depende directamente de la relación entre COVs/NO_x y la habilidad oxidativa de la atmósfera, que depende de la presencia de radicales hidroxilos (OH·) en el ambiente. Bajo la suficiente relación entre COVs/NO_x, los radicales OH· reaccionarán mayoritariamente con los COVs para generar moléculas de agua, NO₂ y especies de aldehídos (Reacciones 1, 2 y 3). Por otro lado, con una baja relación de COVs/NO_x las reacciones de NO_x serán predominantes (reacciones 3, 4, 5 y 6) y removerán los radicales OH· del sistema, generando consumo de O₃ mediante la reacción de titulación (reacción 6) y finalmente la producción de especies como ácido nítrico que posteriormente precipitan en forma seca o húmeda (Sengel y otros, 2020; Fabián y Dameris, 2014).

Tabla 8. Estadísticos comparativos para la concentración de O₃ (µg/m³) entre los registros del año 2020 y las dinámicas económicas producto de las medidas para afrontar el COVID-19.

Estadísticos*	Normalidad Año 2020 (01 de enero al 19 de marzo)	Primera etapa: Cuarentena obligatoria (20 de marzo al 26 de abril)		Segunda etapa: Cuarentena con reapertura de algunos sectores económicos (27 de abril al 10 de mayo)		Tercera etapa: Cuarentena con reapertura de nuevos sectores económicos (11 de mayo al 31 de mayo)		Cuarta etapa: Cuarentena inteligente (01 de junio al 30 de junio)	
Promedio	17.0	22.9	↑ 35%	20.9	↑ 23%	15.6	↓ 8%	14.0	↓ 17%
Mediana	13.6	21.4	↑ 57%	20.2	↑ 47%	13.5	→ 0%	12.2	↓ 10%
± Incertidumbre**	1.730	1.455		1.455		1.455		1.455	
Desv. Est.	11.8	10.3		9.7		8.7		8.4	
Min.	2.1	3.5		3.0		2.4		2.0	
Max.	61.9	54.6		46.2		40.9		54.5	
Percentil 95	38.8	41.8		38.7		32.9		29.9	
N° de datos	908	888		312		480		628	

* Estadísticos estimados a partir de datos promedios horarios del equipo.

** Unidades: ppb. Las fuentes de incertidumbre están relacionadas principalmente con los procedimientos de calibración multipunto realizados con empresa externa: Comparación con patrones de referencia, desempeño por repetibilidad y resolución del instrumento.



Dónde: *R* representa una cadena de hidrocarburos (Ej. Etano (C₂H₆) el grupo *R* representara la cadena C₂H₅); *M* representa cualquier mediador inerte que permita conservar el momento de la reacción (Ej. Nitrógeno).



Dónde: *hν* representa la energía fotoquímica efecto de la radiación solar en su longitud de onda corta.

En este sentido y en contraposición con los resultados de CO, la disminución de emisiones de contaminantes primarios durante la cuarenta obligatoria y la primera apertura económica (20 de marzo al 20 de mayo) pueden ser interpretadas como una reducción de emisiones de precursores como el NO_x debido al bajo tráfico vehicular. Este fenómeno altera las reacciones fotoquímicas induciendo una mayor generación de O₃, debido a que los radicales OH· tenderán hacia la reacción con COVs y favorecerán la producción neta de NO₂ (reacciones 1, 2 y 3). Posteriormente, la fotólisis del NO₂ (reacción 4) favorecerá la generación de O₃ (Ver reacción de titulación (6) y el equilibrio será desplazado hacia el lado izquierdo de la reacción. Finalmente, este fenómeno reducirá la habilidad oxidativa de la atmósfera y por ende disminuirá el consumo de O₃ durante la noche (reacción 7), generando así un remanente atmosférico de O₃ que puede aumentar los niveles de concentración para el día siguiente (Sengel y otros, 2020).

A medida que aumenta la generación de precursores durante la segunda apertura económica y la cuarentena obligatoria (21 de mayo al 30 de junio), se presenta una competencia por el consumo de radicales hidroxilos (OH·) presentes en el ambiente y la reacción de titulación (reacción 6) es finalmente desplazada hacia un mayor consumo de O₃, por consiguiente, una reducción de las concentraciones observadas.

Al observar los resultados obtenidos para O₃ durante las diferentes dinámicas de movilidad, se puede observar que las concentraciones de O₃ en la ciudad de Manizales se encuentran dominadas por la presencia de COVs en la atmósfera, de origen antropogénico y biogénicas. (Li, 201; Sengel y otros, 2020).

De manera complementaria, la Figura 18 presenta la evolución de concentraciones octohorarias de O₃ durante el 2020, con la identificación de las diferentes etapas de análisis. Allí se puede identificar el efecto de los fenómenos anteriormente mencionados para cada etapa de la cuarenta. Se resalta que para este equipo se presentaron fallas de medición a lo largo del mes de febrero y mediados de marzo. El promedio aritmético es estimado a partir de los datos cinco minutos del equipo según lo estipulado por el "Manual de operación de sistemas de vigilancia de calidad del aire" del MADVT (MAVDT, 2010).

Se resalta que las concentraciones octohorarias de ozono troposférico se encontraron entre $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y promedio de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$; valores que están dentro de los límites permitidos por la normatividad vigente ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 8 horas).

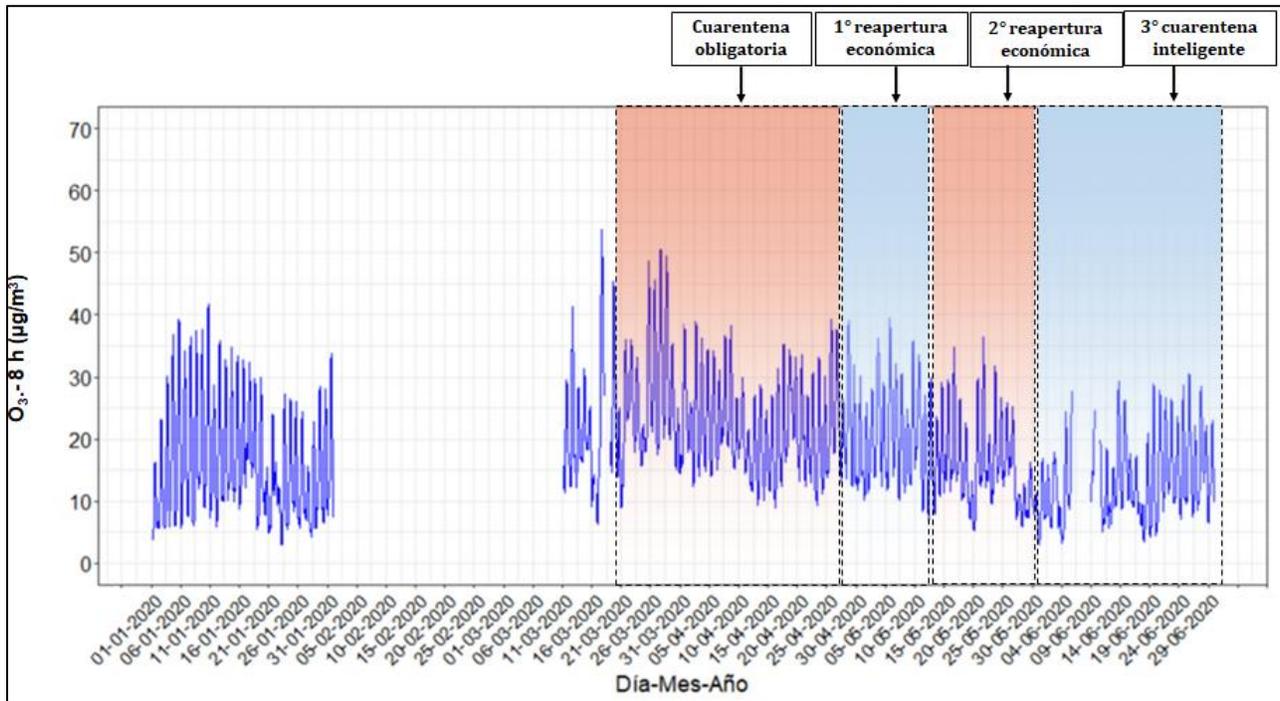


Figura 18. Variación de concentración promedio octohorario de O_3 durante el año 2020. El nivel máximo permisible octohorario de la Resolución 2254 de 2017 = $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no fue superado en ningún día.

De manera alternativa se presenta en la Figura 19 el resumen de la variación de O_3 y radiación solar promedio horaria mensual y promedio día de la semana para el período de análisis. Adicionalmente, presenta el comportamiento de estas variables durante el día (diurno entre las 6 am y 6 pm) y la noche (nocturno entre las 6 pm y 6 am). Se observa una relación directa entre el ozono y la radiación solar, los picos máximos en las concentraciones de ozono y radiación solar ocurren durante las 11:30 am y 3:00 pm del día, alcanzando concentraciones promedio cercana a los $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y niveles de radiación promedio cercanos a los $400 \text{ W}/\text{m}^2$.

Para el período nocturno, sin presencia de radiación solar, la concentración de ozono disminuye aproximadamente el doble. Adicionalmente, se presenta un pico de ozono entre la 1:00 am y 3:00 am con valores cercanos a los $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, fenómeno relacionado posiblemente al transporte de O_3 que es generado durante el día y posteriormente es transportado desde la parte alta de la cordillera hacia el centro urbano debido a los patrones de circulación de vientos montaña - valle característicos de la ciudad; sumado a ello la ausencia de radiación solar disminuirá la temperatura de las masas de aire y por ende la reducción en la flotabilidad, generando la disminución de la altura de la capa limite, impidiendo así la libre dispersión de contaminantes en la atmósfera.

Se identifica también que las concentraciones durante el día son aproximadamente 2 veces más elevadas que en las noches, con un promedio diario de $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y uno nocturno de $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De manera general se evidencia que los promedios durante la noche no presentan relación clara 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 y el registrado será producto de la acumulación del ozono generado durante el día.

Por otra parte, los promedios diarios y semanales evidencian que las variaciones de O_3 tienen relación directa con la radiación solar, y para el caso de sábados y domingos se presenta un aumento en concentraciones de ozono lo que se asocia al remanente de ozono generado durante los días de mayor actividad de las fuentes de emisión (lunes a viernes), además de la posible disminución de emisiones de precursores como el NO_x debido al bajo tráfico vehicular de estos dos días, alterando así las reacciones de titulación que generan ozono desplazando el equilibrio hacia una mayor producción de este contaminante.

Finalmente se observa el comportamiento mensual de las concentraciones durante las jornadas diurnas y nocturnas, se identifica un mínimo promedio diario mensual para junio con un valor de $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un máximo promedio diario mensual durante marzo con un valor de $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Valores relacionados directamente a los promedios de radiación solar, en donde marzo registro un promedio mensual de $334.5 \text{ W}/\text{m}^2$, mientras junio presento un promedio mensual de $250 \text{ W}/\text{m}^2$.

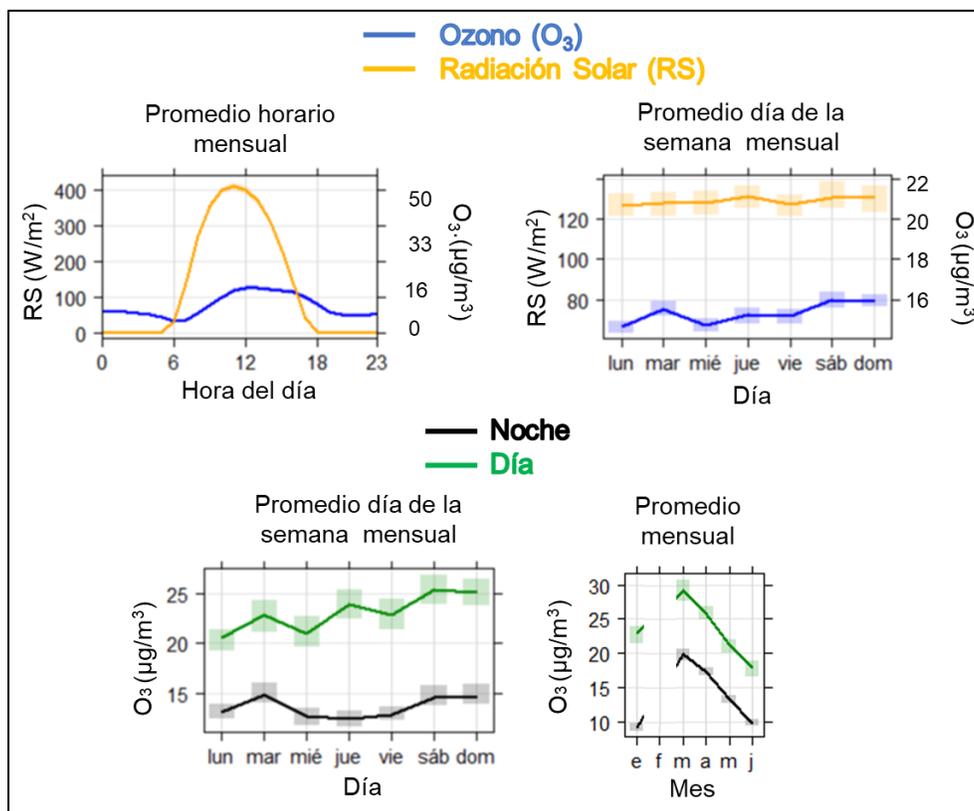


Figura 19. Variación promedio horaria y semanal de O_3 y radiación solar. Se incluye además el comportamiento promedio semanal y mensuales entre las horas diurnas y nocturnas, durante el año 2020.

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

La Figura 20 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en la estación de monitoreo Gobernación para CO, SO₂ y O₃. Para el cálculo de este indicador (ICA) tanto en CO, SO₂ y O₃ se utilizó la metodología propuesta por la resolución 2254 de 2017 (capítulo IV artículo 18 al 21) del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible – MADS (MADS, 2017). Se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena durante todo el período analizado para todos los contaminantes.

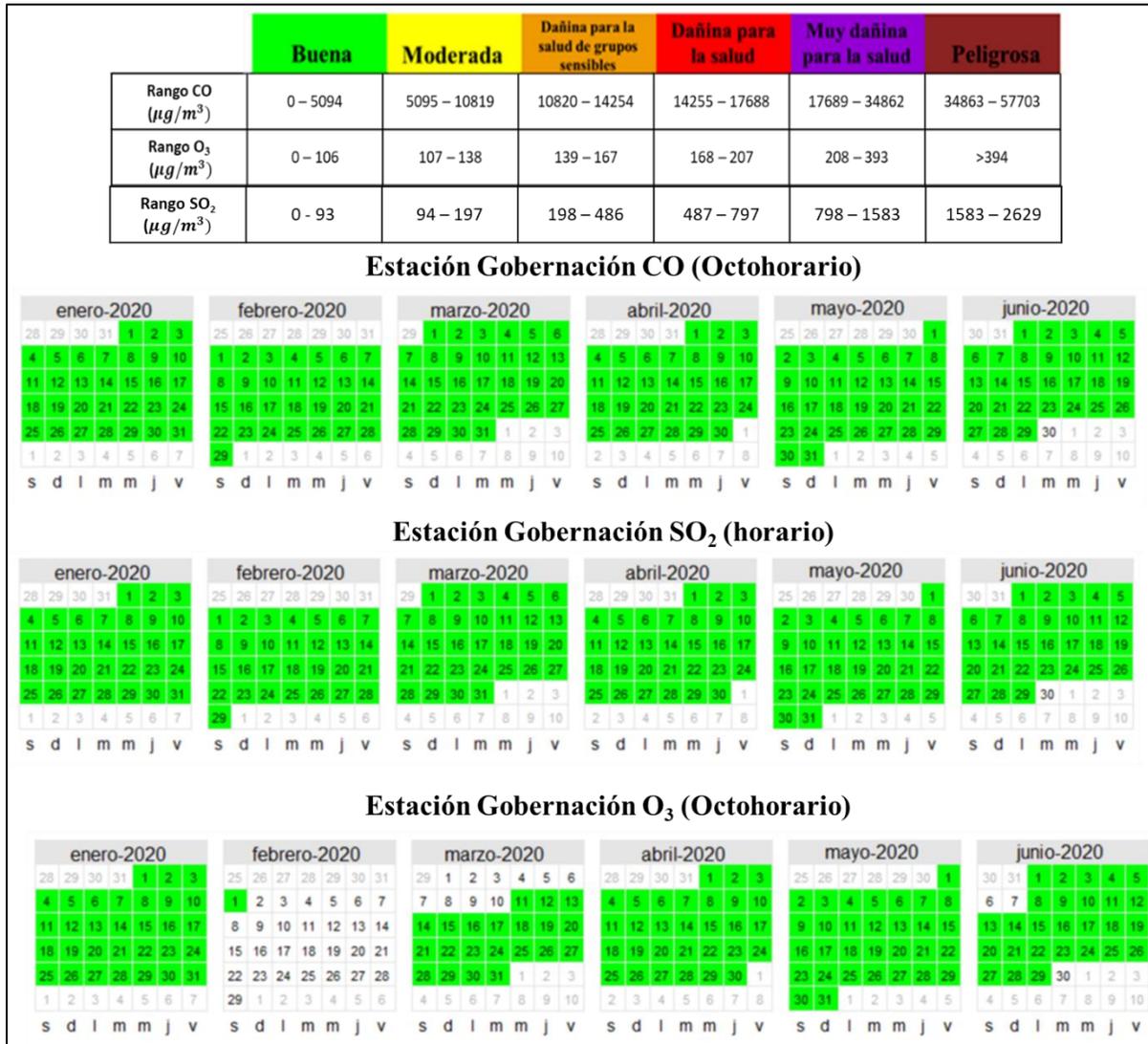


Figura 20. Índice de calidad del aire (ICA) para CO, SO₂ y O₃ en Manizales durante lo transcurrido del año 2020. Basado en la resolución 2254 de 2017 de MADS.

5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS

5.1. EMISIONES VOLCÁNICAS

Durante lo corrido del año 2020 se realizó además un seguimiento de los diferentes reportes semanales que son generados por el servicio geológico colombiano (SGC) a través de su plataforma en línea, permitiendo confirmar algunos días con actividad y emisión asociadas a ceniza volcánica y SO₂ en la atmósfera por parte de esta fuente puntual natural. En la Tabla 9 se presenta un resumen con algunos de los días que tuvieron alturas para la columna de gases significativas (superiores a los 1200 metros), de estos días se destaca que el 65% de los reportes presentaron predominancia de vientos hacia el occidente y/o noroccidente, ubicación de Manizales, generando una posible afectación a la contaminación atmosférica por esta fuente en la ciudad. De manera alternativa se presentan dos ejemplos de las imágenes tomadas por el satélite "Sentinel 5P/TROPOMI" en la Figura 21 para los días 13 de febrero y 11 de marzo del 2020, donde se observa el comportamiento de la pluma del volcán y las altas concentraciones para la columna atmosférica de SO₂ con valores alrededor de las 2 unidades dobson.

Tabla 9. Resumen de emisiones volcánicas significativas durante el 2020.

Fecha	Altura de la columna de gases (m)	Predominancia del viento
30/01/2020	1619	Occidente - Noroccidente
9/02/2020	1370	Occidente - Noroccidente
13/02/2020	1950	Occidente - Noroccidente
20/02/2020	1450	Occidente - Noroccidente
29/02/2020	1450	Occidente - Noroccidente
9/03/2020	1943	Suroccidente - Noroccidente
11/03/2020	2000	Noroccidente - Occidente
23/03/2020	1500	Nororiente - Suroriente
2/04/2020	1430	Nororiente-Suroriente
9/04/2020	4300	Suroccidente - occidente
19/04/2020	1540	Suroccidente - occidente
30/04/2020	1221	Nororiente
29/05/2020	1280	Noroccidente
29/06/2020	1400	Noroccidente

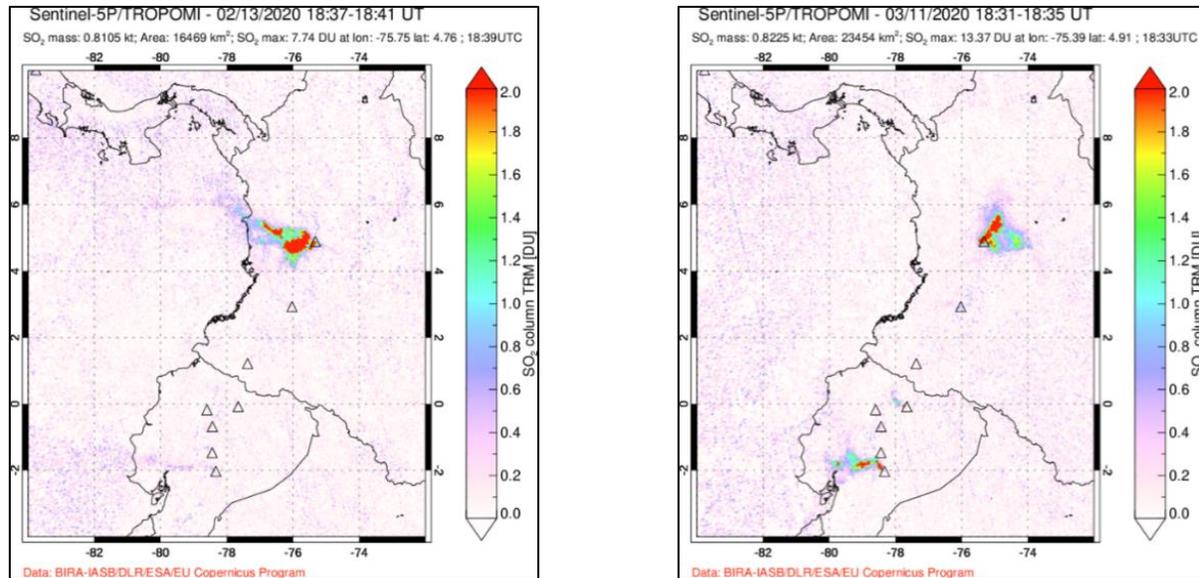


Figura 21. Ejemplos: Comportamiento de columna de SO₂ registradas por el satélite TROPOMI. Izquierda: viernes 02/13/2020. Derecha: martes 03/11/2020

5.2. IMÁGENES SATELITALES

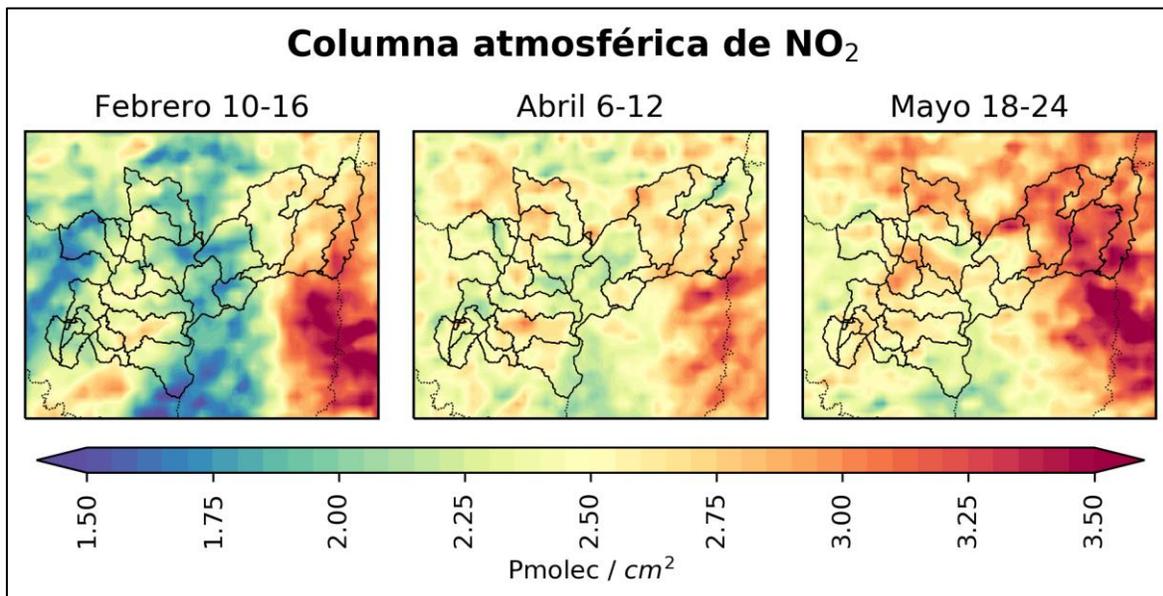
De manera similar a los registros de emisiones volcánicas provenientes de imágenes satelitales del dispositivo TROPOMI de la European Space Agency (ESA), se ha explorado la alternativa de visualización de contaminantes criterio mediante el uso de imágenes satelitales. Esta alternativa permite visualizar el panorama sobre el comportamiento de los contaminantes para grandes áreas de interés. El satélite utilizado es nuevamente TROPOMI cuyas imágenes son descargadas del repositorio de la NASA en línea "disc.gsfc.nasa.gov".

En la Figura 22 se presenta el promedio semanal de la columna atmosférica de: (a) NO₂, (b) O₃, (c) CO, (d) SO₂ e (e) Índice de absorción de aerosoles sobre el departamento de Caldas durante tres periodos comparativos: febrero 10 al 16 Normalidad económica, abril 6 al 12 cuarentena obligatoria y mayo 18 al 24 reapertura económica. De manera general se puede observar que las mayores concentraciones de NO₂, O₃ y CO se presentan hacia la zona oriente del departamento de Caldas durante todo el periodo de análisis. Mientras que para SO₂ e índice de aerosoles existe una mayor concentración en el sector centro sur del departamento (ciudad de Manizales y alrededores).

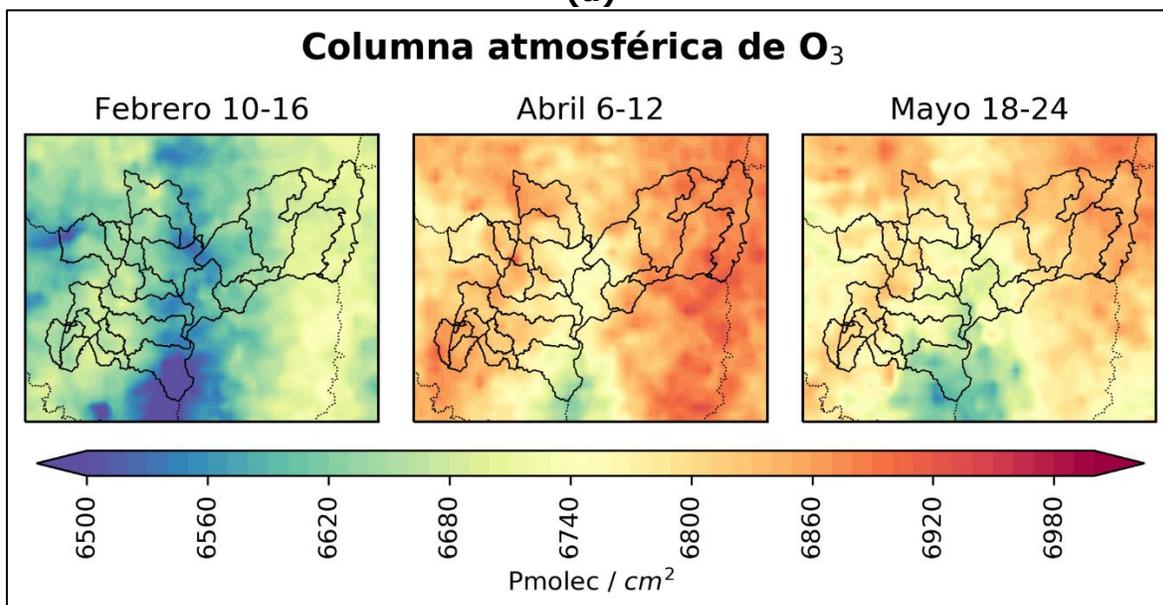
Para el caso de la columna atmosférica de O₃ se logra identificar un patrón similar al comportamiento observado en la troposfera, por otra parte las demás columnas de contaminantes parecen no haber tenido un efecto de reducción significativo durante el periodo de cuarentena obligatoria, no obstante es importante recalcar que esta columna incluye tanto el comportamiento en superficie como en la estratosfera, motivo por el cual no puede identificarse de manera clara el efecto favorable de las condiciones de cuarentena en la calidad del aire, pudiendo estar relacionados estas concentraciones a fenómenos de mayor escala como transporte regional.

De manera similar en la Figura 23 se presenta el comportamiento promedio semanal de la columna atmosférica de: (a) NO_2 , (b) O_3 , (c) CO , (d) SO_2 e (e) Índice de absorción de aerosoles sobre el país durante los mismos periodos. Se puede identificar que las mayores concentraciones para NO_2 , O_3 y CO se encuentran hacia la zona norte, mientras que para SO_2 e índice de aerosoles la distribución es más uniforme y no se cuenta con un patrón definido.

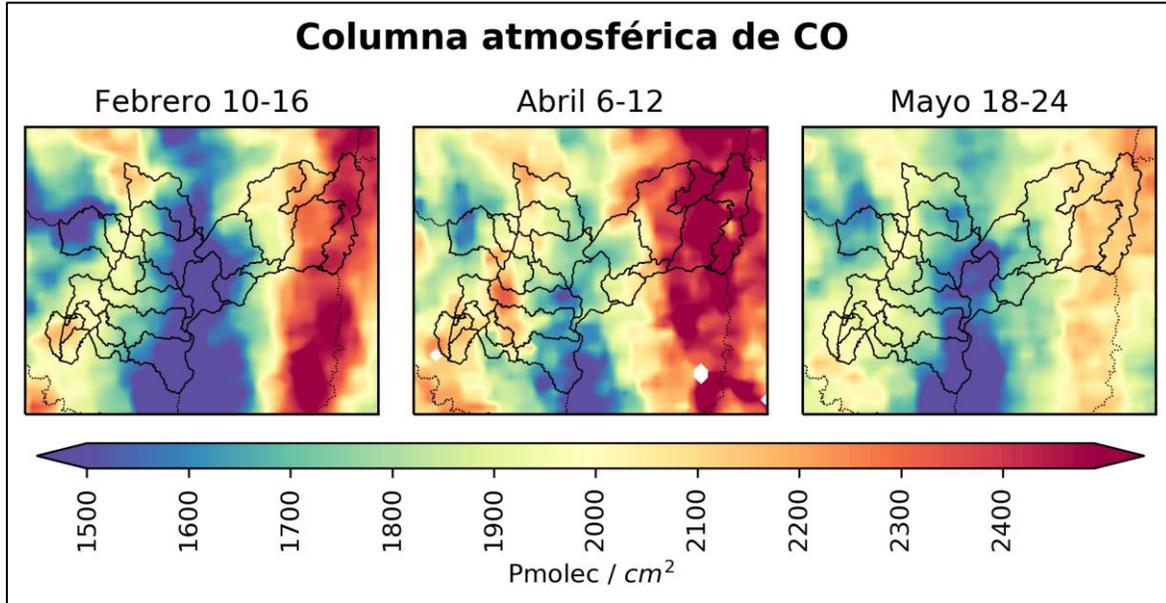
Adicionalmente, se puede observar que durante el periodo de cuarentena obligatorio (el cual aplicó para casi todas las regiones del país) no se presentó un efecto significativo en las concentraciones de la columna total observadas y por contrario aparentemente aumentaron durante este periodo, por lo que no se pueden descartar fenómenos de transporte intercontinental de estos contaminantes.



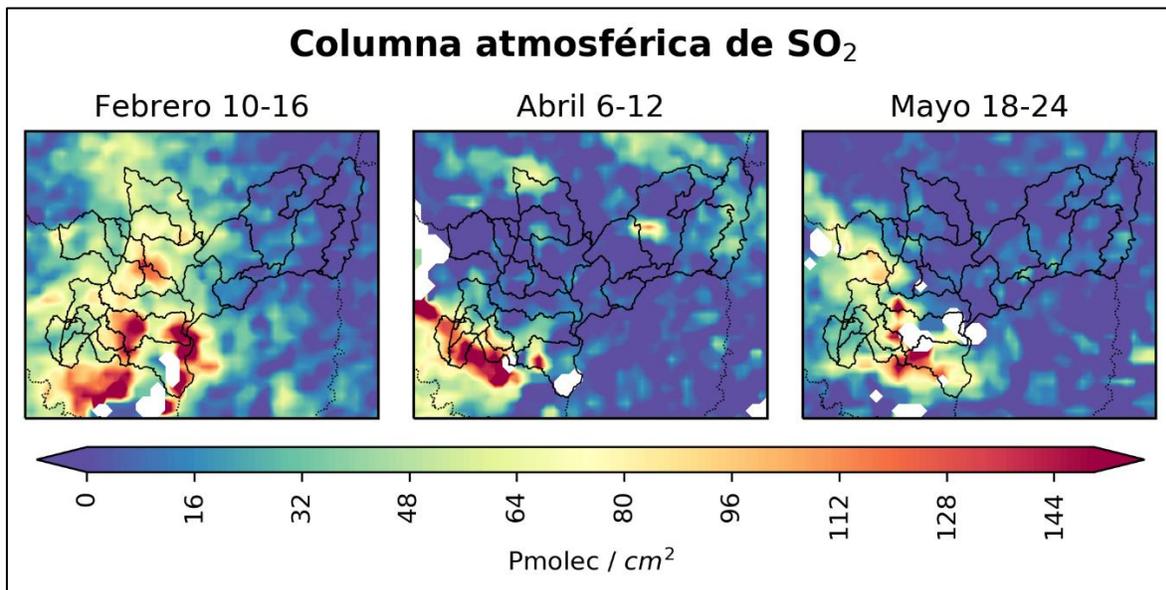
(a)



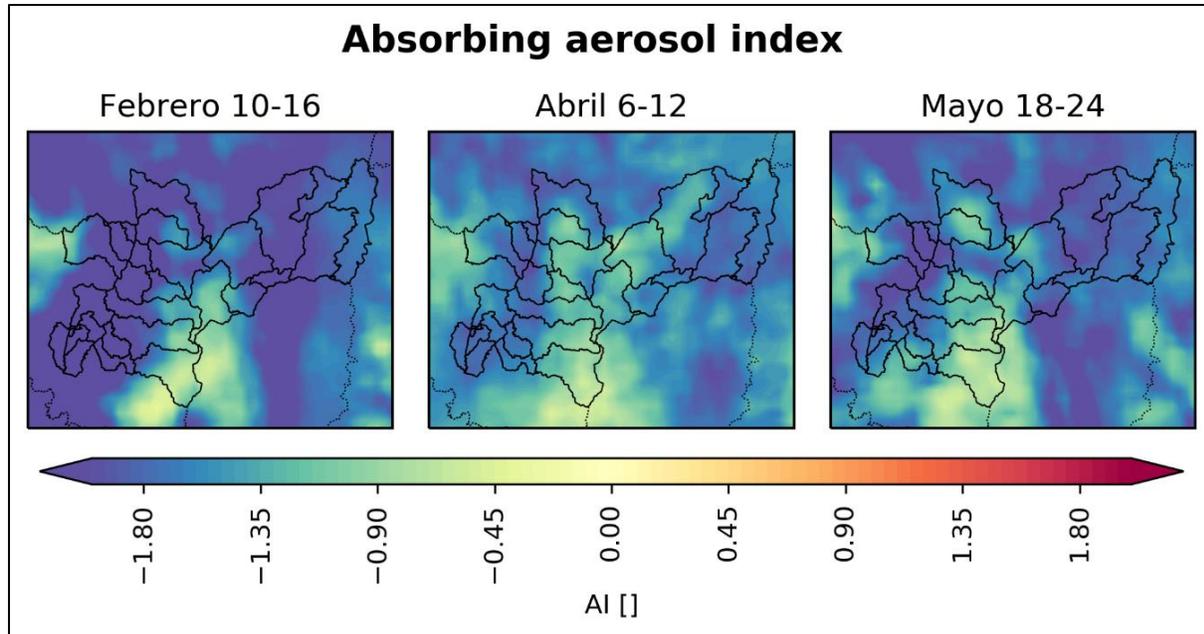
(b)



(c)

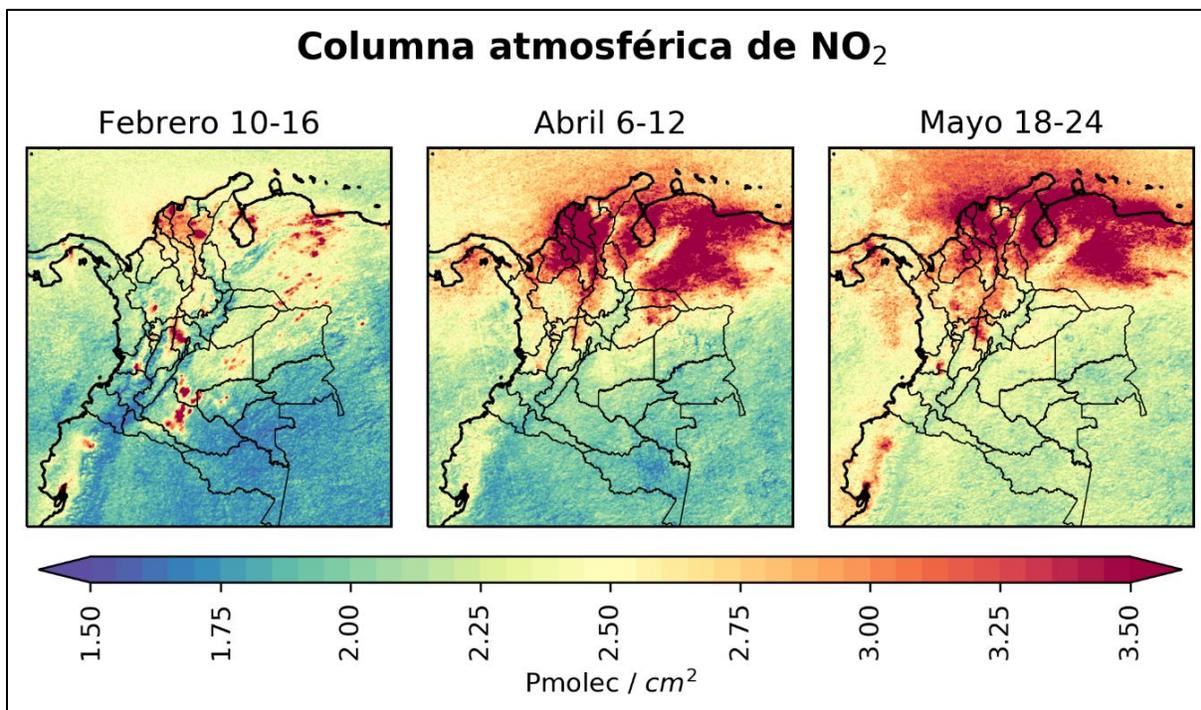


(d)

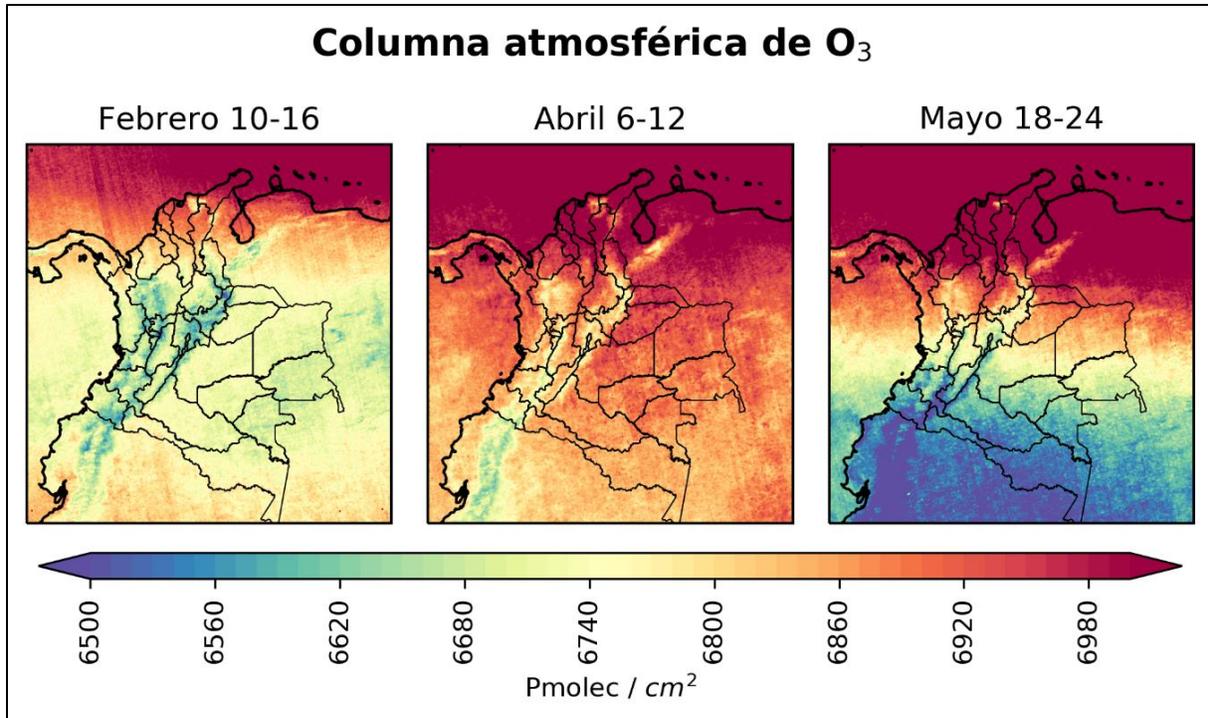


(e)

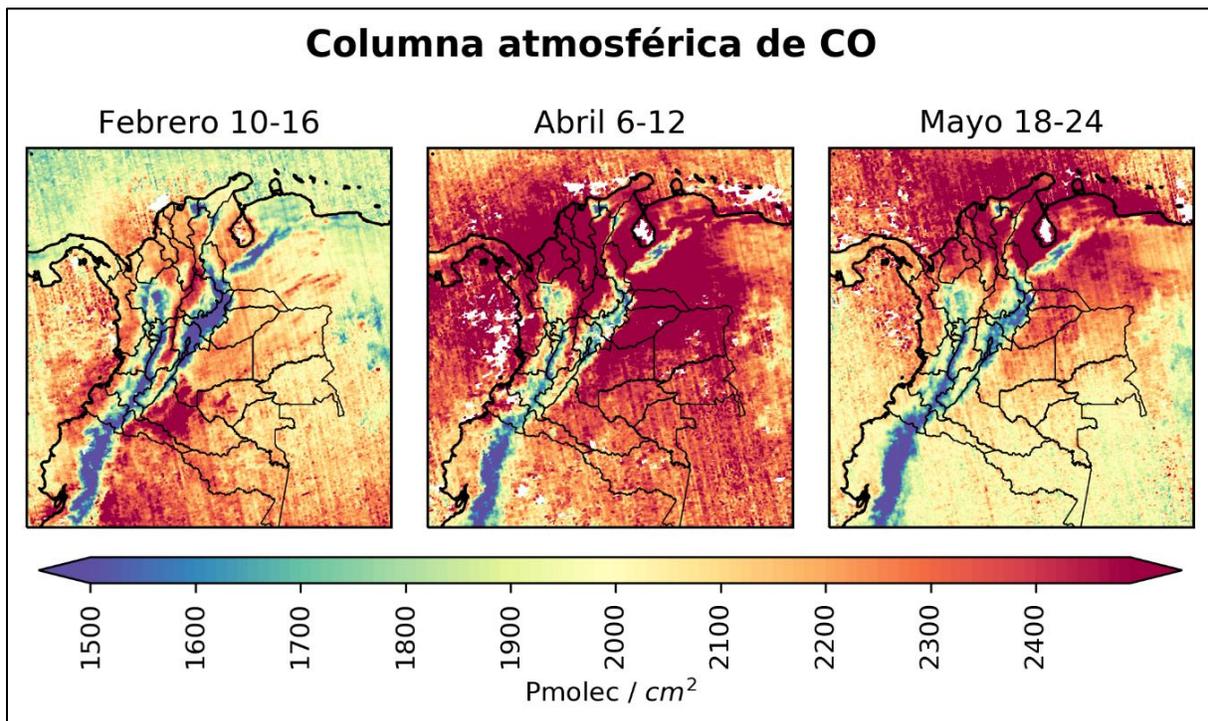
Figura 22. Imágenes satelitales relacionadas al comportamiento de la columna atmosférica promedio de contaminantes: (a) NO₂, (b) O₃, (c) CO, (d) SO₂ y (e) Índice de aerosoles sobre el departamento de Caldas durante los periodos de: normalidad económica (febrero 10-16), cuarentena obligatoria (abril 6-12) y reapertura económica (mayo 18-24). Satelite TROPOMI.



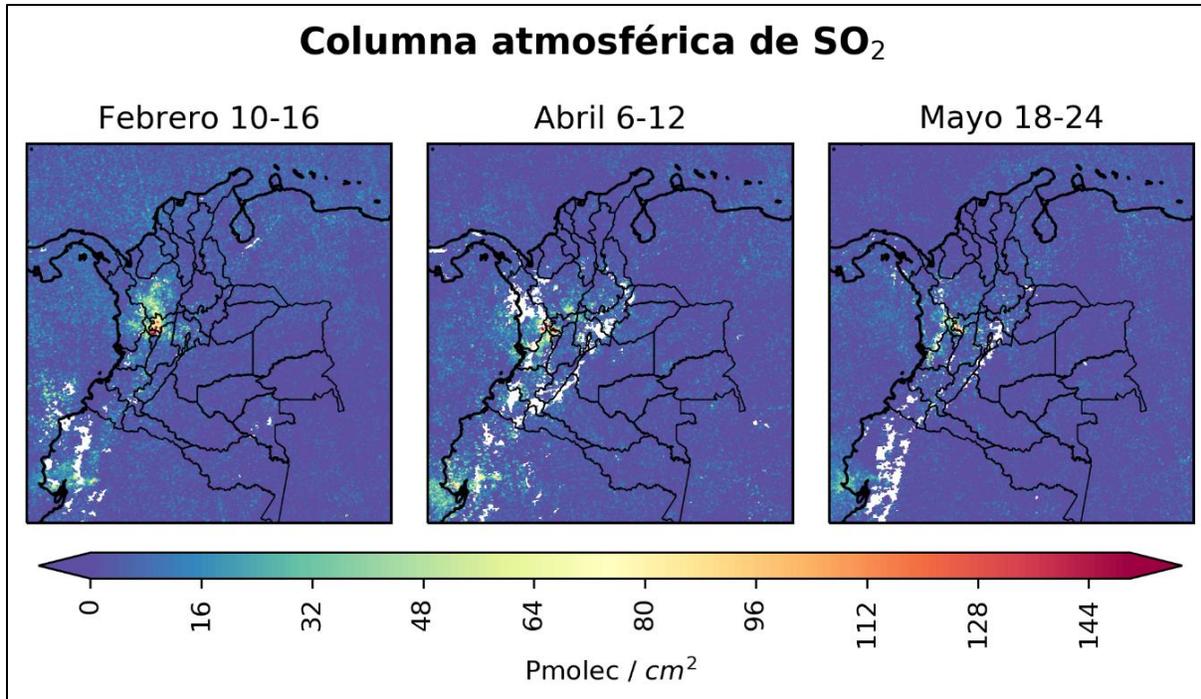
(a)



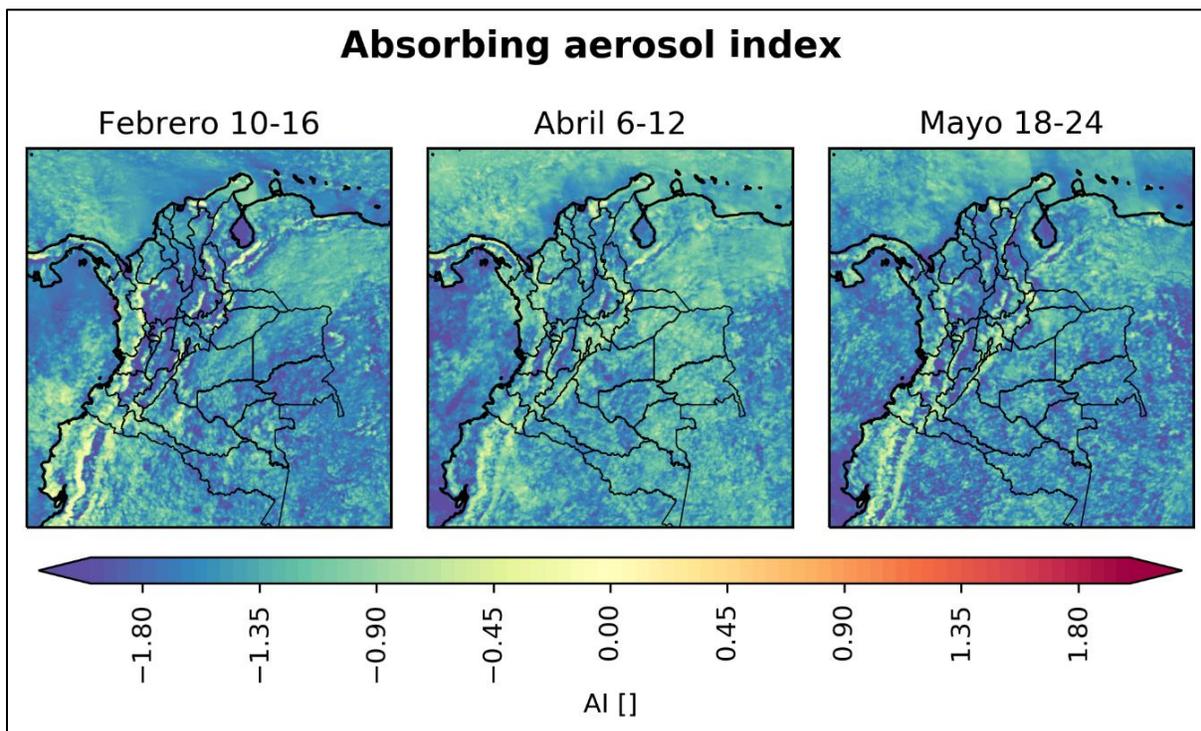
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 23. Imágenes satelitales relacionadas al comportamiento de la columna atmosférica promedio de contaminantes: (a) NO₂, (b) O₃, (c) CO, (d) SO₂ y (e) Índice de aerosoles sobre Colombia durante los periodos: normalidad económica (febrero 10-16), cuarentena obligatoria (abril 6-12) y reapertura económica (mayo 18-24). Satelite TROPOMI.

5.3. INCENDIO FORESTALES

No se descarta el posible efecto de la contaminación del aire debido a fenómenos a escala regional relacionados con los incendios forestales que ocurrieron durante los meses de febrero y marzo en la Orinoquía Colombo-venezolana, el Sumapaz y la zona caribe colombiana, fenómenos que fueron acrecentados por la temporada de bajas lluvias. Como ejemplo de ello se presenta la Figura 24 con algunos registros satelitales sobre las diferentes ubicaciones de los incendios forestales registrados por la plataforma "Zoom earth" los días 14 y 23 de marzo. Para más información consultar el link <https://zoom.earth>.



Figura 24 Registros satelitales de incendios forestales de escala regional. Plataforma libre de la NASA "ZOOM EARTH": Izquierda: 14/03/2020. Derecha: 23/03/2020

5.4. RELACIÓN ENTRE CONTAMINANTES, EJEMPLO ESTACIÓN GOBERNACIÓN

En la Figura 25 se presenta la variación promedio horaria para los contaminantes SO_2 , O_3 , CO y $PM_{2.5}$ - Automático en la estación Gobernación para lo corrido del año 2020. Se observa que el comportamiento a lo largo del día presenta un perfil similar para SO_2 , CO y $PM_{2.5}$ los cuales presentan picos de máxima concentración en las franjas horarias con alto tráfico vehicular, siendo esto un indicativo de que en Manizales estos son contaminantes primarios producto de fuentes vehiculares.

Por su parte, el O_3 presenta un comportamiento diferente a los demás contaminantes analizados ya que las mayores concentraciones de O_3 se presentan alrededor del mediodía, horas en donde se presenta la mayor radiación solar lo que favorece las reacciones de formación de O_3 , este comportamiento inverso ha sido observado por otros autores y se atribuye este fenómeno a las dinámicas de algunos contaminantes en las reacciones con los precursores del O_3 como los NO_x y $COV's$ ya sea de manera directa o indirecta (Sharma y colaboradores, 2017; Özbay y colaboradores, 2011).

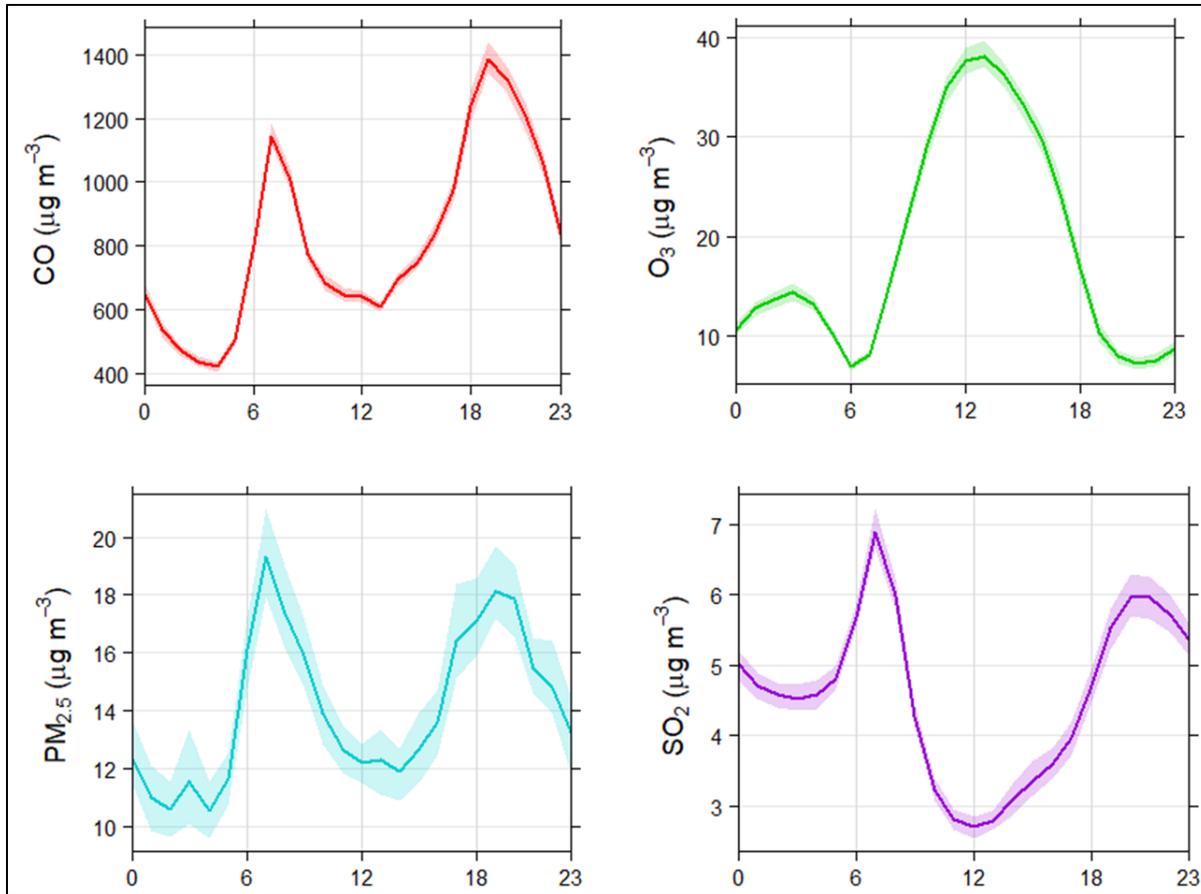


Figura 25. Comparación de perfiles promedio horarios de concentración de SO₂, O₃, PM_{2.5}-Automático y CO en la estación Gobernación durante el año 2020.

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.
- Corporacion autonoma regional de Caldas (Corpocaldas) y Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales (Unal), 2019. Boletín de calidad del aire en Manizales período Enero – Marzo 2019, [Fuente en línea]. Disponible en: <http://www.corpocaldas.gov.co/publicaciones/543/Informe%20SVCA%20enero-marzo%202019.pdf>
- Corporacion autonoma regional de Caldas (Corpocaldas) y Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales (Unal), 2020. Actualizacion del inventario de emisiones atmosfericas en la ciudad de Manizales año base 2014. [En línea]. Disponible en:

http://cdiac.manizales.unal.edu.co/inicio/publicaciones/Boletin_trimestral_Red_Calidad_del_Aire_Enero-Marzo_2020.pdf

- Cuesta A., Wahl M., Acosta J., García J., Aristizábal B.H, 2020. Mixing layer height and slope wind oscillation: Factor that control ambient air SO₂ in a tropical mountain city. *Sustainable cities and society*. Vol 52. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101852>
- Eurachem / CITAC, 2012. Quantifying uncertainty in analytical measurement. Third edition. QUAM:2012.P1
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), 2017. Resolución 2254 de 2017. Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. Bogotá, D.C., Colombia.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), 2010. Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. Bogotá, D.C., Colombia.
- M. Akyüz y H. Cabuk, «Meteorological variations of PM_{12.5}/PM₁₀ concentrations and particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Zonguldak,» *Journal of Hazardous Materials*, vol. 170, pp. 13-21, 2009.
- M. Akyüz y H. Cabuk, 2009. Meteorological variations of PM_{2.5}/PM₁₀ concentrations and particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment of Zonguldak. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 170, pp. 13-21.
- Li, J., 2017. *Estimación de un inventario de emisiones de compuestos orgánicos volátiles generados por fuentes biogénicas para el departamento de Caldas*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia
- Nasa, 2018. Global sulfur dioxide monitoring home page. Fuente en línea: [consultado el 02/03/2019]. Imágenes satelitales tomada de: <https://so2.gsfc.nasa.gov/>
- Özbay B., Keskin G., Dogruparmak S., Ayberk S., 2011. Multivariable methods for ground-level ozone modeling. *Atmospheric Reserch*. Vol 105, pp 57-65. DOI: 10.1016/j.atmosres.2011.06.005
- Servicio geológico colombiano (SGC), 2019. *Boletín semanal de actividad del volcán Nevado del Ruiz. Manizales, Caldas. Dirección de geoamenazas*.
- 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.
- Sengel, R., Gallardo, L., Fleming, Z. & Landeros, S., 2020. Two decades of ozone standard exceedances in Santiago de Chile. *Air Quality, Atmosphere & Health*.
- Shama A., Mandal T., Shama S., Shukla D., Singh S., 2017. Relationships of surface ozone with its precursors, particulate matter and meteorology over Dheli. *Atmospheric Chemistry*. 74, pp. 451-474. DOI: 10.1007/s10874-016-9351-7