

SIMAC

SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO AMBIENTAL DE CALDAS



BOLETÍN EXTRAORDINARIO II: EVOLUCIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN MANIZALES 2020, DURANTE LA CUARENTENA POR COVID – 19.

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

**Subdirección de Evaluación y Seguimiento
Ambiental CORPOCALDAS

RESUMEN

Se presenta en este informe los resultados del monitoreo de contaminantes atmosféricos realizado en la ciudad de Manizales durante el período comprendido entre 01 de enero hasta el 31 de mayo. Se realizó un análisis comparativo entre los períodos de cuarentena por COVID-19 y los períodos de normalidad económica. Los contaminantes analizados fueron: material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) – Automáticos y los gases monóxido de carbono (CO), ozono (O_3) y dióxido de azufre (SO_2). Se muestran las gráficas resumen obtenidas y tablas de estadísticos (promedio, mediana, mínimo, máximo, percentil 95 y desviación estándar). Asimismo, se presentan los resultados obtenidos para los índices de calidad del aire.

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

TABLA DE CONTENIDO

1. EL SISTEMA DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE EN MANIZALES (SVCA)	2
2. ANÁLISIS METEOROLÓGICO.....	4
3. RESULTADOS MONITOREO DE MATERIAL PARTICULADO: PM ₁₀ Y PM _{2.5} – AUTOMÁTICO DURANTE EL AÑO 2020.....	6
3.1. <i>Equipos automáticos PM₁₀ y PM_{2.5}: Análisis de promedios y comportamiento en la ciudad</i>	6
3.2. <i>Equipos automáticos: índice de calidad del aire (ICA) para PM₁₀ y PM_{2.5}</i>	12
4. RESULTADOS MONITOREO DE GASES.....	14
4.1. <i>Monitoreo de dióxido de azufre (SO₂)</i>	14
4.2. <i>Monitoreo de monóxido de carbono (CO)</i>	15
4.3. <i>Monitoreo de ozono troposférico (O₃)</i>	17
4.4. <i>Índices de calidad del aire (ICA) para CO, SO₂ Y O₃</i>	20
5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS	21
5.1. <i>Emisiones volcánicas</i>	21
5.2. <i>Imágenes satelitales</i>	23
6. REFERENCIAS	24

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

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 PM_{10} y $PM_{2.5}$ y una (1) estación automática para el monitoreo de los gases O_3 , SO_2 y CO ; además se cuenta con cinco (5) equipos manuales de PM_{10} 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 (PM_{10} y $PM_{2.5}$) en Manizales se realiza mediante técnicas de monitoreo activas. Los equipos automáticos de (PM_{10} y $PM_{2.5}$) y el seguimiento de gases (O_3 , SO_2 y CO) permiten la obtención de registros cincominutales, 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.

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 22 con calle 23. Esta restricción sería paulatinamente flexibilizada pero no eliminada en su totalidad para el segundo período de reapertura económica.

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.

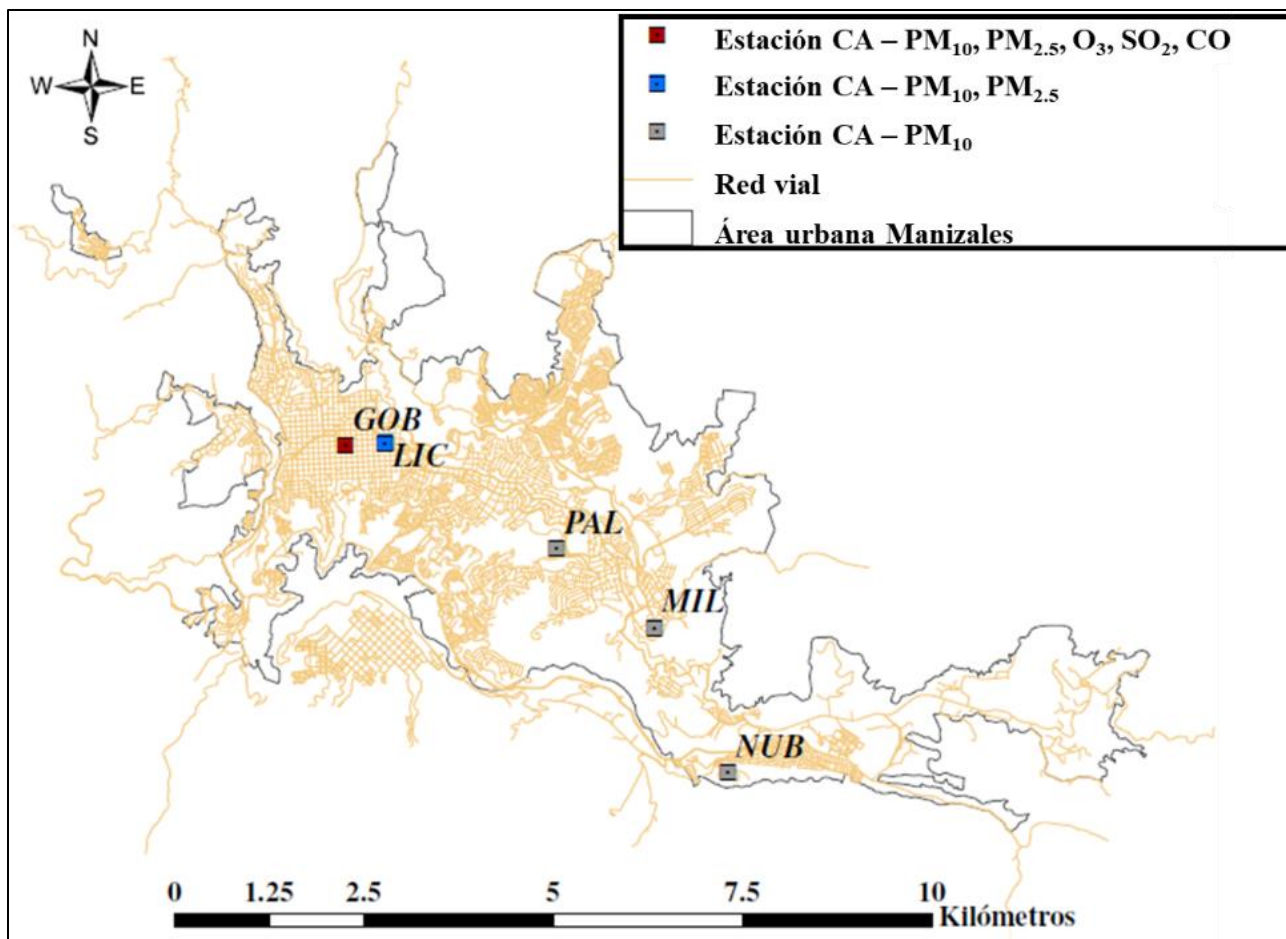


Figura 1. Mapa de Manizales con ubicación de las estaciones de calidad del aire.

2. ANÁLISIS METEOROLÓGICO

Las condiciones climáticas juegan un papel importante en la dinámica de los contaminantes en el aire. Existen contaminantes secundarios como el ozono troposférico (O_3), que dependen de la radiación directa del sol para formarse en el aire a partir de contaminantes primarios, emitidos directamente por fuentes antropogénicas y naturales. La humedad en el aire y la lluvia también tienen una influencia importante en la contaminación, especialmente con el material particulado. El aumento de la humedad relativa se asocia a un incremento en la humedad de las partículas, aumentando su peso, lo anterior acelera la velocidad de caída de las partículas suspendidas en el aire y la disminución de partículas resuspendidas (Loosmore y Cederwall, 2004). En el mismo sentido, la precipitación hace un lavado de la atmósfera, arrastrando hacia el suelo el material particulado del aire, este fenómeno se conoce como scavenging (Akyüz y Cabuk, 2009). Finalmente, la velocidad del viento influye en la concentración de contaminantes de forma inversa, puesto que a mayor velocidad del viento la dispersión de los contaminantes es mayor y su concentración en la atmósfera disminuye.

La Tabla 2 presenta el consolidado mensual de las variables meteorológicas para lo corrido del año 2020 de la estación Hospital de Caldas, ubicada en el centro geográfico de la ciudad de Manizales. Esta estación fue elegida como punto de referencia debido a que es una estación que ha presentado registros estables durante el tiempo de medición, se encuentra ubicada a más de 10m de altura (sobre la terraza del edificio del Hospital de Caldas) y se podría considerar una estación de tipo sinóptico representativa para la mayoría de las variables meteorológicas. No obstante, se aclara que todas las concentraciones estimadas para las estaciones de calidad del aire de la red se calculan con base en los datos de las estaciones meteorológicas más cercanas.

Del presente año, se puede destacar que los niveles de precipitación para lo corrido del año 2020 tuvieron un valor acumulado de 495.2 mm de lluvia. Adicionalmente se observó cómo los registros aumentaron hasta el mes de abril con un máximo de 146.2 mm (30% del total), seguido de una reducción para mayo con 57.4 mm (11% del total) indicando el inicio del período de bajas lluvias, un comportamiento típico característico al régimen bimodal de lluvias de la ciudad. Las demás variables meteorológicas: temperatura del aire, velocidad y dirección del viento, presión atmosférica, humedad relativa y radiación solar; se han mantenido con variaciones no mayores al 5%. Se destaca que la ciudad cuenta con patrones de viento estables identificados por el fenómeno de valle – montaña y montaña – valle, en donde las masas de aire cálidas ascienden hacia la parte alta de la cordillera durante el día, durante la noche este patrón se invierte cuando las masas de aire se enfrían ocasionado su descenso hacia la ciudad. Adicionalmente las bajas velocidades de viento impiden una rápida dispersión de los contaminantes.

Tabla 2. Estadísticos promedio mensuales para las variables de la estación meteorológica Hospital de Caldas durante el año 2020.

Mes	Temperatura del Aire [°C]	Velocidad de Viento [m/s]	Dirección Viento [°]	Presión Atmosférica [mm Hg]	Humedad Relativa [%]	Precipitación Acumulada* [mm]	Radiación Solar** [W/m ²]	Max. Rad. solar [W/m ²]
Enero	18.8	1.4	156	594.7	77	61.8	364.7	1164
Febrero	19	1.3	141	594.5	77.7	86.2	326.6	1202
Marzo	18.7	1.4	164.7	595.4	79.7	143.6	328.2	1306
Abril	18.2	1.1	150.7	595.8	84.7	146.2	261.4	1392
Mayo	18.9	1.1	127.4	595.2	82.6	57.4	275.7	1223
20 de marzo – 26 de abril	18.3	1.2	179.9	595.5	81.3	177	308.9	1392
27 de abril – 10 de mayo	18.8	1.1	144.8	595.4	82.9	14.6	267.8	1223
11 de mayo – 31 de mayo	18.8	1.2	92.1	595.4	82.7	41.6	267.4	1179

* Suma de la precipitación registrada en cada mes de monitoreo

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

3. RESULTADOS MONITOREO DE MATERIAL PARTICULADO: PM₁₀ Y PM_{2.5} – AUTOMÁTICO DURANTE EL AÑO 2020

3.1. Equipos automáticos PM₁₀ y PM_{2.5}: Análisis de promedios y comportamiento en la ciudad

La Figura 2 presenta el comportamiento temporal de las concentraciones de los equipos PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos (promedio diario) durante lo corrido del año 2020 para las estaciones Gobernación y Liceo. Se destaca allí el período de 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.

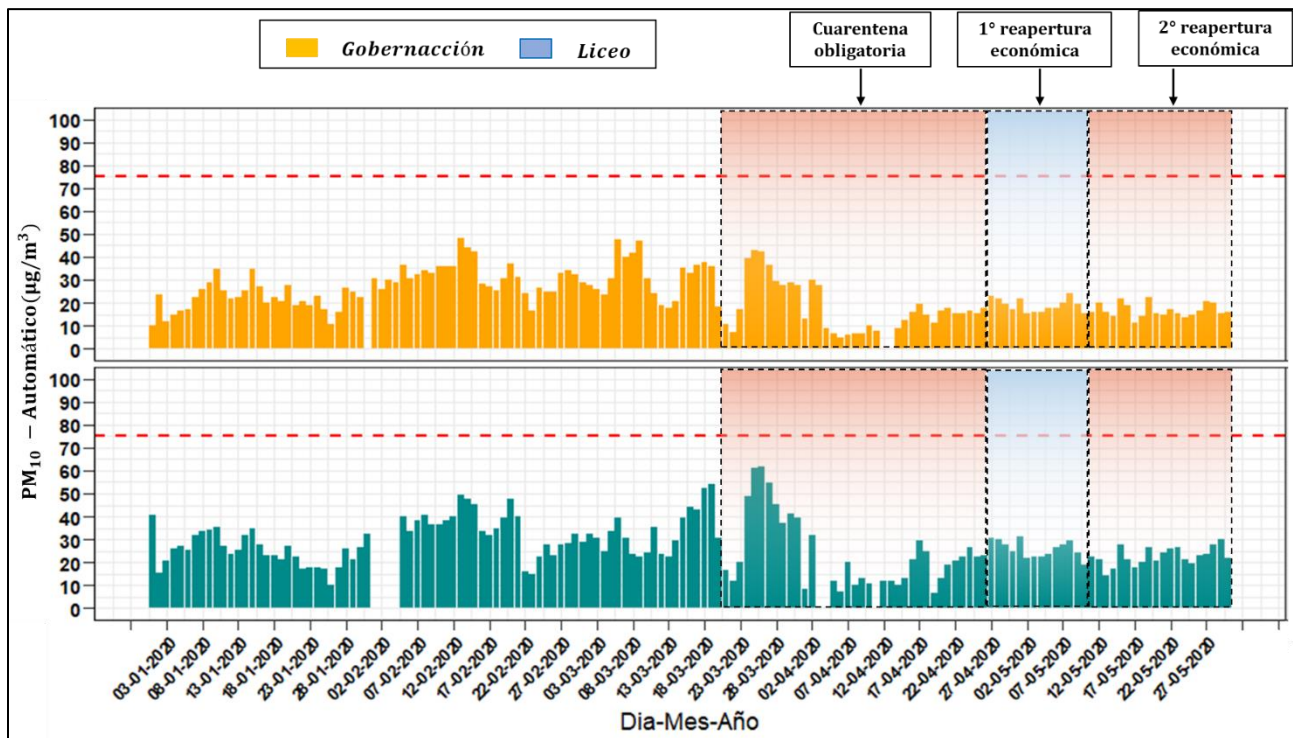
Se puede identificar inicialmente que durante los primeros días de restricción (entre el 23 de marzo y 3 de abril) las medidas tomadas no tuvieron un impacto significativo en las concentraciones obtenidas en ninguna de las estaciones, con registros similares a los días de normalidad económica (entre enero y marzo). No obstante, aproximadamente a partir de 01 de abril junto 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 µg/m³ para PM₁₀ y de 10 µg/m³ para PM_{2.5} en ambas estaciones.

En la Tabla 3 y Tabla 4 se presentan los estadísticos descriptivos comparativos de PM₁₀ 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 PM₁₀ y PM_{2.5} se encuentran alrededor de los 27.5 µg/m³ y 15.7 µg/m³ respectivamente. De otra parte, los promedios de Liceo para PM₁₀ y PM_{2.5} se encuentran alrededor de los 30.3 µg/m³ y 17.3 µg/m³ respectivamente.

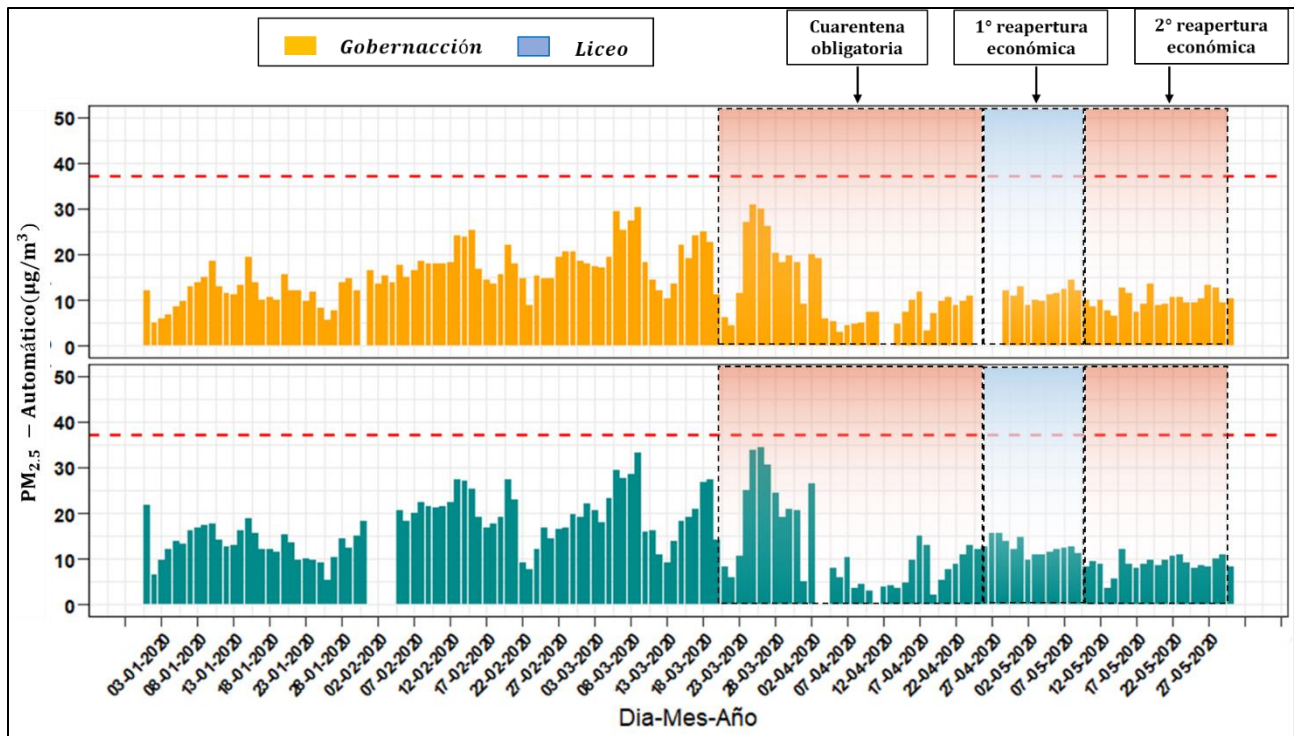
En la estación Gobernación, durante la primera etapa de las medidas de restricción los promedios de concentración presentaron una reducción del 33% para PM₁₀ y 23% para PM_{2.5} respecto a la normalidad de movilidad. Durante esta cuarentena obligatoria, se registraron las menores concentraciones anuales de estos caminantes con promedios diarios de 4.5 µg/m³ para PM₁₀ y 2.8 µg/m³ 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 PM₁₀ y 35% para PM_{2.5} comparados con los promedios de normalidad en movilidad. Este fenómeno de reducción se atribuye 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 PM₁₀ 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 - 26% para PM_{10} y 26 - 48% 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 3 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, por ejemplo para PM_{10} en la estación Gobernación se observa que las concentraciones promedio medianas durante la normalidad de movilidad, se encuentran alrededor de los $26.8 \mu g/m^3$. 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 y 40 % para la primera, segunda y tercera 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.



(a)



(b)

Figura 2. Evolución temporal de concentraciones diarias de los equipos PM_{10} y $PM_{2.5}$ - Automáticos durante el año 2020 en el SVCA de Manizales. (a) PM_{10} (b) $PM_{2.5}$. La línea punteada roja hace referencia a los límites máximos permisibles de promedio diario de PM_{10} y $PM_{2.5}$ respectivamente establecidos en la Resolución 2254 de 2017 de MADS: $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$.

Tabla 3. Estadísticos comparativos para la concentración de PM₁₀ (µg/m³) entre los registros del año 2020 y las etapas de cuarentena 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 de la cuarentena con reapertura de nuevos sectores económicos (11 de mayo al 31 de mayo)
GOBERNACIÓN				
Promedio*	27.5	18.3 ↓ 33%	19.0 ↓ 30%	16.9 ↓ 39%
Mediana	26.8	15.7 ↓ 41%	17.9 ↓ 33%	15.9 ↓ 40%
Desv. Est.	8.5	10.8	2.9	3.1
Min.	10.2	4.5	15.3	11.5
Max.	47.3	43.2	23.8	22.6
Percentil 95	42.7	40.3	23.1	21.8
N° de días	78	36	14	21
LICEO				
Promedio*	30.3	25.1 ↓ 17%	26.2 ↓ 13%	22.5 ↓ 26%
Mediana	29.7	20.7 ↓ 30%	25.1 ↓ 15%	21.5 ↓ 27%
Desv. Est.	9.1	15.7	3.2	3.9
Min.	10.0	6.8	21.9	14.3
Max.	49.6	61.9	31.1	29.8
Percentil 95	46.1	56.7	30.7	27.8
N° de días	75	35	14	21

*Promedio aritmético estimado a partir de datos promedio diarios del equipo.

Tabla 4. Estadísticos comparativos para la concentración de PM_{2.5} (µg/m³) entre los registros del año 2020 y las etapas de cuarentena 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 de la cuarentena con reapertura de nuevos sectores económicos (11 de mayo al 31 de mayo)
GOBERNACIÓN				
Promedio*	15.7	12.1 ↓ 23%	11.5 ↓ 26%	10.3 ↓ 35%
Mediana	15.1	9.9 ↓ 34%	11.4 ↓ 24%	10.1 ↓ 33%
Desv. Est.	5.4	7.9	1.6	2.1
Min.	4.9	2.8	8.8	6.4
Max.	30.1	30.7	14.2	14.0
Percentil 95	25.2	28.1	13.5	13.6
N° de días	78	35	11	21
LICEO				
Promedio*	17.3	12.8 ↓ 26%	12.6 ↓ 27%	8.9 ↓ 48%
Mediana	16.9	10.3 ↓ 39%	12.1 ↓ 28.4%	8.8 ↓ 48%
Desv. Est.	5.9	9.2	1.8	1.8
Min.	5.5	2.0	9.8	3.6
Max.	33.3	34.2	15.7	12.0
Percentil 95	27.5	31.5	15.6	11.1
N° de días	75	35	14	21

*Promedio aritmético estimado a partir de datos promedios diarios del equipo.

De forma alternativa se presenta la Figura 3 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 43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$. Por su parte la estación Gobernación registró valores de 38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$.

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 ascienden en la atmósfera y aumentan la altura de la capa límite planetaria, dando lugar a una mayor dispersión de los contaminantes emitidos (Cuesta y otros, 2020)

Adicionalmente, se observa de manera general el perfil promedio para los días de la semana, en donde se presenta una disminución del promedio diario para ambas estaciones durante los fines de semana. Especialmente para el domingo se obtuvo 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 $\text{PM}_{2.5}$ provienen de la misma fuente de emisión. Finalmente, en los promedios mensuales se identifica nuevamente el fenómeno de reducción relacionada a las medidas de restricción.

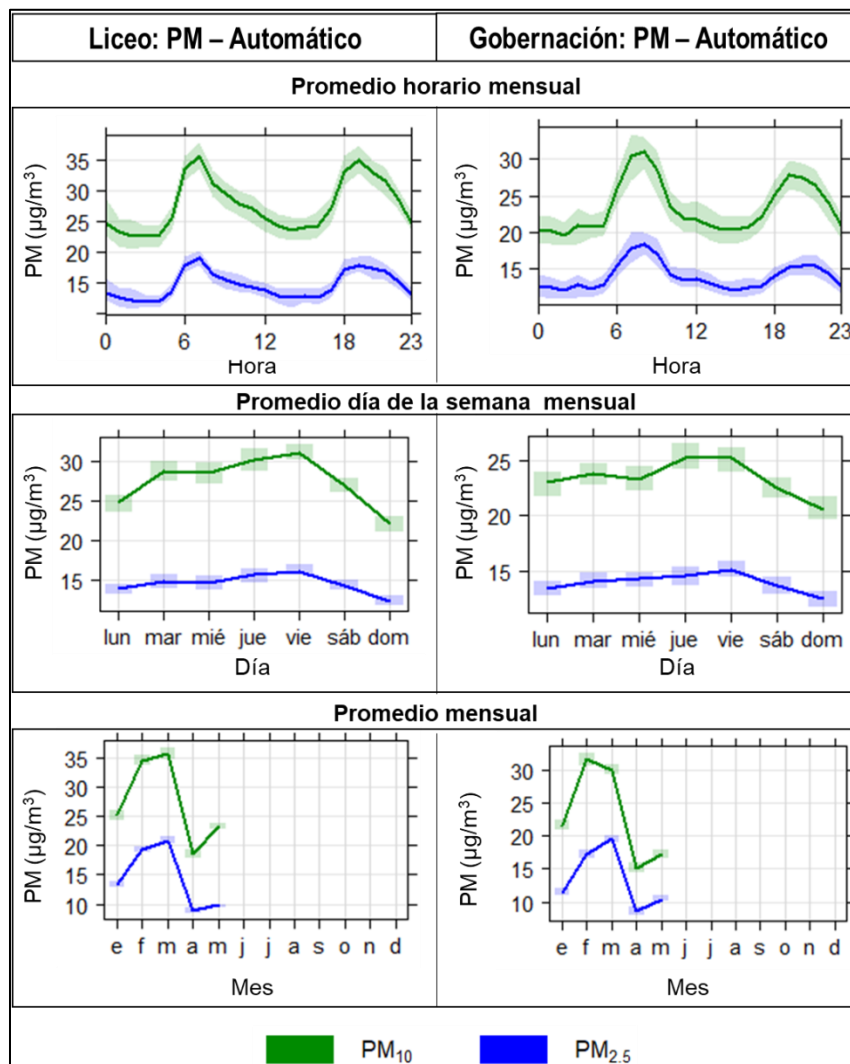


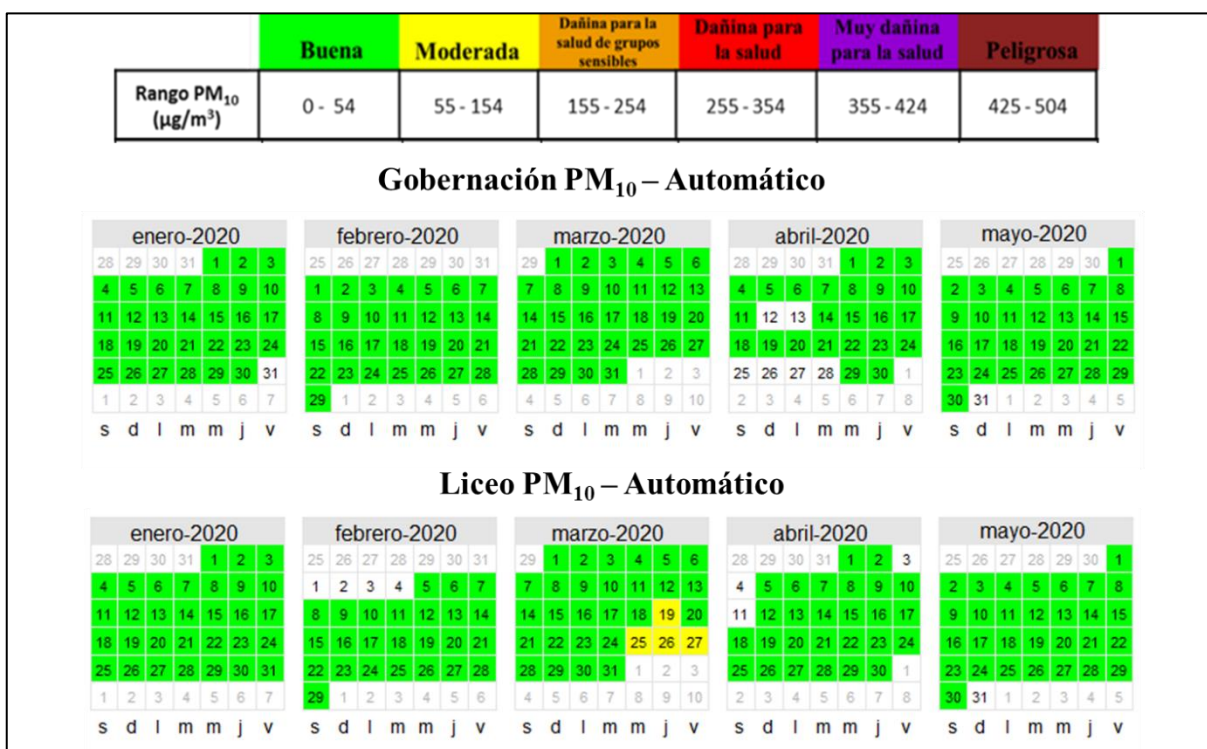
Figura 3. Promedio horario, semanal y mensual para PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ – Automáticos durante el año 2020 en las estaciones Gobernación y Liceo.

3.2. Equipos automáticos: índice de calidad del aire (ICA) para PM₁₀ y PM_{2.5}

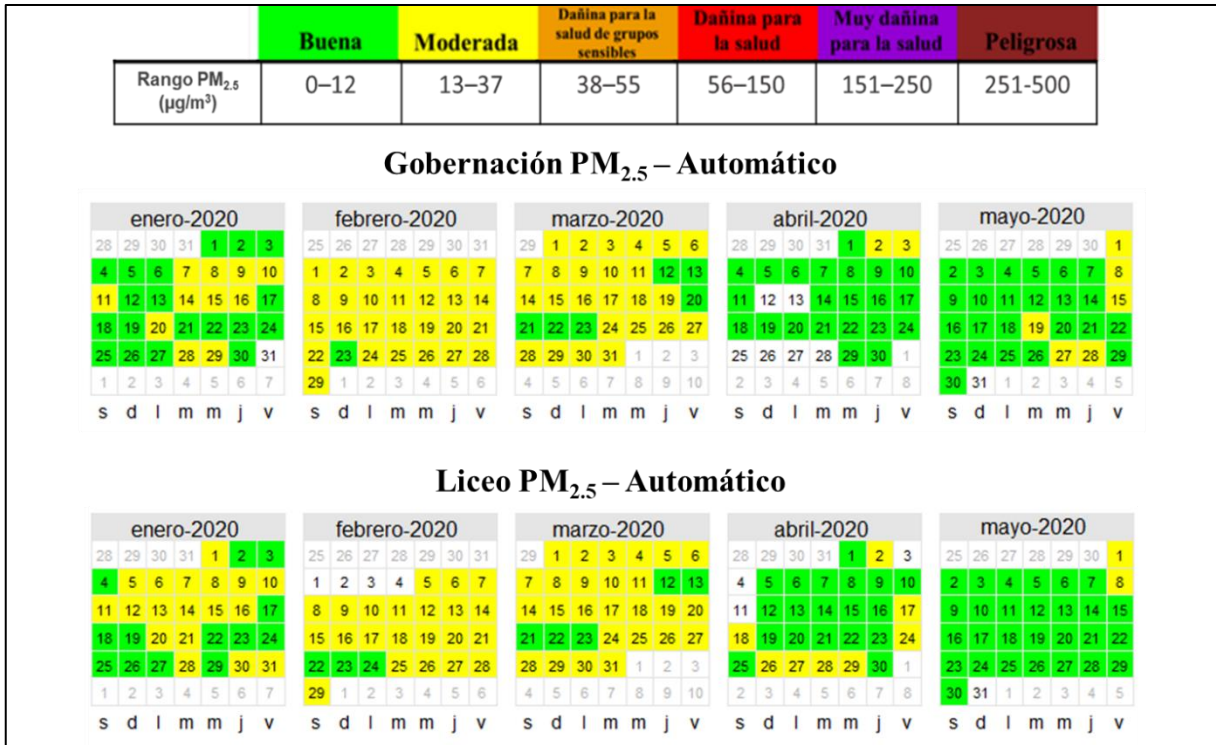
La Figura 4 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de PM – Automático. El ICA representa mediante un indicador de color, el estado de la calidad del aire de acuerdo con la concentración de material particulado y su posible afectación a la salud. Para el 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).

Se destaca que, con base en la concentración de PM₁₀, la calidad del aire se clasificó como buena en más del 95% de los días y ocurrió una reducción del presente indicador en la estación Liceo para los días 19, 25, 26 y 27 de marzo, fenómenos sin explicación atribuible. De otra parte, para el caso de PM_{2.5} en ambas estaciones se tuvo un promedio del 48% de calidad del aire en estado moderado, el cual al ser una fracción del PM más pequeña posee mayor afectación a salud humana. Se destaca la importancia de continuar con medidas que permitan identificar escenarios de riesgo para la ciudadanía.

De igual manera 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 un 25% de días con calidad del aire moderado desde el 20 de marzo, día en que se iniciaron las medidas de restricción.



(a)



(b)

Figura 4. Índice de Calidad del Aire (ICA) para (a) PM₁₀ – Automático (b) PM_{2.5} – Automático en las estaciones Gobernación y Liceo durante el año 2020. Basado en la resolución 2254 de 2017 de MADS.

4. RESULTADOS MONITOREO DE GASES

4.1. Monitoreo de dióxido de azufre (SO₂)

La Figura 5 muestra la evolución de concentraciones horarias de SO₂ durante lo corrido del año 2020, destacando el período de las dinámicas restrictivas tomadas por las autoridades para enfrentar el COVID-19. Se puede identificar la reducción de picos de concentración máximos con valores que no superaron los 6 µg/m³ para el período de restricciones, 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, se observa un comportamiento estable a lo largo del período de cuarentena con promedios alrededor de los 2 µg/m³.

En la Tabla 5 se presentan los estadísticos descriptivos comparativos durante el período de análisis. Se observa que las concentraciones horarias promedio durante la normalidad económica, se encuentran alrededor de los de 4.1 µg/m³, observándose una reducción de hasta 49% a causa de las restricciones de movilidad con promedios alrededor de 2.2 µg/m³. Fenómeno atribuible posiblemente al cierre de vías de la ciudad que redujeron el flujo vehicular, reducción de fuentes de emisión que utilizan combustibles con contenido de azufre como gasolina y diésel. Adicionalmente se resalta la baja actividad volcánica durante el período de cuarentena (ver sección 5.1) (Cuesta y otros, 2020; SGC, 2020).

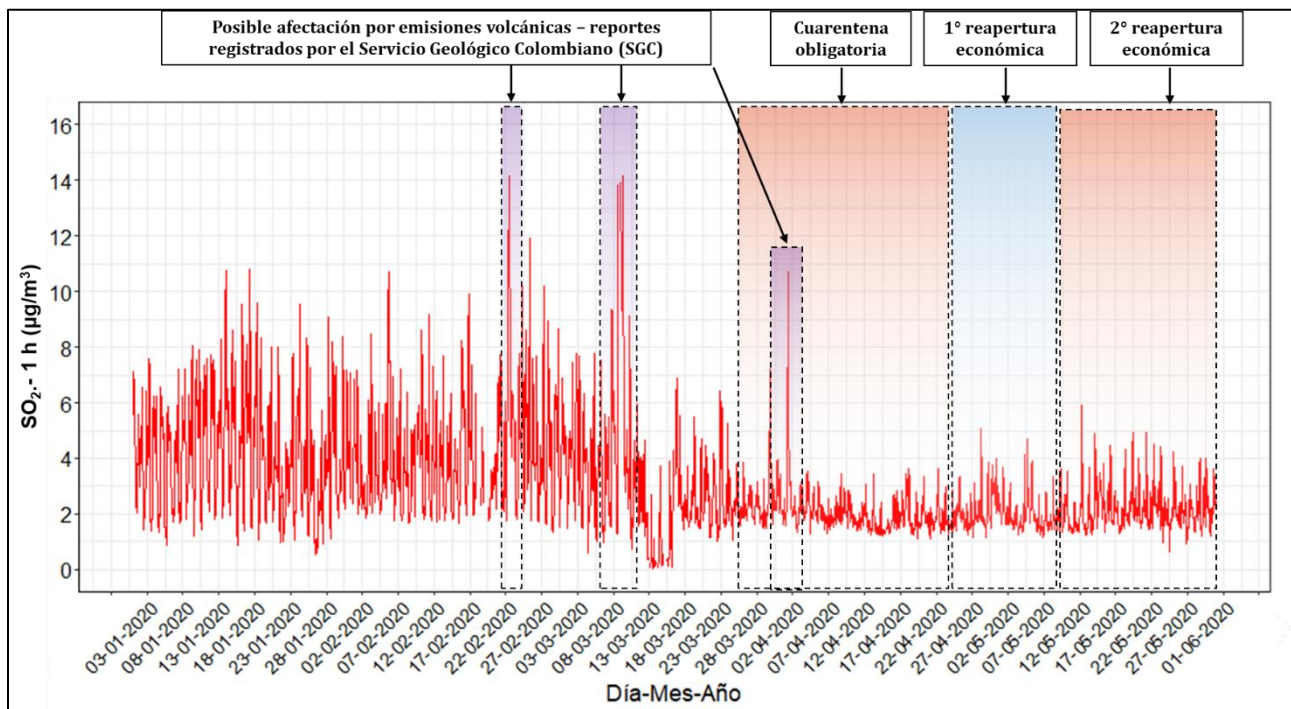


Figura 5. Variación de concentración promedio horario de dióxido de azufre (SO₂) durante el año 2020. El nivel máximo permisible horario de la Resolución 2254 de 2017 (100 µg/m³) no fue superado en ningún día.

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 5 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 $3.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. 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 y 47 % para la primera, segunda y tercera etapa respectivamente. Los porcentajes de disminución obtenidos a partir de la mediana fueron similares a los obtenidos con la media.

Tabla 5. 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 de la cuarentena con reapertura de nuevos sectores económicos (11 de mayo al 31 de mayo)
Promedio*	4.1	2.2 ↓ 47%	2.1 ↓ 49%	2.2 ↓ 46%
Mediana	3.7	1.9 ↓ 48%	2.0 ↓ 46%	2.0 ↓ 46%
Desv. Est.	2.6	0.9	0.6	0.7
Min.	0.0	1.0	1.2	0.6
Max.	32.0	10.7	5.1	5.9
Percentil 95	7.6	3.5	3.4	3.7
N° de días	1772	888	312	480

*Promedio aritmético estimado a partir de datos promedios horarios del equipo.

4.2. Monitoreo de monóxido de carbono (CO)

La Figura 6 presenta los resultados del monitoreo de CO durante lo corrido del año 2020, destacando el período de las dinámicas restrictivas tomadas por las autoridades para enfrentar el COVID-19. De manera similar al SO_2 , se puede identificar la reducción de picos de concentración máximos durante la cuarentena obligatoria con valores que no superaron los $800 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, a medida que ocurría la reapertura económica estos picos se han incrementado, indicando un aumento en la presencia de fuentes de emisión, en especial vehículos particulares y motos, 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 motos (Corpocaldas – Unal, 2019).

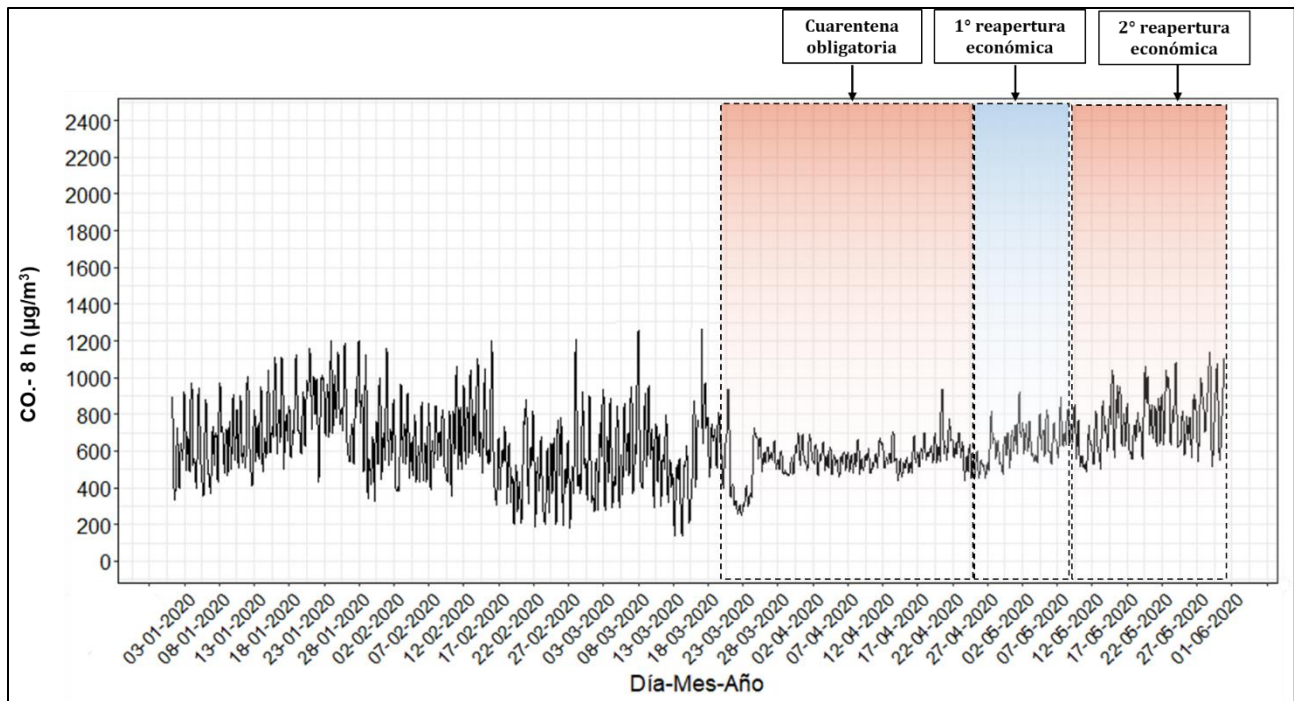


Figura 6. Variación de concentración promedio horario de monóxido de carbono (CO) durante el año 2020. El nivel máximo permisible horario de la Resolución 2254 de 2017 (35000 µg/m³) no fue superado en ningún día.

En la Tabla 6 se presentan los estadísticos descriptivos comparativos durante el período de análisis. Se observa que las concentraciones horarias promedio durante normalidad económica se encuentran alrededor de los de 653.6 µg/m³. Al comparar con la primera etapa de cuarentena se presentó una reducción del 15% con un promedio de 555.1 µg/m³, fenómeno atribuible a la ausencia casi total de fuentes de emisión debido a los primeros días de poca actividad económica. De otra parte, a medida que hubo reapertura económica en la segunda etapa, el promedio retornó a una variabilidad no significativa respecto a la encontrada durante los primeros meses del año. Finalmente, para la tercera etapa se registró un aumento del 18% de este contaminante con un valor promedio horario de 771 µg/m³, incremento relacionado a la intensificación paulatina de las fuentes de emisión que se incrementó hacia finales del mes de mayo, sumado a las bajas precipitaciones de este período de análisis (41.6 mm).

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 5 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 581.4 µg/m³. Al comparar con las etapas de la cuarentena, se observó que la variación en cada una de las etapas tuvo un comportamiento similar al obtenido con las concentraciones horarias promedio, teniendo una disminución del 8 % en la primera etapa, variabilidad no significativa en la segunda etapa con 3 % y un aumento del 24 % en la tercera etapa.

Cabe aclarar nuevamente que este fenómeno opuesto a PM₁₀ y PM_{2.5} está relacionado directamente con el tipo de vehículos como fuente de emisión, siendo el CO mayoritariamente dominado por motos 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.

Tabla 6. Estadísticos comparativos para la concentración de CO (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 de la cuarentena con reapertura de nuevos sectores económicos (11 de mayo al 31 de mayo)
Promedio*	653.6	555.1 ↓ 15%	666.5 → 2%	771.0 ↑ 18%
Mediana	581.4	536.8 ↓ 8%	598.5 → 3%	723.1 ↑ 24%
Desv. Est.	339.1	141.0	162.7	221.3
Min.	49.8	210.9	451.2	453.1
Max.	2044.4	1320.5	1320.5	1578.0
Percentil 95	1294.8	805.1	968.5	1204.9*
N° de días	1865	888	312	480

*Promedio aritmético estimado a partir de datos promedio horarios del equipo.

4.3. Monitoreo de ozono troposférico (O₃)

La Figura 8 presenta la evolución de concentraciones horarias de O₃ durante el 2020 se destaca allí el período de las dinámicas restrictivas tomadas por las autoridades para enfrentar el COVID-19. Para este contaminante en particular se presentaron fallas en el equipo de medición a lo largo del mes de febrero y mediados de marzo, no obstante se optó por realizar el ejercicio comparativo con los datos disponibles. Se puede identificar a primera vista que a diferencia de todos los contaminantes primarios anteriormente analizados, el O₃ presentó un aparente aumento durante los primeros días de la cuarentena obligatoria, y por el contrario, tras aperturas económicas ha disminuido su promedio.

En la Tabla 7 se presentan los estadísticos descriptivos comparativos durante el período de análisis. Se observa que las concentraciones horarias promedio durante normalidad de movilidad se encuentran alrededor de los de 17 µg/m³. Al comparar con la primera etapa de cuarentena se presentó un aumento del 35% con un promedio de 22.9 µg/m³, mientras que con la segunda etapa el incremento fue del 23% y finalmente en la tercera etapa disminuyó a concentraciones cercanas a los 15.6 µg/m³, 8% inferior respecto a la normalidad de movilidad a principios del año.

Por otro lado, teniendo en cuenta que estadísticamente la distribución de los datos no es normal, en la Tabla 7 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 $13.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Al comparar con las etapas de la cuarentena, se observó un aumento durante la primera y segunda etapa de cuarentena con valores del 57 y 47 % respectivamente, mientras que para la tercera etapa no se obtuvo una variabilidad significativa con valor similar a la etapa de normalidad.

Cabe resaltar que el O_3 es un contaminante secundario que es formado en la atmósfera debido a las reacciones fotoquímicas en presencia de contaminantes primarios como NO_x y COVs; ambos dominados por emisiones vehiculares. En este sentido y en contraposición con los resultados de CO, la disminución de emisiones de contaminantes primarios para la primera y segunda etapa pueden ser interpretadas como una reducción de emisiones de precursores como el NO_x debido al bajo tráfico vehicular; alterando así las reacciones de titulación que generan ozono desplazando el equilibrio hacia una mayor producción de este contaminante durante el día y reduciendo el consumo del mismo durante la noche, generando así un remanente atmosférico que aumenta los niveles de concentración.

Como primera aproximación se puede inferir que las concentraciones de O_3 en la ciudad de Manizales se encuentran dominadas por la presencia de COVs, de acuerdo con algunos estudios acerca de las isopletas de reacción de precursores de O_3 de la US-EPA (Research Commite, 1991). A medida que aumenta la generación de precursores en la segunda y tercera etapa, se presenta una competencia por el consumo de radicales hidroxilo (OH) presentes en el ambiente y la reacción de titulación es desplazada hacia un mayor consumo de O_3 , por consiguiente una reducción de las concentraciones observadas. Para dar un resultado concluyente, es necesario realizar un análisis de comportamiento histórico de ozono y compararlo con las dinámicas derivadas de la pandemia.

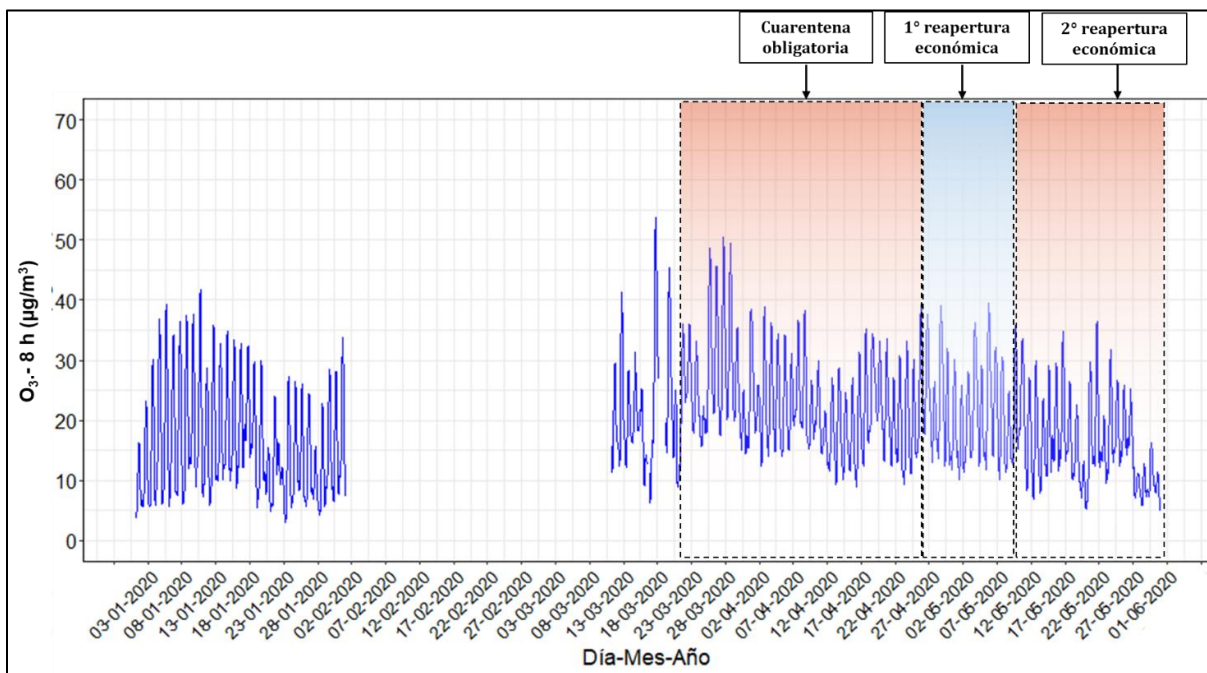


Figura 7. Variación de concentración promedio octohorario de O_3 para el período enero y mayo del 2020. El nivel máximo permisible octohorario de la Resolución 2254 de 2017 = $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no fue superado en ningún día.

De manera alternativa se presenta en la Figura 8 el resumen de la variación de O₃ y radiación Solar promedio horaria semanal 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 O₃ y radiación solar ocurren durante las 11:30 am y 3:00 pm del día, alcanzando concentraciones promedio cercana a los 33 µg/m³ y niveles de radiación promedio cercanos a los 320 W/m².

Para el período nocturno, sin presencia de radiación solar la concentración de O₃ disminuye aproximadamente el doble. Se presenta un pico de ozono entre la 1:00 am y 3:00 am con valores cercanos a los 16 µg/m³, este se asocia al transporte de O₃ generado durante el día hacia la parte alta de la cordillera que asciende por fenómenos térmicos y que posteriormente desciende durante la noche cuando el aire se enfría y pierde flotabilidad. Este es un fenómeno típico de circulación de vientos en ciudades valle – montaña.

Tabla 7. 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 de la cuarentena con reapertura de nuevos sectores económicos (11 de mayo al 31 de mayo)
Promedio*	17.0	22.9 ↑ 35%	20.9 ↑ 23%	15.6 ↓ 8%
Mediana	13.6	21.4 ↑ 57%	20.2 ↑ 47%	13.5 → 0%
Desv. Est.	11.8	10.3	9.7	8.7
Min.	2.1	3.5	3.0	2.4
Max.	61.9	54.6	46.2	40.9
Percentil 95	38.8	41.8	38.7	32.9
N° de días	908	888	312	480

*Promedio aritmético estimado a partir de datos promedios horarios del equipo.

Se identifica también que las concentraciones durante el día son aproximadamente 2 veces más elevadas que en las noches, con un promedio diurno de 27 µg/m³ y uno nocturno de 13 µg/m³. Se evidencia que los promedios durante la noche no presentan relación con los días de la semana, esto se asocia a que en la noche no existe radiación solar y por tanto no hay generación de ozono. De otra parte, los promedios diurnos y mensuales evidencian que las variaciones de O₃ 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 fuentes de emisión (lunes a viernes). Además, la posible disminución de emisiones de precursores como el NO_x debido al bajo tráfico vehicular de estos dos días, altera las reacciones de titulación que generan ozono desplazando el equilibrio hacia una mayor producción de este contaminante (Seinfeld y Pandis, 2006)..

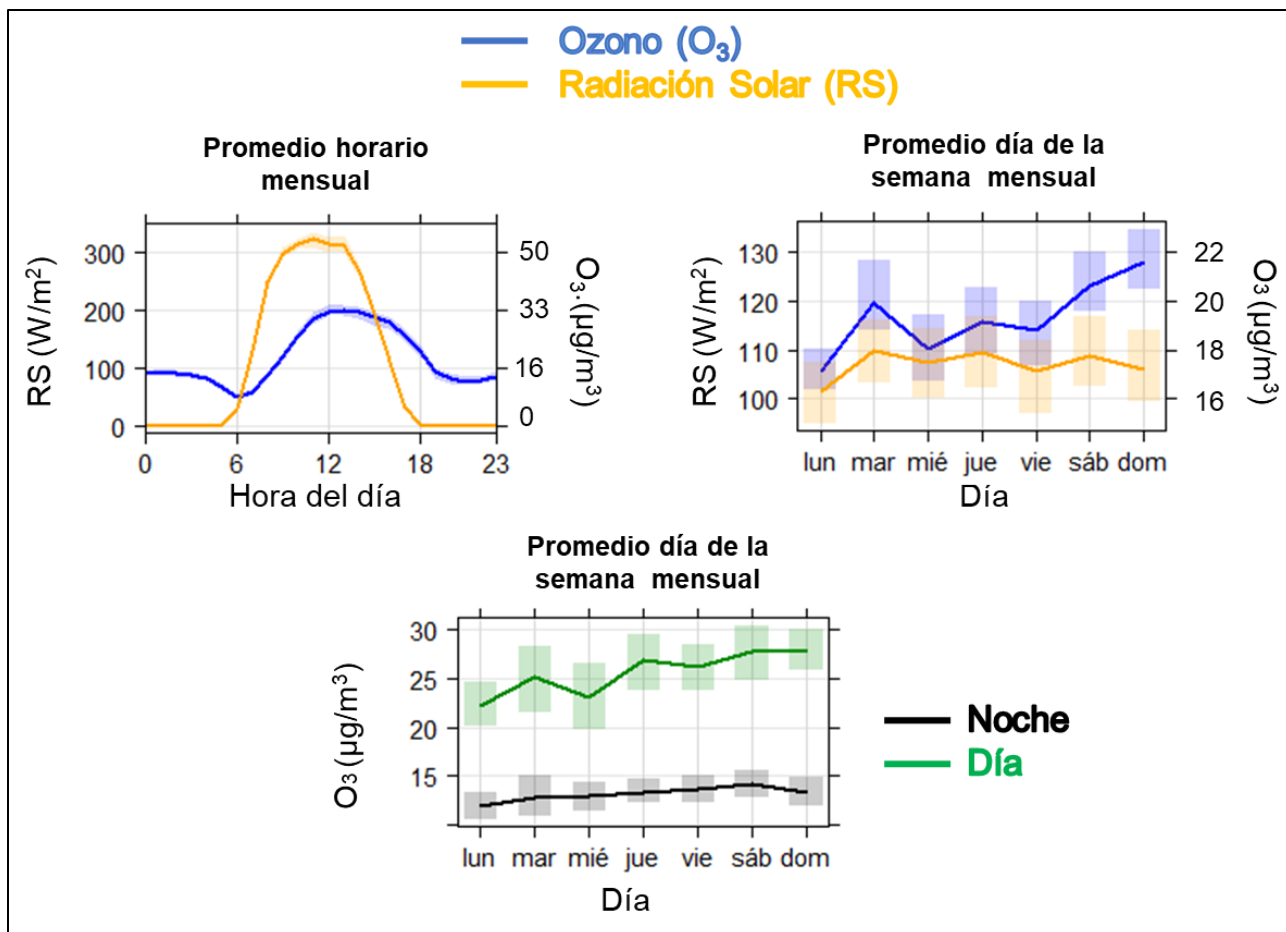


Figura 8. Variación promedio horaria y semanal de O_3 y radiación solar. Se incluye además el comportamiento promedio semanal entre las horas diurnas y nocturnas, durante el año 2020 en la estación Gobernación.

4.4. Índices de calidad del aire (ICA) para CO , SO_2 Y O_3

La Figura 9 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de CO , SO_2 y O_3 . Para el cálculo de este indicador (ICA) tanto en CO , SO_2 y O_3 se utiliza la metodología propuesta por la resolución 2254 de 2017 (capítulo IV artículo 18 al 21) del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (MADS 2017). Se destaca que la calidad del aire para estos contaminantes se clasificó como buena durante todo el período analizado.

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

Estación Gobernación CO (Octohorario)



Estación Gobernación SO₂ (horario)



Estación Gobernación O₃ (Octohorario)



Figura 9. Índice de calidad del aire (ICA) para CO, SO₂ y O₃ en Manizales durante el año 2020. Basado en la resolución 2254 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 8 se presenta un resumen con algunos de los días que tuvieron alturas en la columna de gases significativos (superiores a los 1200 metros), de éstos el 67% de los días reportados presentaron predominancia de vientos hacia el noroccidente, ubicación de Manizales, generando una posible afectación a la contaminación atmosférica por esta fuente en la ciudad. De manera alternativa se presentan dos ejemplos de las imágenes tomadas por el satélite "Sentinel 5P/TROPOMI" en la Figura 10 para los días 13 de febrero y 3 de marzo del 2020, donde se observa el comportamiento de la pluma del volcán y altas concentraciones de SO₂.

Tabla 8. Resumen de emisiones volcánicas significativas durante el año 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

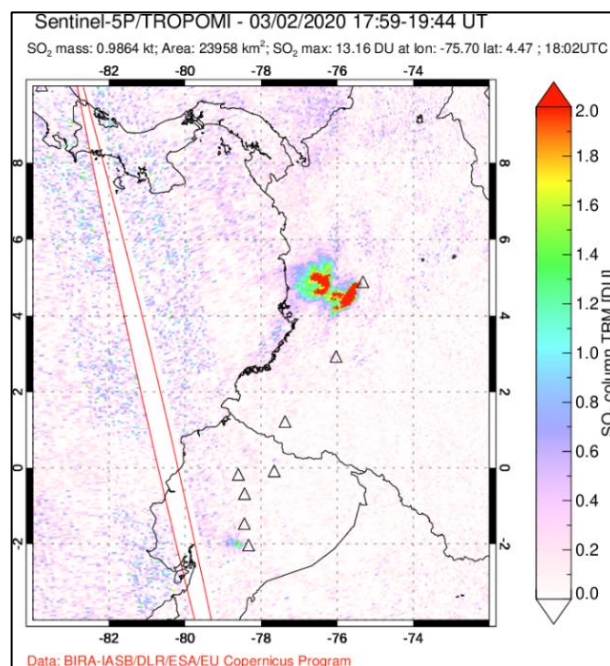
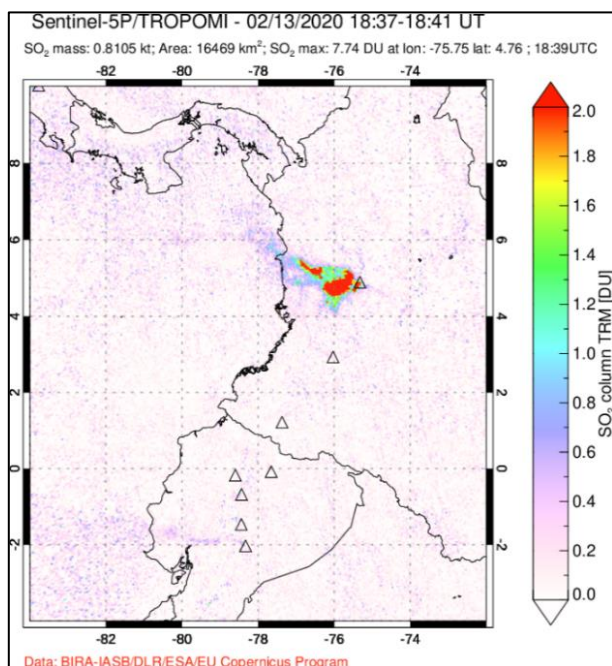


Figura 10. Ejemplos: Emisiones de SO₂ registradas por el satélite TROPOMI. Izquierda: Día viernes 02/13/2020. Derecha: Día martes 03/02/2020.

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 imágenes satelitales para contaminantes que no son actualmente medidos por el SVCA de Manizales. Esta alternativa permite visualizar el panorama sobre el comportamiento de los contaminantes el área seleccionada. El satélite utilizado es nuevamente TROPOMI cuyas imágenes son descargadas del repositorio de la NASA en línea "disc.gsfc.nasa.gov".

En la Figura 11 se muestra el promedio de la columna troposférica de NO_2 para una semana durante los meses de febrero, abril y mayo. De manera general, se puede observar que las mayores concentraciones de NO_2 se presentaron hacia la zona oriente del departamento de Caldas con promedios de concentración superiores a 1 moléculas/ cm^2 durante todo el periodo de análisis.

Para el caso de la ciudad de Manizales (señalada con una flecha) se puede observar que la columna de NO_2 presentó una disminución a medida que avanzó la cuarentena, obteniéndose el menor promedio para el mes de mayo con valores para la columna de NO_2 alrededor de los 0.5 moléculas/ cm^2 .

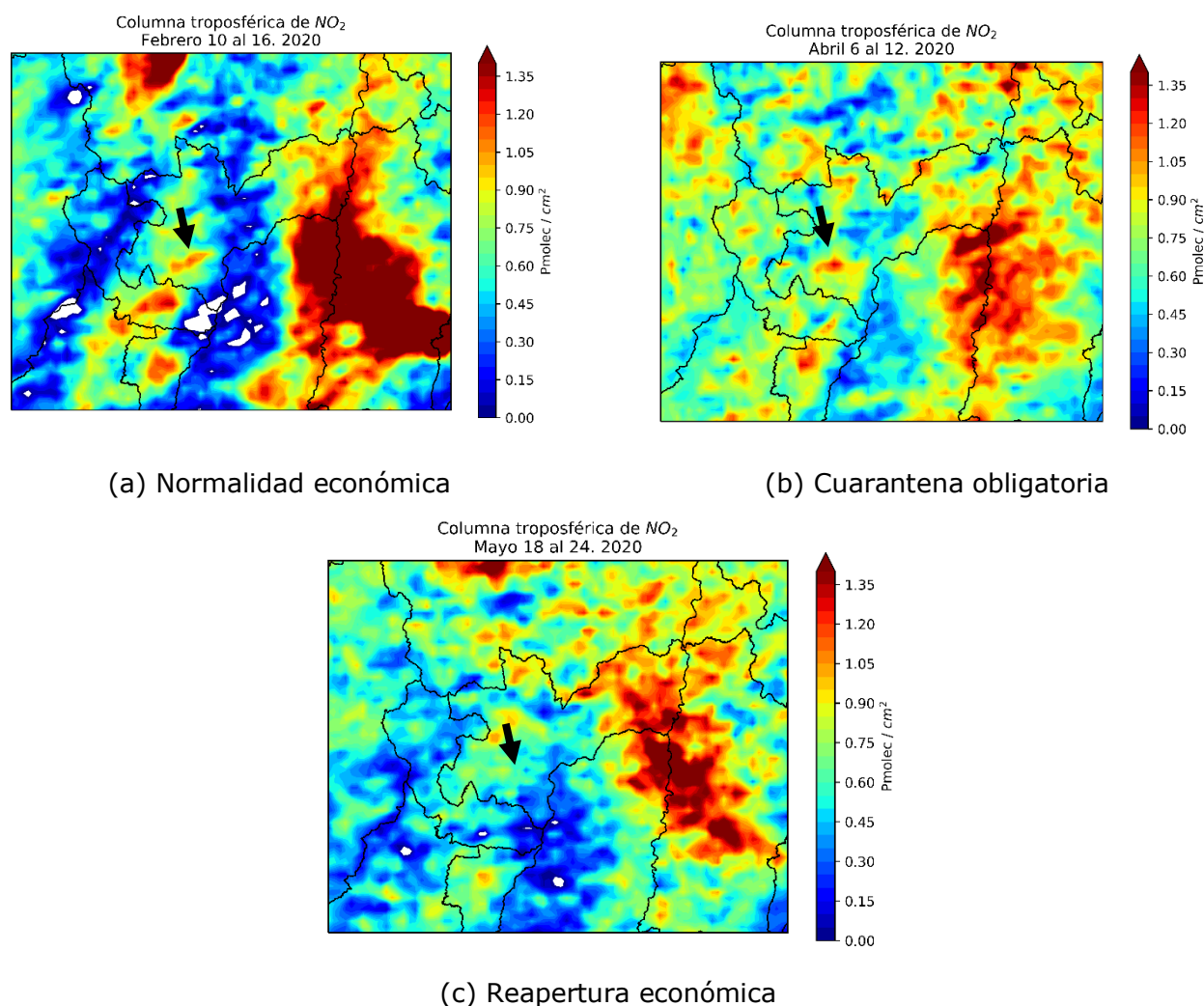


Figura 11. Imágenes satelitales relacionadas al comportamiento promedio del contaminante NO_2 sobre el departamento de Caldas para algunos períodos de interés. Satélite TROPOMI.

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.
- Research Commite, 1991. Rethinking the ozone problem in urban and regional air pollution. National academy press.
- Corporación Autónoma Regional de Caldas – CORPOCALDAS y Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales – UNAL, 2019. Actualización del inventario de emisiones atmosféricas en la ciudad de Manizales año base 2017. Manizales. Available online at: [http://cdiac.manizales.unal.edu.co/inicio/publicaciones/Boletín inventario de emisiones atmosféricas Manizales año base 2017.pdf](http://cdiac.manizales.unal.edu.co/inicio/publicaciones/Boletín_inventario_de_emisiones_atmosféricas_Manizales_año_base_2017.pdf)
- Cuesta, A. P., Wahl, M., Acosta, J. G., García Reynoso, J. A., y Aristizábal, B. H., 2020. Mixing layer height and slope wind oscillation: Factors that control ambient air SO₂ in a tropical mountain city. Sustainable Cities and Society, Vol. 52. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101852>
- Manizales campus universitario, 2020. La oficina de la bici. Fuente en línea. Disponible en: <https://www.manizalescampusuniversitario.com/oficina-de-la-bici/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), 2017. Resolución 2254 de 2017. Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones. Bogotá, D.C., Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), 2013. Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. Bogotá, D.C., Colombia.
- Nasa, 2018. Global sulfur dioxide monitoring home page. Fuente en línea: [consultado el 02/03/2020]. Imágenes satelitales tomada de: <https://so2.gsfc.nasa.gov/>
- Servicio geológico colombiano (SGC), 2020. Boletín semanal de actividad del volcán Nevado del Ruiz. Manizales, Caldas. Dirección de geoamenazas.
- Seinfeld J. y Pandis S., 2006. Atmospheric chemistry and physics from air pollution to climate change. 2nd edición.