

SIMAC

SISTEMA INTEGRADO DE MONITOREO AMBIENTAL DE CALDAS



BOLETÍN CALIDAD DEL AIRE MANIZALES AÑO 2021



*Angel David Gálvez Serna, *Erika Marcela Trejos Zapata,
*Carlos Mario González Duque, **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 consolidados del monitoreo de contaminantes atmosféricos realizado en la ciudad de Manizales durante el período de enero a diciembre de 2021. Se realizó el seguimiento de material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) mediante equipos manuales y automáticos; así como medición de los gases: ozono troposférico (O_3), dióxido de azufre (SO_2) y monóxido de carbono (CO) con analizadores automáticos. Se presentan las gráficas resumen obtenidas y tablas de estadísticos (promedio, mediana, desviación estándar, mínimo, máximo y percentil 95). Finalmente, se muestran los resultados obtenidos para los índices de calidad del aire (ICA), así como otros análisis complementarios que buscan la comprensión del fenómeno de calidad del aire en la ciudad.



Estación PM_{10} – Manual Liceo.
Terraza Liceo Isabel la Católica



Cabina de gases, equipos de PM_{10} manual y automáticos Gobernación.
Terraza licorera gobernación de Caldas

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| 1. EL SISTEMA DE VIGILANCIA DE CALIDAD DEL AIRE (SVCA) DE MANIZALES | 3 |
| 2. ANÁLISIS METEOROLÓGICO | 6 |
| 3. RESULTADOS DE MONITOREO PARA PM ₁₀ Y PM _{2.5} | 11 |
| 3.1. Equipos manuales: Análisis de promedios diarios y mensuales | 11 |
| 3.2. Equipos manuales: Comparación con la norma anual | 16 |
| 3.3. Equipos automáticos: Análisis de promedios diarios y mensuales | 17 |
| 3.4. Índice de calidad del aire (ICA) para PM ₁₀ y PM _{2.5} en el SVCA de Manizales | 20 |
| 4. RESULTADOS DE MONITOREO PARA GASES | 26 |
| 4.1. Monitoreo de monóxido de carbono (CO) | 26 |
| 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 O ₃ , SO ₂ y CO en el SVCA de Manizales | 35 |
| 5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS | 36 |
| 5.1. Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz | 36 |
| 6. REFERENCIAS | 38 |

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

En la actualidad, la contaminación atmosférica corresponde al cuarto factor de riesgo para la salud humana, después de fumar, la hipertensión y la diabetes (Our World in data, 2020). Durante la última década, el crecimiento poblacional y las actividades industriales han incrementado considerablemente las emisiones de contaminantes y sus niveles en aire ambiente. Entre los contaminantes de interés en zonas urbanas se destacan el material particulado (PM, por sus siglas en inglés), el cual puede ser clasificado de acuerdo con el diámetro de las partículas. Las fracciones más comunes monitoreadas en sistemas de vigilancia son: (1) Partículas suspendidas totales (PST), (2) Partículas con diámetro menor o igual a 10 micrómetros (PM_{10}) y (3) Partículas con diámetro menor o igual a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), conocidas también como fracción fina respirable. Además, contaminantes gaseosos como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2) y ozono troposférico (O_3) generan impactos negativos sobre el recurso aire en ecosistemas naturales y centros urbanos (OMS, 2018).

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, es un insumo para establecer medidas de prevención donde la calidad del aire sea catalogada como perjudicial para la salud. Los datos obtenidos por el SVCA de Manizales 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.

Para el 2021 en la ciudad de Manizales se cuenta con un SVCA conformado por nueve (9) equipos para el monitoreo de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$: Seis (6) equipos manuales de PM_{10} , un (1) equipo manual de $PM_{2.5}$ y dos (2) equipos automáticos (nefelómetros) que miden simultáneamente PM_{10} y $PM_{2.5}$. Además, el SVCA de Manizales cuenta con una (1) estación automática para el monitoreo de los gases ozono troposférico (O_3), dióxido de azufre (SO_2) y monóxido de carbono (CO).

El seguimiento de PM_{10} y $PM_{2.5}$ se realiza mediante técnicas de monitoreo activas; en el caso de los equipos manuales permite la obtención de registros promedio diario de la concentración en aire ambiente de dichos contaminantes (muestras de 24 horas cada tres días). Por otra parte, tanto los equipos automáticos de PM_{10} y $PM_{2.5}$, como el seguimiento de gases (O_3 , SO_2 y CO) permiten la obtención de registros cinco minútales, a partir de los cuales se obtienen valores 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).

Actualmente el SVCA de Manizales es operado 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 Tabla 1 presenta las características principales de cada estación perteneciente al SVCA de Manizales y la Figura 1 muestra la ubicación espacial de las estaciones de monitoreo sobre el área urbana de la ciudad.

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

| Estación (Abreviatura) | Características y fuentes de contaminantes* | Equipos | Propietario | Año de óptima operación | Estado actual | Latitud / Longitud | Altitud msnm |
|------------------------|---|--|-------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------------------|--------------|
| Gobernación (Gob) | CU, SC – MTV, PAI | PM ₁₀ – Manual ^a | Corpocaldas | 2009 | Operación óptima. | N 5° 4' 6.53" W 75° 31' 1.54" | 2155 |
| | | PM _{2.5} - Manual ^a | Corpocaldas | 2009 | Operación óptima. | | |
| | | SO ₂ - Automático | UN | 2019 | Operación óptima. | | |
| | | O ₃ - Automático | UN | 2018 | Operación óptima. | | |
| | | CO - Automático | Corpocaldas | 2018 | Operación óptima. | | |
| | | PM ₁₀ y PM _{2.5} - Automático ^b | Corpocaldas | 2019 | Operación óptima. | | |
| Palogrande (Pal) | ZC, SR – BTV, SAI | PM ₁₀ - Manual ^c | UN | 2009 | Operación óptima. | N 5° 3' 22.4" W 75° 29' 31.3" | 2154 |
| Nubia (Nub) | ZSE, SR – BTV, SAI | PM ₁₀ - Manual ^c | UN | 2017 | Operación óptima. | N 5° 1' 47.0" W 75° 28' 18" | 2091 |
| Liceo (Lic) | CU, SC – ATV, PAI | PM ₁₀ - Manual ^c | Corpocaldas | 2010 | Operación óptima. | N 5° 4' 5.01" W 75° 30' 37.58" | 2156 |
| | | PM ₁₀ y PM _{2.5} - Automático ^b | Corpocaldas | 2019 | Operación óptima. | | |
| Milán (Mil) | ZC, SR – AAI, MTV | PM ₁₀ - Manual ^c | Corpocaldas | 2012 | Operación óptima. | N 5° 2' 48.5" W 75° 28' 48.68" | 2188 |
| Católica (UCM) | CU, SC – ATV, SAI | PM ₁₀ - Manual ^c | Corpocaldas - UCM | 2021 (mayo) | Operación óptima. | N 5° 3'34.13" W 75°29'13.63" | 2038 |

a - Equipo de bajo volumen (Low-Vol)

b - Equipo automático – nefelómetro (Técnica fotométrica)

c - Equipo de alto volumen (Hi-Vol).

*Características:

SR: Sector residencial

CU: Centro urbano

*Fuentes de contaminación:

ATV: Alto tráfico vehicular

AAI: Alta actividad industrial

AZI: Adyacente a zona industrial

SC: Sector comercial

ZC: Zona central

MTV: Moderado tráfico vehicular

MAI: Moderada actividad industrial

SAI: Sin actividad industrial.

ZSE: Zona sureste

ZI: Zona industrial

BTV: Bajo tráfico vehicular

PAI: Pequeña actividad industrial

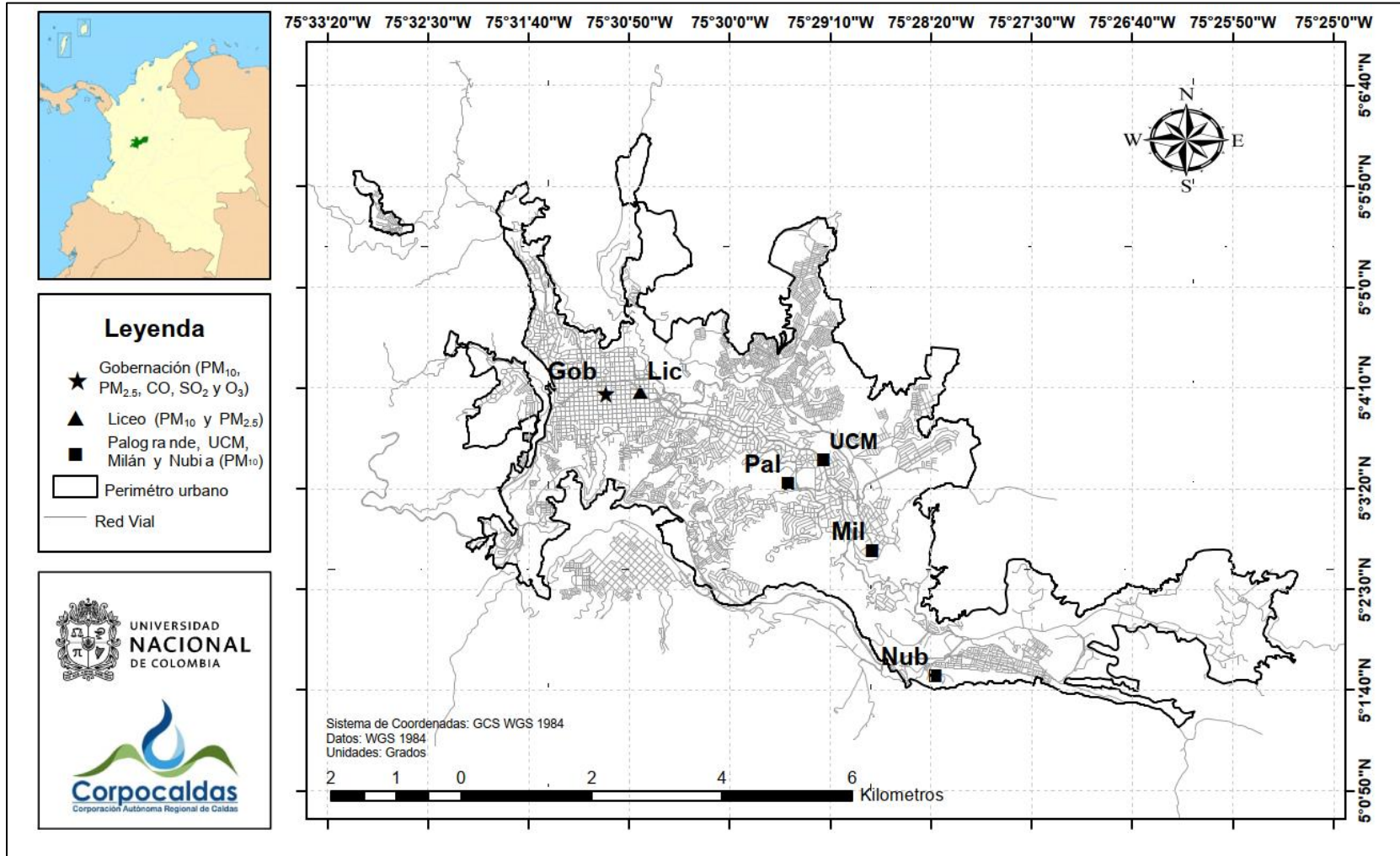


Figura 1. Mapa con ubicación de las estaciones de calidad del aire pertenecientes al SVCA de Manizales para el año 2021

2. ANÁLISIS METEOROLÓGICO

La Tabla 2 presenta los consolidados mensuales de las variables meteorológicas en las estaciones más próximas a las estaciones de calidad del aire para los meses de enero a diciembre de 2021. Las estaciones meteorológicas corresponden a Gobernación de Caldas, Liceo, Posgrados, Milán planta Niza, La Nubia y Hospital de Caldas; esta última tomada debido a su punto de referencia espacial sobre el centro geográfico de Manizales. Con la información obtenida en estas estaciones meteorológicas, se estiman las concentraciones a condiciones estándar (25°C y 1 atm) obtenidas por los equipos del SVCA de Manizales. De manera alternativa las Figura 2 y Figura 3 presentan el comportamiento promedio mensual de algunas variables meteorológicas de las estaciones mencionadas. Se aprecia que el comportamiento de las variables a lo largo de la ciudad es estable.

Durante el período de análisis, se observó un patrón característico del régimen bimodal de lluvias y la posible influencia del fenómeno de La Niña en la ciudad, marcándose en enero y julio el final de las temporadas de bajas precipitaciones; similarmente en febrero y agosto el comienzo de las temporadas de altas precipitaciones. Al comparar los valores de las estaciones se observa que Liceo obtuvo el mayor registro con 287.4 mm para el mes de febrero, así como los menores registros durante julio con un total de 52.4 mm de lluvia.

Para el caso de la temperatura ambiente y radiación solar, se observa un comportamiento inverso a las precipitaciones, obteniéndose los mayores registros durante los meses de enero y julio con un valor promedio de 17.5 °C y 285 W/m² respectivamente, siendo Milán planta Niza la estación con los registros promedio más altos (18.0 °C en julio y 330.4 W/m² en enero). Por su parte la humedad relativa se relacionó de forma directa con las precipitaciones y de manera inversa con la temperatura y radiación solar, obteniéndose la mayor humedad relativa durante agosto con un valor de 90 % en la estación La Nubia.

Se destaca además que la ciudad cuenta con patrones de viento identificados por el fenómeno de valle-montaña y montaña–valle, con velocidades de viento bajas que limitan la dispersión horizontal de los contaminantes. La Figura 4 presenta las rosas de viento promedio diarias observadas a lo largo de la ciudad para el período de análisis.

Las condiciones climáticas juegan un papel importante en la dinámica de los contaminantes en el aire. Contaminantes secundarios como el ozono troposférico (O₃), 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. Por su parte, el aumento de la humedad relativa se asocia al aumento en la humedad de las partículas, por lo tanto, el aumento de su peso, lo cual influye en la velocidad de caída de las partículas suspendidas y en la disminución de fenómenos de resuspensión de partículas (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 en cercanías de la fuente disminuirá.

Tabla 2. Estadísticos mensuales para las variables meteorológicas próximas a las estaciones de calidad del aire durante el año 2021

| Mes | Temperatura del Aire [°C] | Velocidad de Viento [m/s] | Dirección Viento [°] | Presión Atmosférica [HPa] | Humedad Relativa [%] | Precipitación Acumulada [mm] | Radiación Solar* [W/m ²] | Max. Rad. solar [W/m ²] |
|------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Gobernación de Caldas | | | | | | | | |
| Enero | 17.6 | 0.78 | 267.6 | 755.8 | 82.9 | 54.6 | 315.7 | 1183 |
| Febrero | 16.8 | 0.43 | 273.8 | 756.8 | 87.3 | 199.8 | 274.3 | 1293 |
| Marzo | 16.3 | 0.75 | 282.7 | 757.4 | 87.5 | 268.2 | 275.0 | 1397 |
| Abril | 17.1 | 0.73 | 284.3 | 756.6 | 87.2 | 138.4 | 258.9 | 1190 |
| Mayo | 17.4 | 0.76 | 283.9 | 757.2 | 85.6 | 116.0 | 275.6 | 1243 |
| Junio | 16.9 | 0.78 | 280.8 | 757.9 | 86.5 | 89.4 | 262.1 | 1266 |
| Julio | 17.5 | 0.76 | 280.4 | 757.1 | 83.1 | 58.6 | 278.5 | 1227 |
| Agosto | 16.8 | 0.48 | 349.1 | 757.9 | 85.8 | 247.6 | 264.7 | 1218 |
| Septiembre | 17.3 | 0.80 | 252.2 | 757.6 | 82.4 | 113.2 | 304.7 | 1280 |
| Octubre | 16.9 | 0.8 | 251.6 | 757.5 | 86.3 | 103.2 | 272.9 | 1240 |
| Noviembre | 16.5 | 0.8 | 255.3 | 757.3 | 88.1 | 191.0 | 262.7 | 1250 |
| Diciembre | 17.2 | 0.1 | 257.4 | 756.6 | 87.7 | 79.4 | 237.4 | 1241 |
| Liceo | | | | | | | | |
| Enero | 16.9 | 0.55 | 261.8 | 784.8 | 76.2 | 75.0 | 183.3 | 925 |
| Febrero | 16.8 | 0.64 | 137.9 | 785.0 | 77.4 | 287.4 | 183.2 | 1051 |
| Marzo | 15.9 | 0.61 | 139.6 | 786.1 | 81.9 | 247.8 | 247.8 | 1183 |
| Abril | 16.8 | 0.56 | 113.9 | 785.3 | 80.7 | 140.6 | 218.1 | 1246 |
| Mayo | 16.8 | 0.55 | 149.6 | 786.5 | 80.4 | 163.4 | 225.2 | 1185 |
| Junio | 16.4 | 0.60 | 50.1 | 787.2 | 80.6 | 93.0 | 221.1 | 1137 |
| Julio | 17.2 | 0.51 | 229.4 | 786.2 | 75.6 | 52.4 | 233.6 | 1124 |
| Agosto | 16.3 | 0.51 | 355.7 | 787.1 | 78.1 | 243.2 | 214.1 | 1132 |
| Septiembre | 16.6 | 0.49 | 167.0 | 786.9 | 74.9 | 20.0 | 213.4 | 998 |
| Octubre | 16.5 | 0.51 | 217.7 | 786.5 | 80.9 | 186.2 | 231.3 | 998 |
| Noviembre | 16.2 | 0.37 | 266.3 | 786.1 | 82.1 | 187.2 | 219.3 | 998 |
| Diciembre | 16.9 | 0.30 | 272.8 | 785.3 | 80.6 | 80.8 | 213.4 | 1109 |
| Posgrados | | | | | | | | |
| Enero | 17.0 | 0.28 | 332.1 | 791.3 | 83.3 | 72.6 | 287.2 | 1086 |
| Febrero | 16.9 | 0.32 | 346.1 | 790.8 | 85.7 | 230.0 | 267.2 | 1129 |
| Marzo | 16.1 | 0.43 | 20.9 | 791.3 | 87.4 | 213.0 | 247.8 | 1213 |
| Abril | 16.8 | 0.30 | 355.9 | 791.8 | 86.7 | 123.2 | 233.8 | 1095 |
| Mayo | 16.8 | 0.31 | 347.4 | 793.2 | 86.3 | 142.0 | 260.9 | 1167 |
| Junio | 16.4 | 0.23 | 346.6 | 793.8 | 86.7 | 115.2 | 242.9 | 1111 |
| Julio | 17.2 | 0.20 | 345.9 | 792.7 | 83.4 | 60.6 | 268.8 | 1217 |
| Agosto | 16.4 | 0.22 | 350.8 | 793.7 | 86.3 | 202.8 | 238.4 | 1118 |
| Septiembre | 16.8 | 0.22 | 342.6 | 793.4 | 83.2 | 95.2 | 286.1 | 1154 |
| Octubre | 16.4 | 0.3 | 343.1 | 793 | 86.9 | 173.4 | 247.4 | 998 |
| Noviembre | 16.3 | 0.3 | 323.4 | 792.6 | 87.7 | 125.4 | 248.0 | 997 |
| Diciembre | 16.9 | 0.2 | 322.2 | 791.8 | 86.5 | 75.6 | 239.3 | 1132 |
| Espacio en blanco | | | | | | | | |

| Mes | Temperatura del Aire [°C] | Velocidad de Viento [m/s] | Dirección Viento [°] | Presión Atmosférica [HPa] | Humedad Relativa [%] | Precipitación Acumulada [mm] | Radiación Solar* [W/m ²] | Max. Rad. solar [W/m ²] |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Milán planta Niza | | | | | | | | |
| Enero | 18.0 | 0.14 | 331.1 | 777.6 | 78.9 | 55.4 | 330.4 | 1264 |
| Febrero | 17.7 | 0.11 | 341.5 | 778.0 | 77.7 | 243.8 | 307.7 | 1403 |
| Marzo | 16.7 | 0.09 | 327.6 | 779.2 | 77.8 | 225.6 | 271.8 | 1512 |
| Abril | 17.7 | 0.08 | 332.1 | 778.2 | 78.6 | 158.6 | 259.3 | 1311 |
| Mayo | 17.6 | 0.08 | 333.4 | 779.7 | 76.3 | 145.6 | 296.1 | 1436 |
| Junio | 17.3 | 0.07 | 336.2 | 780.2 | 77.4 | 130.8 | 271.6 | 1297 |
| Julio | 18.2 | 0.11 | 317.2 | 779.1 | 77.1 | 62.2 | 262.8 | 1242 |
| Agosto | 17.1 | 0.12 | 329.8 | 780.2 | 76.6 | 244.4 | 227.9 | 1342 |
| Septiembre | 17.8 | 0.08 | 313.2 | 779.5 | 76.7 | 121.6 | 264.2 | 1425 |
| Octubre | 17.3 | 0.06 | 314.7 | 779.4 | 76.9 | 176.6 | 247.3 | 997 |
| Noviembre | 17.0 | 0.14 | 315.3 | 779.1 | 77.3 | 125.0 | 240.9 | 998 |
| Diciembre | 17.7 | 0.09 | 314.3 | 778.1 | 77.0 | 73.6 | 256.6 | 1241 |
| La Nubia *** | | | | | | | | |
| Agosto | 17.2 | 0.43 | 279.6 | 796.1 | 90.0 | 69.4 | 240.3 | 1135 |
| Septiembre | 17.6 | 0.97 | 178.4 | 796.2 | 85.1 | 78.4 | 302.3 | 1201 |
| Octubre | 17.4 | 0.8 | 234.3 | 795.7 | 88.5 | 107 | 276.3 | 998 |
| Noviembre | 17.1 | 0.8 | 245.1 | 795.3 | 89.7 | 57 | 273.5 | 998 |
| Diciembre | 17.7 | 0.8 | 227.2 | 794.7 | 87.8 | 42.6 | 252.4 | 1021 |
| Hospital de Caldas | | | | | | | | |
| Enero | 17.8 | 0.97 | 215.8 | 792.5 | 82.8 | 75.6 | 299.7 | 1150 |
| Febrero | 17.6 | 1.00 | 180.2 | 792.8 | 84.7 | 258.4 | 271.3 | 1172 |
| Marzo | 16.8 | 0.97 | 128.4 | 794.1 | 85.4 | 196.4 | 240.5 | 1204 |
| Abril | 17.6 | 0.92 | 132.9 | 793.3 | 85.2 | 122.6 | 205.6 | 1088 |
| Mayo | 17.2 | 0.91 | 126.7 | 795.2 | 85.6 | 101.6 | 232.8 | 1185 |
| Julio | 17.9 | 0.92 | 174.8 | 794.1 | 83.4 | 62.0 | 251.5 | 1125 |
| Agosto | 17.1 | 0.98 | 81.9 | 795 | 85.8 | 219.4 | 221.4 | 1135 |
| Septiembre | 17.6 | 1.08 | 117.3 | 794.7 | 83.7 | 102.2 | 262.9 | 1230 |
| Octubre | 17.2 | 1.0 | 137.3 | 794.3 | 87.9 | 167.2 | 224.8 | 997 |
| Noviembre | 17.0 | 0.9 | 223.9 | 793.9 | 91.5 | 153.6 | 219.7 | 998 |
| Diciembre | 17.7 | 0.8 | 222.6 | 793 | 90.4 | 60.8 | 204.5 | 960 |

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

** NA: Ausencia de datos por fallas en el equipo.

*** La estación retoma medidas para estos meses

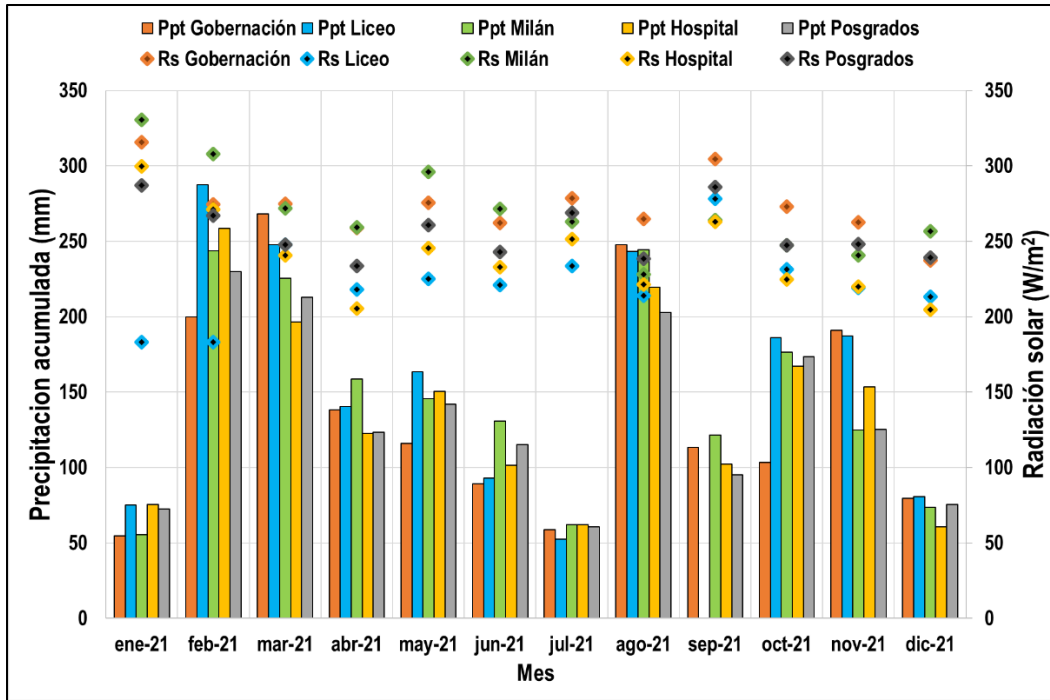


Figura 2. Promedios mensuales de precipitación acumulada (Ppt) y radiación solar (Rs) durante el año 2021

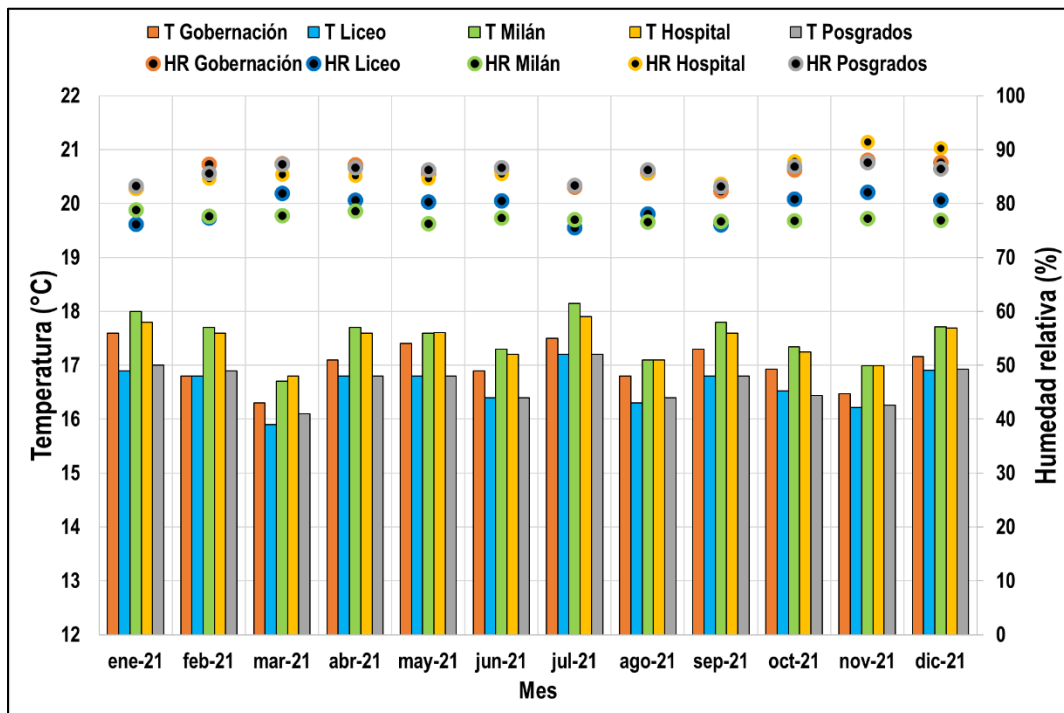


Figura 3. Promedios mensuales de temperatura del aire (T) y humedad relativa (HR) durante el año 2021

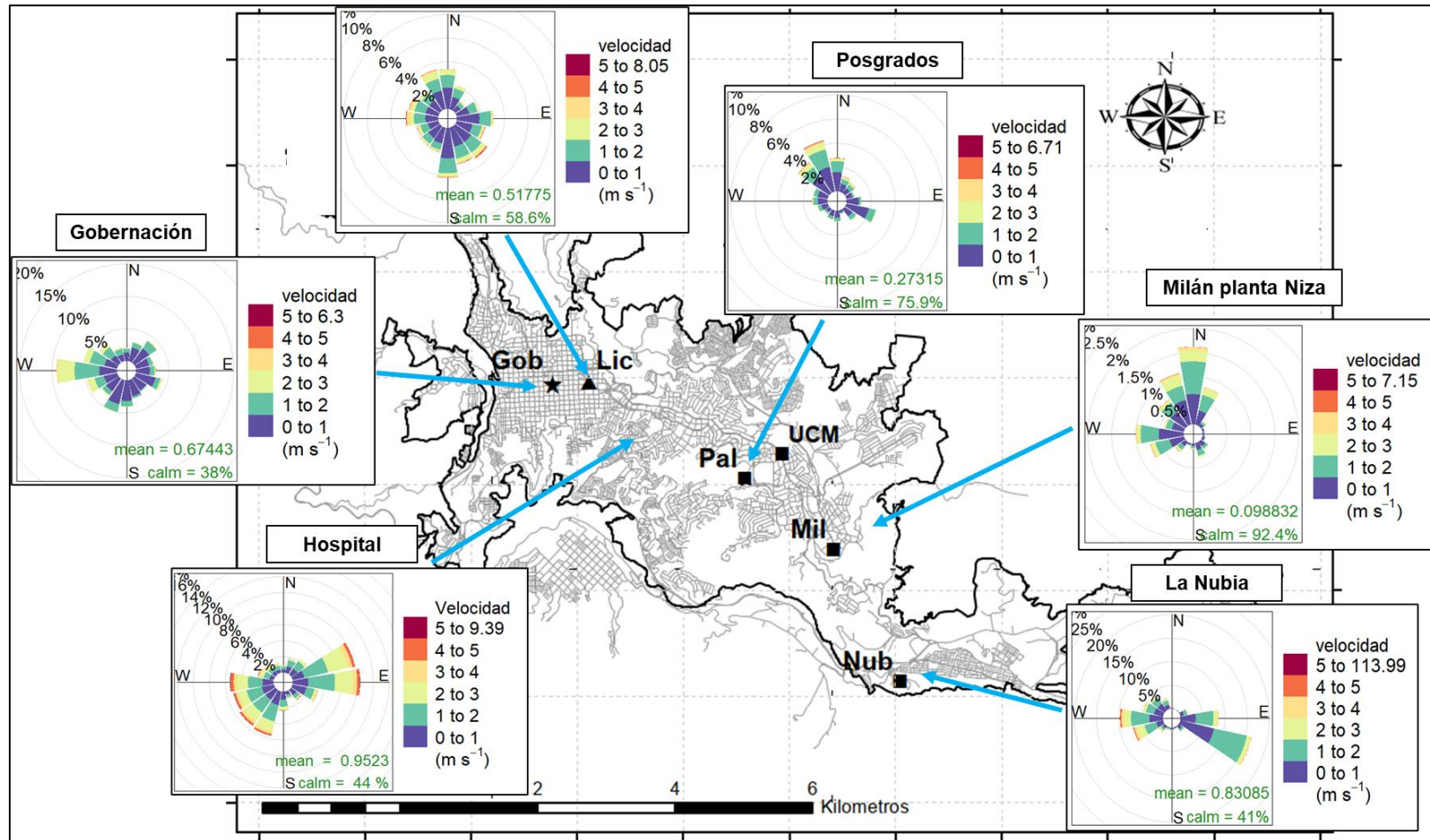


Figura 4. Rosas de viento en las estaciones meteorológicas cercanas a las estaciones de calidad del aire durante el año 2021

3. RESULTADOS DE MONITOREO PARA PM₁₀ y PM_{2.5}

3.1. Equipos manuales: Análisis de promedios diarios y mensuales

La Tabla 3 presenta los estadísticos descriptivos mensuales para las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales obtenidas durante el año 2021 (enero - diciembre de 2021). Se muestra el promedio aritmético con su respectiva incertidumbre asociada, mediana, desviación estándar, concentración mínima, concentración máxima, el percentil 95, el número de datos obtenidos mensualmente y su porcentaje de datos válidos. Los cálculos y gráficos fueron realizados con el software R y su librería de análisis para datos de calidad del aire “Openair” (Carslaw y Ropkins, 2015).

Los resultados indican que, durante el año 2021, las estaciones de Milán y Liceo registraron las concentraciones promedio más altas de PM₁₀ en la ciudad con valores de $30 \pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $25 \pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente; seguidos por Gobernación con $22 \pm 1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por último, Palogrande, Católica y Nubia con $18 \pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se destaca que este patrón en los niveles de concentración también fue observado durante los años 2020 y 2019, los cuales registraron los valores más altos de PM₁₀ en Milán y Liceo con promedios mensuales por encima de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y los menores registros fueron obtenidos en Nubia y Palogrande con promedios alrededor de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cabe resaltar que todas las estaciones cumplieron con el porcentaje de datos válidos del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial establecido en 75%, perdiéndose pocas o ninguna muestra durante los meses del presente año, indicando la relevancia por número de datos en los resultados (MAVDT, 2010).

Se identificó que Milán presentó los mayores niveles de concentración de PM₁₀ con el mayor promedio aritmético mensual reportado en enero de $35 \pm 0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$). De otra parte, la estación Nubia presentó los menores niveles de concentración con su menor registro mensual durante agosto con un valor de $14 \pm 1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Similarmente al comparar los resultados con la precipitación mensual acumulada, se ratifica el fenómeno de lavado atmosférico como uno de los factores clave en la reducción de la contaminación por material particulado en la ciudad de Manizales, siendo notorio este efecto durante los meses de febrero, marzo y abril, en donde los registros promedio de la ciudad disminuyeron hasta en un 20% con respecto al promedio total. Destaca para la estación Milán durante febrero y marzo de 2021 una reducción del 29% comparado con el mismo periodo en 2020, debido a la finalización de las obras de construcción en la empresa “Invermec”, las cuales contribuyeron al aumento en los niveles de concentración en 2020; se recalca además que esta estación es categorizada en el tipo de estación “Industrial” y con influencia de tráfico vehicular pesado.

De manera general, se ha identificado que las estaciones Milán, Liceo y en menor medida Gobernación y Católica, se encuentran influenciadas por tráfico vehicular (representado por un flujo importante de buses y camiones de carga principalmente en Liceo y Milán respectivamente). De acuerdo con la actualización del inventario de emisiones de la ciudad año base 2017, estas categorías poseen especial importancia ya que, a pesar de que su flota corresponde al 3.2% del total de vehículos de la ciudad, estos vehículos emplean diésel como combustible y son responsables del 56% (351.2 ton/año) y 24% (151.9 ton/año) del total de emisiones de PM₁₀ respectivamente (Unal - Corpocaldas, 2019). De otra parte, las áreas de influencia de las estaciones Nubia y Palogrande se encuentran relacionadas con bajas dinámicas de movilidad, debido a la reducida presencialidad en los campus universitarios.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de las concentraciones promedio mensuales de PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales (µg/m³) durante el año 2021

| Estadístico* | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Sep. | Oct. | Nov. | Dic. | Total |
|--|----------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------------|
| Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar) | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | 19 | 23 | 19 | 14 | 24 | 24 | 24 | 23 | 19 | 25 | 24 | 24 | 22 |
| Mediana | 20 | 26 | 18 | 13 | 23 | 24 | 24 | 24 | 18 | 26 | 22 | 24 | 22 |
| Incertidumbre** | 1.20 | 1.20 | 1.16 | 1.45 | 1.19 | 1.37 | 1.37 | 1.19 | 1.34 | 0.49 | 1.04 | 1.04 | 1.26 |
| Desviación Estándar | 6 | 6 | 7 | 4 | 4 | 5 | 6 | 7 | 5 | 6 | 8 | 6 | 6 |
| Mínimo | 11 | 12 | 11 | 8 | 16 | 15 | 16 | 8 | 13 | 16 | 16 | 15 | 8 |
| Máximo | 26 | 29 | 32 | 24 | 30 | 32 | 34 | 31 | 32 | 36 | 47 | 34 | 47 |
| Percentil 95% | 26 | 29 | 28 | 21 | 29 | 32 | 33 | 31 | 28 | 35 | 37 | 32 | 30 |
| N° Datos - %DV*** | 10 - 100 | 9 - 100 | 10 - 100 | 10 - 100 | 10 - 100 | 10 - 100 | 10 - 100 | 10 - 100 | 10 - 100 | 11 - 100 | 10 - 100 | 10 - 100 | 120 - 100 |
| Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar) | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | 29 | 25 | 23 | 23 | 24 | 24 | 23 | 25 | 26 | 25 | 25 | 32 | 25 |
| Mediana | 30 | 26 | 23 | 23 | 25 | 24 | 21 | 25 | 27 | 27 | 25 | 32 | 26 |
| Incertidumbre | 0.53 | 0.53 | 0.57 | 0.15 | 0.69 | 0.58 | 1.09 | 1.10 | 1.10 | 0.60 | 1.06 | 0.78 | 0.51 |
| Desviación Estándar | 5 | 5 | 6 | 5 | 6 | 3 | 6 | 5 | 3 | 4 | 6 | 6 | 5 |
| Mínimo | 21 | 15 | 11 | 12 | 15 | 18 | 15 | 16 | 21 | 20 | 17 | 19 | 11 |
| Máximo | 34 | 28 | 33 | 28 | 34 | 30 | 36 | 32 | 32 | 32 | 34 | 41 | 41 |
| Percentil 95% | 34 | 28 | 31 | 28 | 31 | 29 | 33 | 32 | 31 | 31 | 34 | 39 | 32 |
| N° Datos - %DV | 11 - 100 | 8 - 90 | 9 - 90 | 9 - 90 | 9 - 90 | 9 - 90 | 9 - 90 | 10 - 100 | 9 - 90 | 11 - 100 | 9 - 90 | 10 - 100 | 113 - 94 |
| Palogrande PM₁₀ (µg/m³ estándar) | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | 19 | 21 | 15 | 17 | 18 | 15 | 16 | 18 | 16 | 18 | 16 | 22 | 18 |
| Mediana | 20 | 21 | 14 | 16 | 18 | 15 | 14 | 17 | 16 | 18 | 16 | 22 | 17 |
| Incertidumbre | 0.53 | 0.53 | 1.06 | 1.06 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.08 | 1.10 | 1.09 | 1.06 | 1.09 | 0.89 |
| Desviación Estándar | 5 | 2 | 5 | 3 | 5 | 3 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 |
| Mínimo | 13 | 18 | 11 | 14 | 11 | 11 | 10 | 12 | 12 | 11 | 12 | 19 | 10 |
| Máximo | 26 | 23 | 26 | 21 | 25 | 21 | 24 | 23 | 21 | 24 | 21 | 30 | 30 |
| Percentil 95% | 25 | 23 | 23 | 21 | 24 | 19 | 22 | 23 | 21 | 22 | 20 | 28 | 23 |
| N° Datos - %DV | 9 - 90 | 7 - 80 | 7 - 80 | 7 - 70 | 8 - 80 | 9 - 90 | 9 - 90 | 9 - 90 | 9 - 90 | 11 - 100 | 6 - 60 | 10 - 100 | 101 - 84 |
| Milán PM₁₀ (µg/m³ estándar) | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | 35 | 30 | 27 | 29 | 26 | 28 | 28 | 30 | 33 | 31 | 30 | 34 | 30 |
| Mediana | 34 | 30 | 29 | 28 | 25 | 28 | 29 | 30 | 33 | 31 | 31 | 34 | 30 |
| Incertidumbre | 0.52 | 0.52 | 0.57 | 1.05 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.06 | 1.07 | 1.07 | 1.10 | 1.10 | 0.80 |
| Desviación Estándar | 6 | 6 | 4 | 5 | 7 | 6 | 6 | 7 | 4 | 5 | 4 | 5 | 5 |
| Mínimo | 25 | 21 | 17 | 21 | 17 | 20 | 18 | 20 | 24 | 23 | 22 | 25 | 17 |
| Máximo | 45 | 40 | 31 | 37 | 38 | 38 | 37 | 40 | 39 | 38 | 33 | 43 | 45 |
| Percentil 95% | 42 | 38 | 31 | 36 | 36 | 36 | 36 | 39 | 38 | 37 | 33 | 42 | 37 |
| N° Datos - %DV | 11 - 100 | 8 - 90 | 9 - 90 | 10 - 100 | 7 - 70 | 8 - 80 | 9 - 90 | 9 - 90 | 9 - 90 | 11 - 100 | 9 - 90 | 7 - 70 | 107 - 90 |
| Espacio en blanco | | | | | | | | | | | | | |

| Estadístico* | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Sep. | Oct. | Nov. | Dic. | Total |
|---|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------------|
| Nubia PM₁₀ (µg/m³ estándar) | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | 20 | 20 | 18 | 20 | 17 | 19 | 18 | 14 | 18 | 16 | 17 | 21 | 18 |
| Mediana | 19 | 19 | 16 | 21 | 17 | 19 | 18 | 13 | 18 | 16 | 16 | 21 | 18 |
| Incertidumbre | 0.1 | 0.1 | 0.04 | 1.09 | 1.08 | 1.09 | 1.09 | 1.10 | 0.92 | 1.12 | 1.12 | 1.12 | 1.08 |
| Desviación Estándar | 6 | 6 | 5 | 3 | 7 | 5 | 6 | 5 | 4 | 3 | 4 | 4 | 5 |
| Mínimo | 15 | 16 | 11 | 15 | 11 | 13 | 11 | 8 | 10 | 10 | 12 | 17 | 8 |
| Máximo | 27 | 26 | 27 | 26 | 25 | 29 | 32 | 20 | 24 | 22 | 22 | 26 | 32 |
| Percentil 95% | 26 | 26 | 26 | 25 | 23 | 27 | 28 | 19 | 23 | 20 | 22 | 26 | 25 |
| N° Datos - %DV | 10 - 100 | 8 - 90 | 8 - 80 | 9 - 90 | 8 - 80 | 8 - 80 | 9 - 90 | 8 - 90 | 9 - 90 | 9 - 80 | 8 - 80 | 8 - 80 | 102 - 85 |
| Católica PM₁₀ (µg/m³ estándar) | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | -- | -- | -- | -- | 17 | 17 | 17 | 18 | 19 | 18 | 16 | 24 | 18 |
| Mediana | -- | -- | -- | -- | 18 | 16 | 16 | 18 | 19 | 18 | 17 | 23 | 18 |
| Incertidumbre | -- | -- | -- | -- | 1.09 | 1.11 | 1.11 | 1.11 | 1.12 | 1.12 | 1.16 | 1.08 | 1.10 |
| Desviación Estándar | -- | -- | -- | -- | 5 | 2 | 1 | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 |
| Mínimo | -- | -- | -- | -- | 12 | 15 | 12 | 11 | 16 | 12 | 9 | 18 | 9 |
| Máximo | -- | -- | -- | -- | 25 | 21 | 26 | 25 | 21 | 23 | 21 | 30 | 30 |
| Percentil 95% | -- | -- | -- | -- | 24 | 20 | 24 | 24 | 21 | 23 | 20 | 30 | 23 |
| N° Datos - %DV | -- | -- | -- | -- | 5 - 50 | 9 - 90 | 9 - 90 | 9 - 90 | 9 - 90 | 10 - 90 | 8 - 80 | 10 - 100 | 69 - 58 |
| Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar) | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | 11 | 19 | 13 | 8 | 16 | 16 | 17 | 20 | 14 | 18 | 14 | 15 | 15 |
| Mediana | 12 | 19 | 12 | 8 | 16 | 16 | 15 | 20 | 13 | 15 | 13 | 14 | 14 |
| Incertidumbre | 1.17 | 1.17 | 1.40 | 1.58 | 1.18 | 1.19 | 1.20 | 1.18 | 1.15 | 0.37 | 0.36 | 0.69 | 1.28 |
| Desviación Estándar | 4 | 4 | 5 | 3 | 3 | 5 | 6 | 6 | 3 | 7 | 3 | 4 | 4 |
| Mínimo | 5 | 12 | 7 | 4 | 11 | 8 | 11 | 6 | 11 | 10 | 10 | 9 | 4 |
| Máximo | 16 | 24 | 24 | 12 | 21 | 24 | 27 | 28 | 21 | 30 | 21 | 19 | 30 |
| Percentil 95% | 15 | 24 | 21 | 12 | 21 | 22 | 26 | 27 | 20 | 29 | 19 | 19 | 22 |
| N° Datos - %DV | 11 - 100 | 8 - 90 | 10 - 100 | 10 - 100 | 10 - 100 | 10 - 100 | 10 - 100 | 10 - 100 | 10 - 100 | 11 - 100 | 10 - 100 | 10 - 100 | 120 - 100 |

* 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

*** %DV = Porcentaje de datos validos

En lo referente al monitoreo de PM_{2.5} de la estación Gobernación, se registró un valor promedio anual de 15 ± 1.28 µg/m³ (desv. std = 4 µg/m³). Se puede observar que agosto presentó el mayor nivel de concentraciones con un promedio mensual de 20 µg/m³ (desv. std = 6 µg/m³), mientras abril presentó el menor valor promedio con 8 µg/m³ (desv. std = 3 µg/m³). Al comparar los registros del 2021 con respecto al año 2020 (16 µg/m³) y 2019 (14 µg/m³), no se observó un cambio significativo en los promedios anuales con variaciones que no superan el 10%, mientras tanto, se observó una reducción en las concentraciones promedio mensuales con valores cercanos al 38% principalmente entre febrero y abril, debido a las altas precipitaciones durante estos meses del año 2021.

Adicionalmente, se presentan las figuras de evolución temporal de concentraciones diarias obtenidas para PM₁₀ (Figura 5) y PM_{2.5} (Figura 6). Se destaca que en ninguna de las estaciones de monitoreo se superó el límite máximo diario para material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) establecido en la Resolución 2254 de 2017 que establece 75 µg/m³ para PM₁₀ y 37 µg/m³ para PM_{2.5} (MADS, 2017).

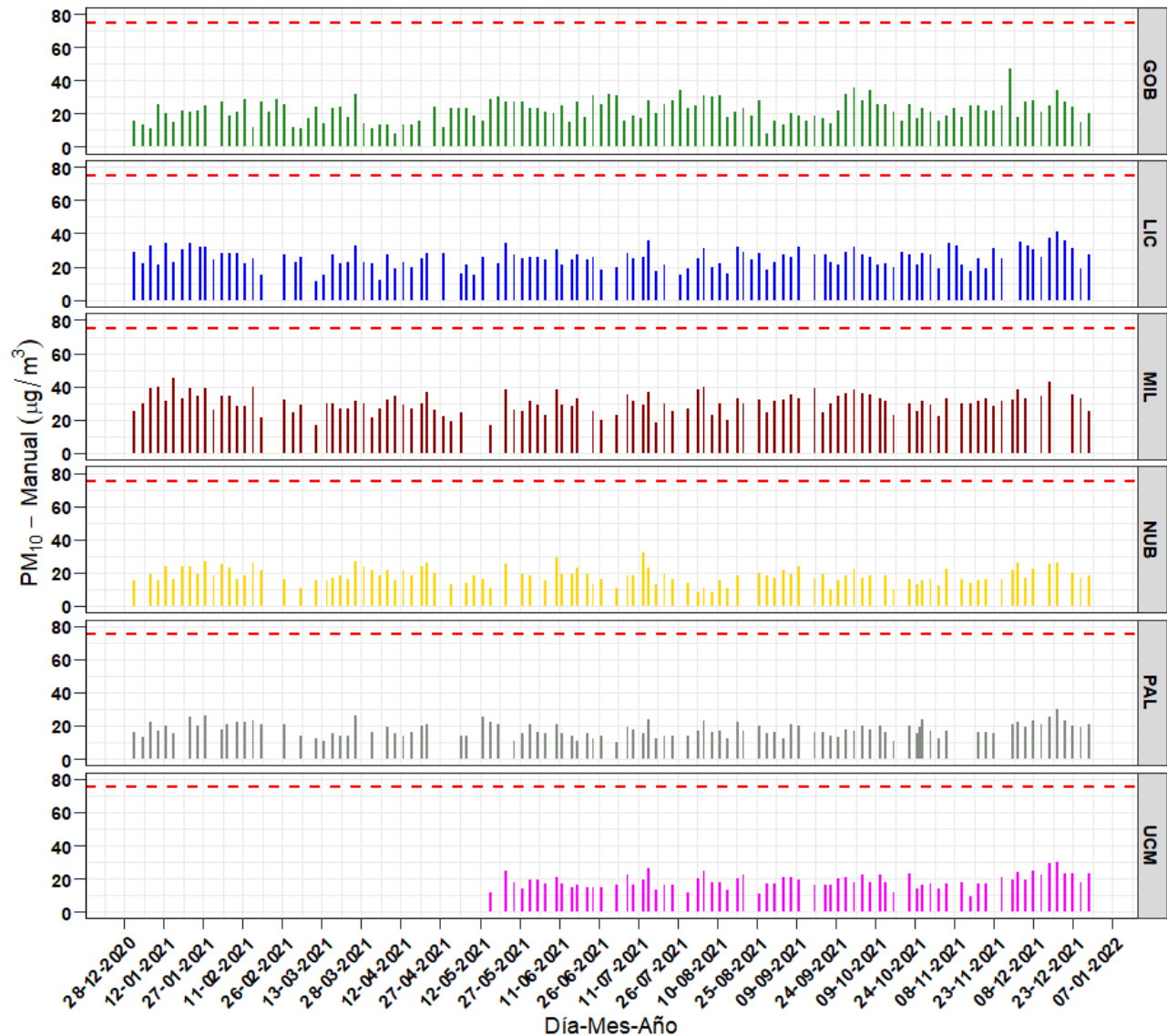


Figura 5. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM₁₀ – Manuales durante el año 2021

La línea punteada roja hace referencia al límite máximo promedio diario de PM₁₀ establecido en la Resolución 2254 de 2017: 75 µg/m³

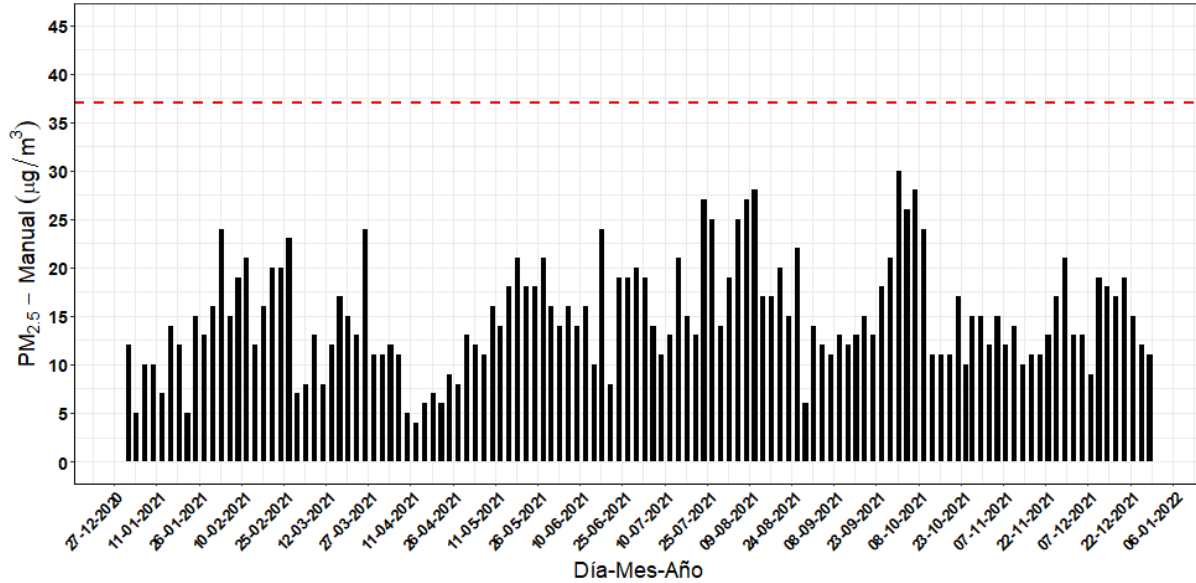


Figura 6. Evolución temporal de concentraciones diarias de PM_{2.5} – Manual durante el año 2021

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

La Figura 7 presenta la variación promedio de concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales por días de la semana en las estaciones de la ciudad. Se puede observar que las mayores disminuciones en las concentraciones se obtienen los días domingo, principalmente en estaciones con influencia de tráfico vehicular en cercanías de las zonas de monitoreo. Este fenómeno fue más evidente en las estaciones Liceo y Católica, debido a su ubicación próxima a una de las avenidas de mayor tráfico en la ciudad, la Avenida Santander – Carrera 23. Para el caso de Gobernación parecen existir aun actividades durante los fines de semana cuya influencia no permite una reducción significativa de concentración los domingos, muy probablemente debido a la actividad de los buses de transporte público durante estos días.

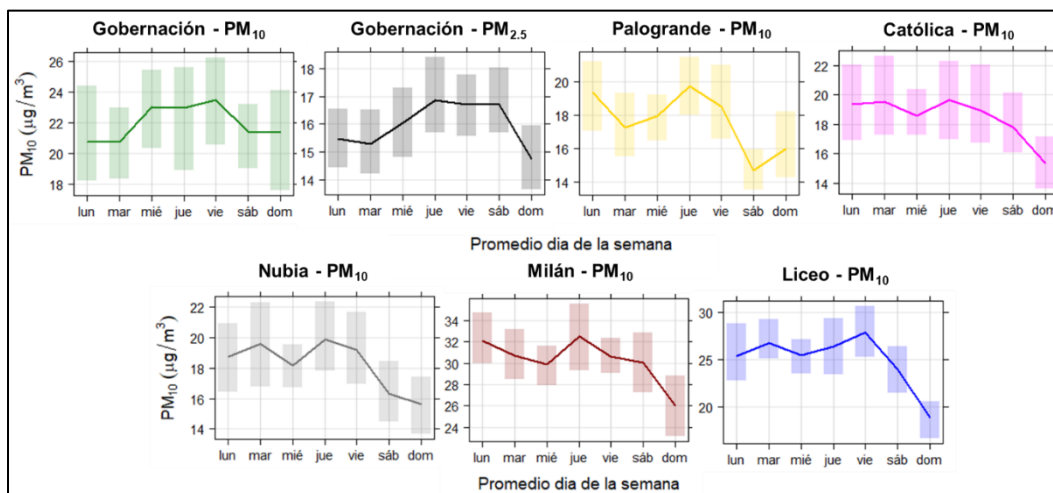


Figura 7. Variación promedio de concentraciones por días de la semana para PM₁₀ y PM_{2.5} – Manuales durante el año 2021

La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%

3.2. Equipos manuales: Comparación con la norma anual

En la Figura 8 se presenta la comparación del promedio aritmético obtenido para las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ con la normativa anual para el 2021 establecida en la Resolución 2254 de 2017 para PM_{10} ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y $PM_{2.5}$ ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Se observó que en ninguna de las estaciones se superó la normativa anual colombiana. Finalmente, es importante destacar que los promedios obtenidos en Manizales para PM_{10} y $PM_{2.5}$ en todas las estaciones, superaron las recomendaciones recientes en términos de promedio anual propuestas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ (OMS, 2021).

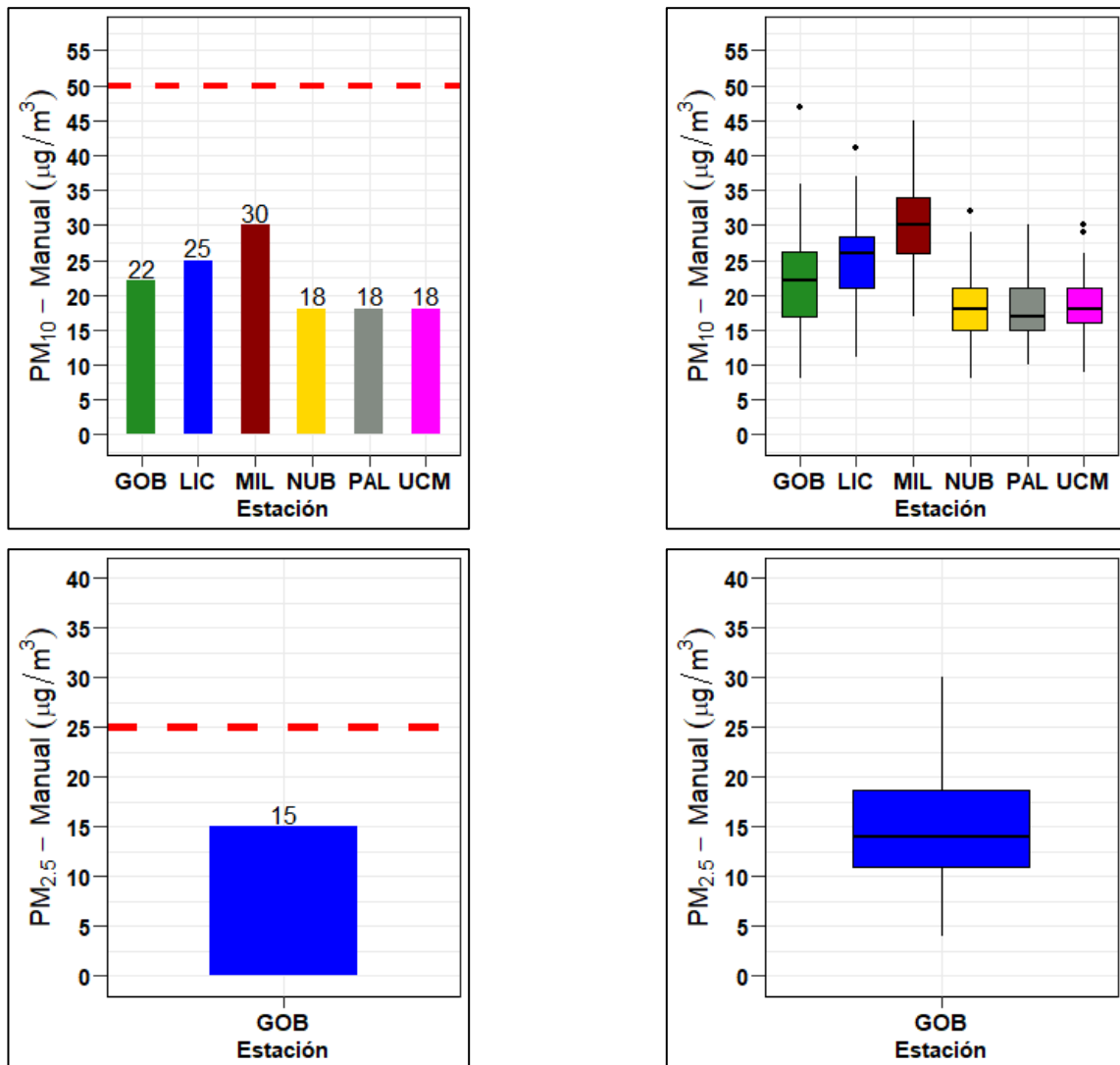


Figura 8. Concentración promedio (izquierda) y diagrama de cajas (derecha) de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Manuales durante el año 2021

La línea roja punteada indica el límite normativo anual establecido en la Resolución 2254 del MADS: $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10}) y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($PM_{2.5}$)

3.3. Equipos automáticos: Análisis de promedios diarios y mensuales

La Tabla 4 presenta los estadísticos descriptivos comparativos de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos en las estaciones Gobernación y Liceo durante el año 2021. Se observó que, durante el año 2021, las concentraciones promedio (medianas¹) de Gobernación para PM₁₀ y PM_{2.5} se encontraron alrededor de los 20.9 µg/m³ (desv. std = 6.9 µg/m³) y 12.4 µg/m³ (desv. std = 3.2 µg/m³) respectivamente. De otra parte, las concentraciones promedio medianas de Liceo para PM₁₀ y PM_{2.5} se encontraron alrededor de los 18.6 µg/m³ (desv. std = 11.2 µg/m³) y 10.5 µg/m³ (desv. std = 4 µg/m³) respectivamente. Se destaca que, pese al sesgo estadístico de los datos, los promedios son cercanos a la mediana, indicando la variabilidad proporcional de las concentraciones en ambos contaminantes y ambas estaciones.

Con respecto a los promedios mensuales, se puede observar que el patrón en los niveles de concentración es similar a los obtenidos en los equipos manuales, indicando la relación inversa entre el material particulado y la precipitación, debido al fenómeno de lavado atmosférico. En este sentido, el máximo promedio diario obtenido para PM₁₀ fue de 46.1 µg/m³ en Gobernación durante Julio y 74.1 µg/m³ en Liceo durante enero, ambos meses de bajas precipitaciones. De forma similar sucedió para PM_{2.5} cuyos registros máximos diarios fueron de 35.2 µg/m³ en Gobernación y 46.5 µg/m³ en Liceo, ambos registros en enero.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos para concentraciones promedio mensuales de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automático (µg/m³) durante el año 2021

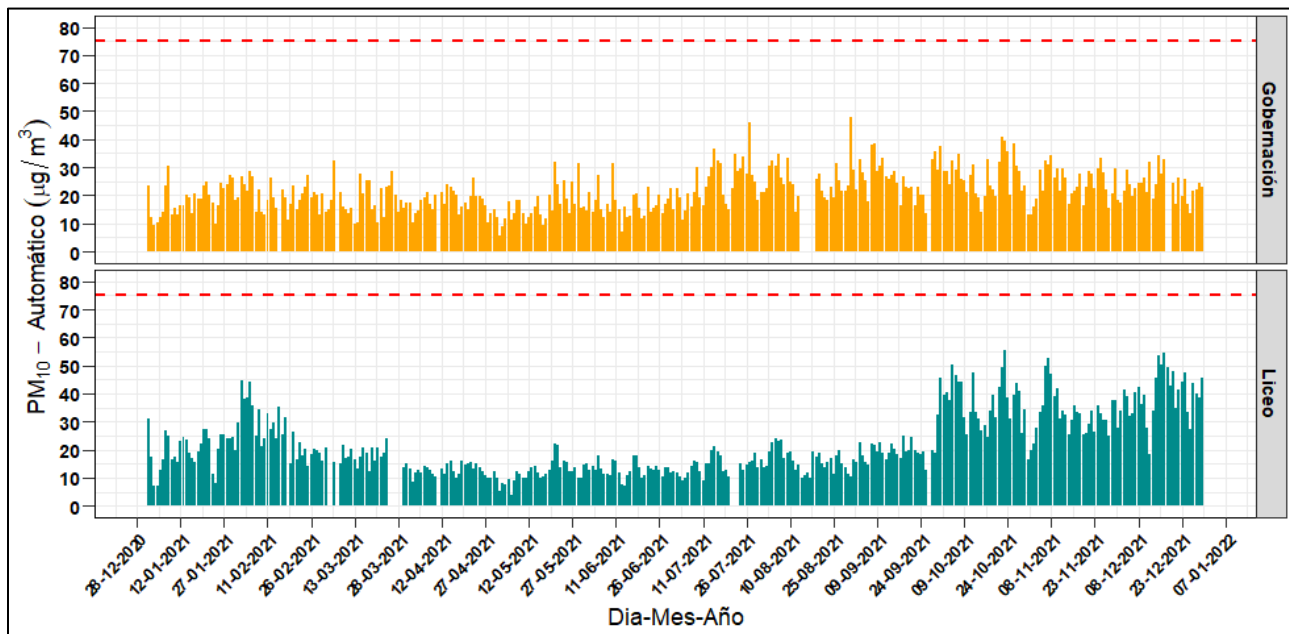
| Estadísticos* | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Sep. | Oct. | Nov. | Dic. | Total |
|--|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|-------------|
| Gobernación PM₁₀ (µg/m³ estándar) | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | 19.5 | 20.4 | 18.6 | 17.9 | 16.4 | 17 | 24.1 | 24.6 | 26.1 | 27.6 | 24.42 | 23.3 | 21.6 |
| Mediana | 18.9 | 20.1 | 17.4 | 18.1 | 14.8 | 15.8 | 22.6 | 23.9 | 26.8 | 27.8 | 23.17 | 23.4 | 20.9 |
| Desv. Est. | 7.3 | 4.6 | 5.8 | 3.8 | 6.2 | 5 | 7.9 | 5.2 | 6.2 | 6.9 | 5.7 | 4.9 | 6.9 |
| Min. | 9.3 | 10.8 | 10.1 | 10.2 | 5.6 | 7.3 | 11.46 | 14.2 | 13.5 | 13.9 | 13.36 | 13.5 | 5.6 |
| Max. | 45.2 | 28.9 | 32.1 | 27.5 | 33.4 | 30.2 | 46.1 | 34.6 | 38.6 | 40.8 | 34.13 | 34.0 | 45.2 |
| Percentil 95 | 29.1 | 27.1 | 28.2 | 23.8 | 28.5 | 26.6 | 35.5 | 33.3 | 36.2 | 39.0 | 32.9 | 32.6 | 33.4 |
| N° Datos | 31 | 28 | 30 | 29 | 31 | 30 | 31 | 26 | 29 | 30 | 29 | 28 | 353 |
| Liceo PM₁₀ (µg/m³ estándar) | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | 21.7 | 26.9 | 18 | 12.9 | 11.9 | 13 | 14.1 | 16.5 | 19.1 | 37.9 | 33.0 | 39.6 | 22.0 |
| Mediana | 22.1 | 25.1 | 17.5 | 12.8 | 11.9 | 13 | 13.7 | 16.1 | 19.1 | 38.9 | 33.0 | 40.4 | 18.6 |
| Desv. Est. | 11.5 | 8.5 | 3.1 | 2.2 | 3.8 | 2.6 | 3.3 | 4.1 | 2.8 | 8.1 | 7.7 | 8.3 | 11.2 |
| Min. | 7.2 | 14.3 | 12.1 | 16.1 | 4 | 7.1 | 9 | 9.9 | 12.8 | 24.7 | 19.8 | 18.3 | 4 |
| Max. | 74.1 | 44.6 | 26.2 | 8.7 | 22.2 | 17.9 | 21.3 | 24 | 24.9 | 55.7 | 52.8 | 54.5 | 74.1 |
| Percentil 95 | 29.2 | 17.3 | 21.4 | 17 | 18.8 | 17.9 | 19.6 | 23.2 | 23.7 | 49.7 | 48.8 | 51.9 | 44.4 |
| N° Datos | 31 | 28 | 23 | 29 | 31 | 30 | 28 | 31 | 29 | 30 | 29 | 30 | 350 |
| Espacio en blanco | | | | | | | | | | | | | |

¹ Debido a que la serie de datos no posee una distribución normal, se deciden utilizar pruebas estadísticas no paramétricas que permitan evidenciar los cambios en las concentraciones, sin incluir el sesgo estadístico de los datos.

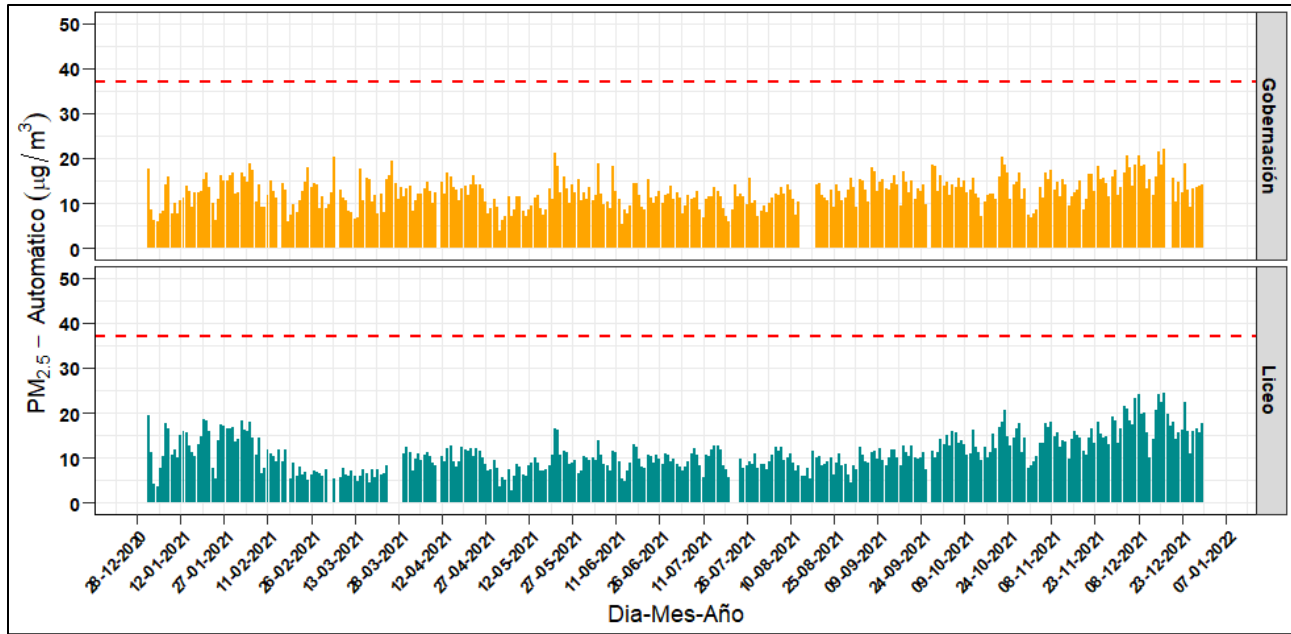
| Estadísticos* | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Sep. | Oct. | Nov. | Dic. | Total |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------------|
| Gobernación PM_{2.5} (µg/m³ estándar) | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | 12.6 | 12.8 | 11.9 | 12.6 | 10.9 | 11.4 | 10.6 | 11.5 | 13.8 | 13.6 | 13.2 | 15.6 | 12.5 |
| Mediana | 12.4 | 13.2 | 11.4 | 12.8 | 10.6 | 11.1 | 11.1 | 11.5 | 14 | 13.6 | 13.5 | 15.0 | 12.4 |
| Desv. Est. | 5.4 | 3.2 | 3.5 | 2.2 | 3.6 | 2.8 | 2.3 | 1.8 | 2.5 | 2.6 | 3.0 | 3.4 | 3.2 |
| Min. | 6 | 5.8 | 6.5 | 7.5 | 3.8 | 5.5 | 5.9 | 7.5 | 9.2 | 7.1 | 6.9 | 9.1 | 3.8 |
| Max. | 35.2 | 19.1 | 20 | 16.9 | 20.8 | 18.8 | 15.6 | 14.4 | 18.5 | 20.2 | 18.2 | 22.1 | 22.1 |
| Percentil 95 | 17.1 | 17.6 | 18.3 | 16.2 | 17.4 | 16.8 | 13.8 | 14.1 | 17.7 | 17.7 | 17.0 | 21.1 | 18.2 |
| N° Datos | 31 | 28 | 30 | 29 | 31 | 30 | 31 | 26 | 29 | 30 | 29 | 28 | 353 |
| Liceo PM_{2.5} (µg/m³ estándar) | | | | | | | | | | | | | |
| Promedio | 14.2 | 10.5 | 6.7 | 10.2 | 8.4 | 9.5 | 9.2 | 9 | 10.1 | 13.8 | 14.0 | 18.0 | 11.2 |
| Mediana | 14.8 | 9.9 | 6.6 | 10.3 | 8.2 | 9.8 | 9 | 8.9 | 10.1 | 13.5 | 14.3 | 17.6 | 10.5 |
| Desv. Est. | 7.4 | 4 | 1.7 | 1.7 | 2.9 | 2 | 1.9 | 1.9 | 1.6 | 2.6 | 2.7 | 3.7 | 4.0 |
| Min. | 3.6 | 5.1 | 4.4 | 7.2 | 2.8 | 4.7 | 5.6 | 5.2 | 6.8 | 9.6 | 8.3 | 9.9 | 2.8 |
| Max. | 46.5 | 18.2 | 13.5 | 13.6 | 16.5 | 13.8 | 12.6 | 12.3 | 12.7 | 20.5 | 19.2 | 24.3 | 46.5 |
| Percentil 95 | 18.8 | 42.2 | 8.4 | 16.9 | 13.8 | 12.7 | 12.4 | 11.9 | 12.5 | 17.7 | 18.0 | 23.9 | 18.3 |
| N° Datos | 31 | 28 | 23 | 29 | 31 | 30 | 28 | 31 | 29 | 30 | 29 | 30 | 350 |

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

La Figura 9 presenta el comportamiento temporal de las concentraciones de los equipos PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos (promedio diario) durante el año 2021 para las estaciones Gobernación y Liceo. Se destaca el caso de PM₁₀ en la estación Gobernación durante agosto y septiembre, cuyos registros aumentaron levemente en comparación con el resto del año; similarmente para los registros obtenidos en Liceo durante el último trimestre del año (octubre, noviembre y diciembre) en los cuales se presentó un incremento de la actividad del volcán Nevado del Ruiz (ver sección 5.1), lo cual se vio reflejado en los promedios diarios.



(a)



(b)

Figura 9. Evolución temporal de concentraciones diarias de los equipos PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticos durante el año 2021: (a) PM₁₀ (b) PM_{2.5}

La línea punteada roja hace referencia a los límites máximos diarios permisibles definidos en la Res. 2254 de 2017 del MADS: 75 µg/m³ (PM₁₀) y 37 µg/m³ (PM_{2.5})

Finalmente, se presenta la Figura 10 con la evolución promedio horaria y por día de la semana de las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} – Automáticas en las estaciones Gobernación y Liceo para el año 2021. 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 ambas estaciones registraron valores superiores a los 25 µg/m³ para PM₁₀ y 12 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 1300 W/m² entre las 11 am y 1 pm, ganan flotabilidad y ascienden en la atmósfera. Este comportamiento es favorecido además por el aumento en la altura de la capa límite planetaria, dando lugar a una mayor dispersión de los contaminantes emitidos (Cuesta y colaboradores, 2020).

Adicionalmente, se presenta 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, con 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, indicando que este día se comporta como un día laboral en la ciudad.

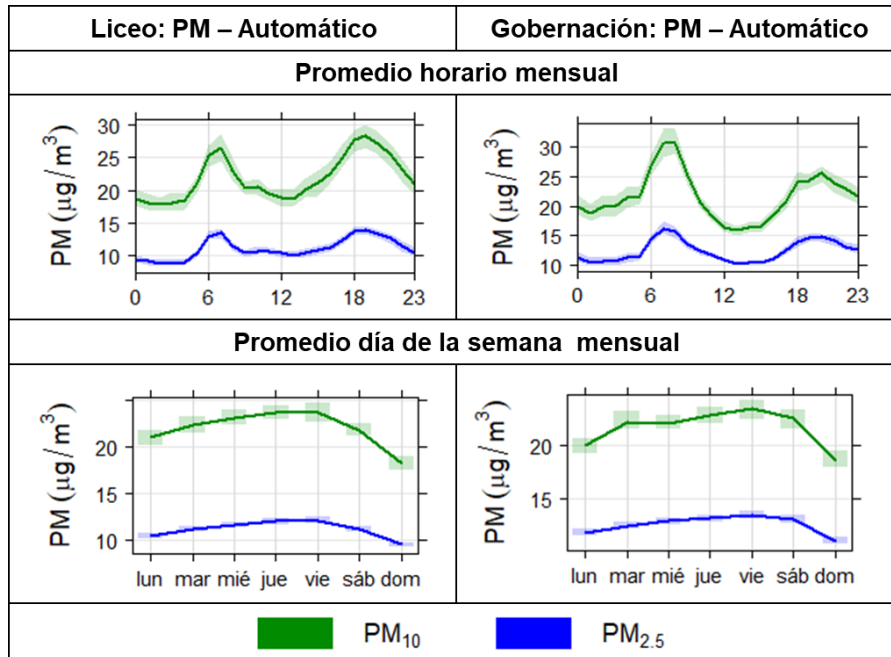


Figura 10. Promedio horario y semanal de PM_{10} y $PM_{2.5}$ – Automáticos durante el año 2021, Liceo (izquierda) y Gobernación (derecha)

3.4. Índice de calidad del aire (ICA) para PM_{10} y $PM_{2.5}$ en el SVCA de Manizales

La Figura 11, Figura 12 y Figura 13 presentan los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de PM – Manuales. De forma similar, la Figura 14 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de PM – Automáticos.

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 se utiliza la metodología propuesta por la resolución 2254 de 2017 (capítulo IV artículos 18 al 21) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS 2017).

En lo que respecta a la concentración de PM_{10} – Manual, se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena en las cinco estaciones de monitoreo para todos los días analizados. Para el caso de $PM_{2.5}$ – Manual en la estación Gobernación, un 60% de los días analizados presentaron ICA en estado moderado.

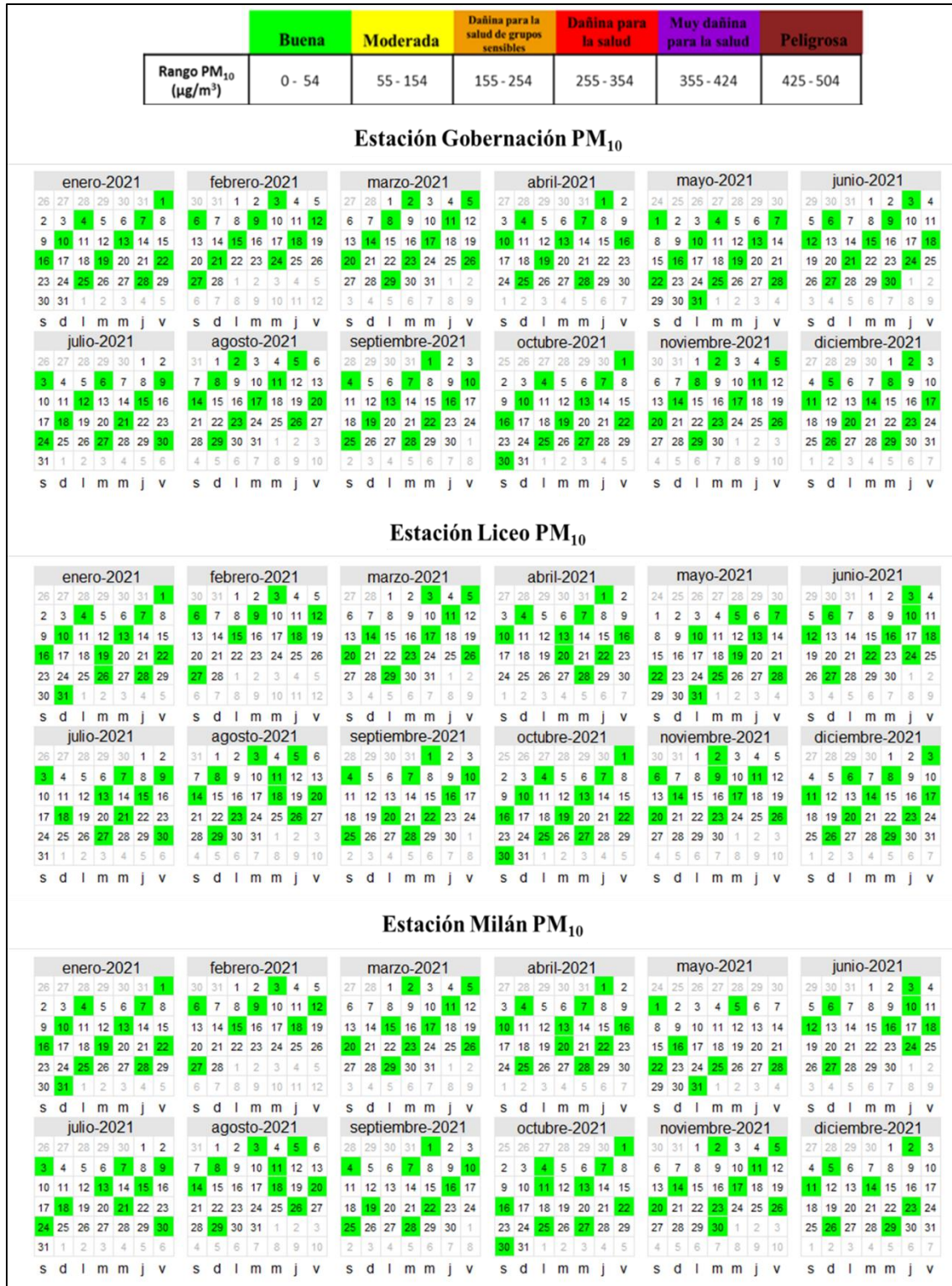


Figura 11. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ Manual en las estaciones: Gobernación, Liceo y Milán durante el año 2021
Cálculo según lineamientos de la resolución 2254 de 2017 del MADS

| | 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 |

Estación Palogrande PM₁₀



Estación Nubia PM₁₀



Estación UCM PM₁₀



Figura 12. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ Manual en las estaciones: Nubia, Palogrande y Católica durante el año 2021

Cálculo según lineamientos de la resolución 2254 de 2017 del MADS

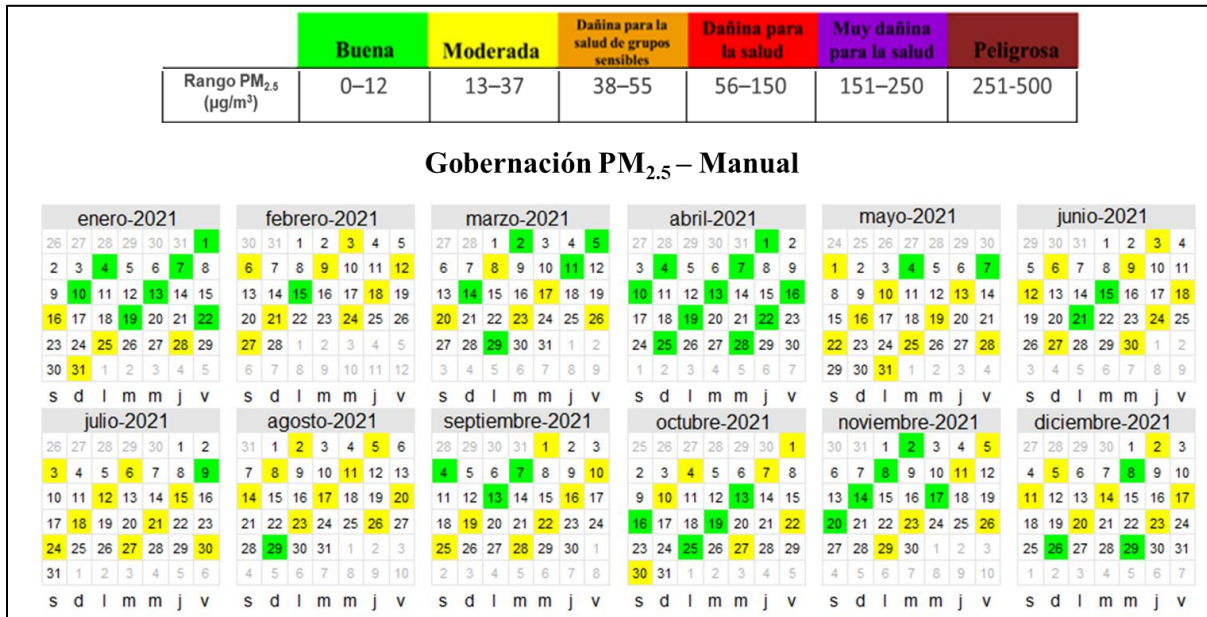


Figura 13. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{2.5} – Manual en la estación Gobernación durante el año 2021

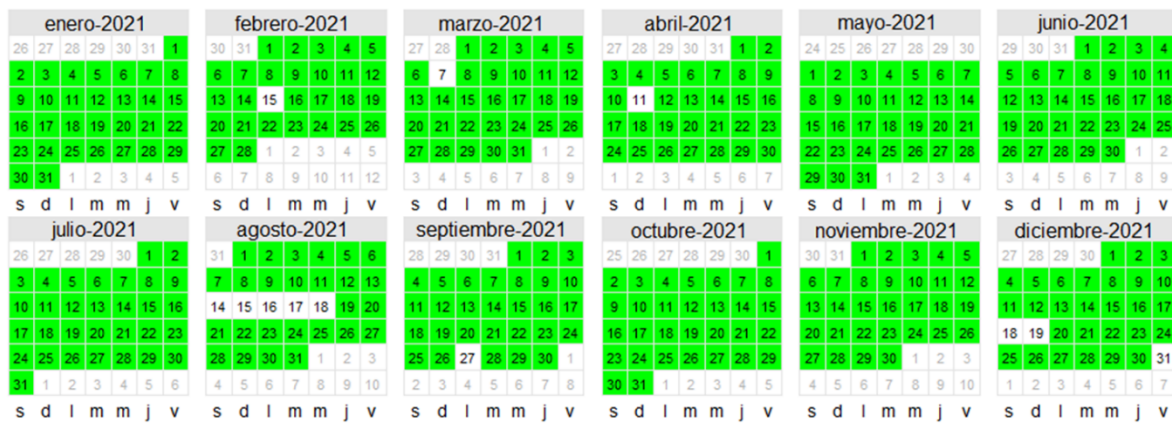
Cálculo según lineamientos de la resolución 2254 de 2017 del MADS

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; mientras que, en la estación Liceo se mantuvo el 99% de los días en estado bueno. En el caso de PM_{2.5} – Automático, en ambas estaciones se tuvo un porcentaje entre 30 y 50% de los días con ICA en estado moderado, siendo más evidente este efecto durante el último trimestre del año (octubre, noviembre y diciembre), niveles probablemente influenciados por la alta actividad del volcán Nevado del Ruiz durante este período, que registró altas emisiones con columnas de gases superiores a los 1000 m de altura desde la boca del volcán y direcciones de viento predominantes en dirección al centro urbano (ver sección 5.1)

El PM_{2.5} al ser una fracción del PM más pequeña, posee mayor afectación en la salud humana, por lo tanto, se destaca la importancia de continuar con medidas que permitan identificar escenarios de riesgo para la ciudadanía e implementar estrategias de mitigación de emisiones de este contaminante en la ciudad.

| | | | | | | |
|---|--------|----------|--|----------------------|--------------------------|-----------|
| | 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

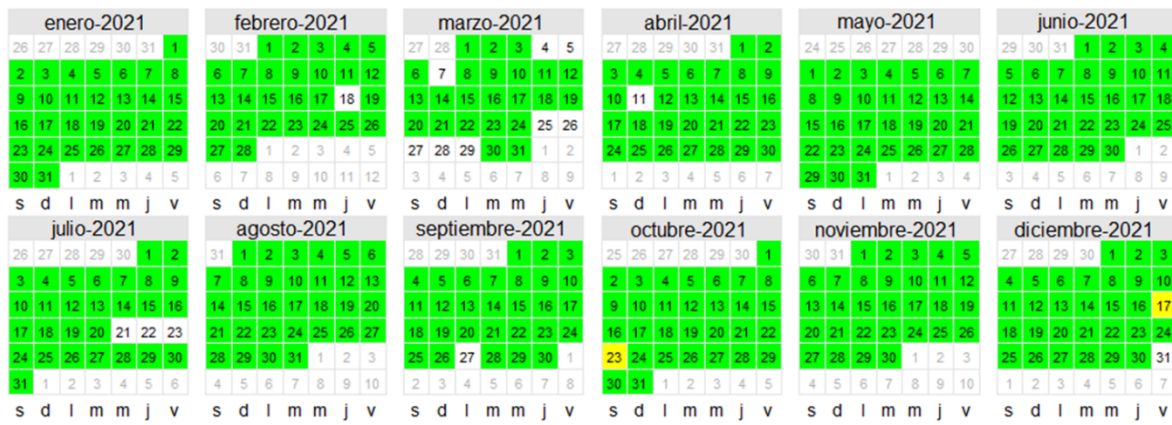


Figura 14. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM₁₀ – Automático en las estaciones: Gobernación y Liceo durante el año 2021

Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del 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 PM_{2.5} – Automático



Liceo PM_{2.5} – Automático



Figura 15. Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{2.5} – Automático en las estaciones: Gobernación y Liceo durante el año 2021

Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

4. RESULTADOS DE MONITOREO PARA GASES

4.1. Monitoreo de monóxido de carbono (CO)

La Tabla 5 presenta los estadísticos descriptivos para las concentraciones promedio horarias de CO, durante el año 2021 las concentraciones promedio medianas² se encontraron alrededor de 865.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = 431.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Al comparar los registros de la mediana del 2021 con respecto al año 2020 (598.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2019 (736.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), se observó un aumento del 48 y 21 % respectivamente. Debido a que el CO es mayoritariamente dominado por la combustión de gasolina proveniente de motocicletas y vehículos particulares, categorías vehiculares que aportan cerca del 41% (11599.7 ton/año) y 38% (10653 ton/año) respectivamente a la emisión de este contaminante (Unal – Corpocaldas, 2020; Unal - Corpocaldas, 2019). Los presentes resultados sugieren un aumento en la actividad de los patrones de emisión provenientes de estas fuentes emisión.

Se destaca que los datos presentan sesgo estadístico hacia la derecha y la mediana tiende a ser menor que los promedios aritméticos, indicando la variabilidad de las concentraciones de este contaminante en la ciudad. Con respecto a los promedios mensuales, se puede observar que septiembre presentó el mayor registro con un valor para la mediana de 1073 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, indicando un posible aumento en la presencia de vehículos particulares en inmediaciones de la estación y la influencia de menores registros de precipitación durante este mes. Para el caso del mínimo promedio registrado, este se presentó el 01 enero con un valor de 151.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, día festivo caracterizado en general por ausencia de fuentes de emisión en toda la ciudad.

De manera complementaria, la Figura 16 presenta la evolución de concentraciones octohorarias de CO durante el periodo de análisis. El promedio aritmético es estimado a partir de los datos cincominutales 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 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).

Adicionalmente, la Figura 17 presenta la variación promedio horario, mensual y por día de la semana. 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 1400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 1600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. De otra parte, se observan mínimos alrededor de los 480 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 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).

² Debido a que la serie de datos no posee una distribución normal, se deciden utilizar pruebas estadísticas no paramétricas que permitan evidenciar los cambios en las concentraciones, sin incluir el sesgo estadístico de los datos.

Tabla 5. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante el año 2021

| Estadísticos* | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Sep. | Oct. | Nov. | Dic. | Total |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| Promedio | 673.0 | 924.3 | 875.6 | 951.7 | 924.1 | 1289.2 | 1006.3 | 1066.1 | 1212.9 | 1045.2 | 1106.0 | 1053.4 | 981.2 |
| Mediana | 561.0 | 813.7 | 777.1 | 847.4 | 799.0 | 980.4 | 901.3 | 951.9 | 1073 | 920.5 | 961.9 | 950.5 | 865.9 |
| Incertidumbre** | 1.40 | 1.40 | 1.40 | 1.49 | 1.49 | 1.49 | 1.27 | 1.27 | 1.27 | 1.27 | 1.27 | 1.27 | 1.37 |
| Desv. Est. | 345.6 | 407.4 | 398.4 | 409.9 | 435.7 | 464.8 | 430.1 | 456.9 | 514.5 | 452.9 | 481.8 | 442.8 | 431.2 |
| Min. | 151.1 | 288.8 | 246.1 | 359.1 | 282.1 | 457.9 | 400.3 | 470.2 | 378.1 | 426.6 | 456.0 | 457.9 | 151.1 |
| Max. | 2205.9 | 2837.7 | 2797.8 | 2845.2 | 2971.6 | 3819 | 3072.7 | 2998.2 | 3459.9 | 2922.0 | 3652.8 | 2660.0 | 3652.8 |
| Percentil 95 | 1394.3 | 1714.7 | 1691.6 | 1842.1 | 1810.9 | 2030 | 1893.5 | 2050.4 | 2264.1 | 1906.5 | 2042.7 | 1950.8 | 1879 |
| N° Datos | 762 | 696 | 768 | 669 | 719 | 720 | 744 | 744 | 716 | 744 | 720 | 744 | 13032 |

* 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.

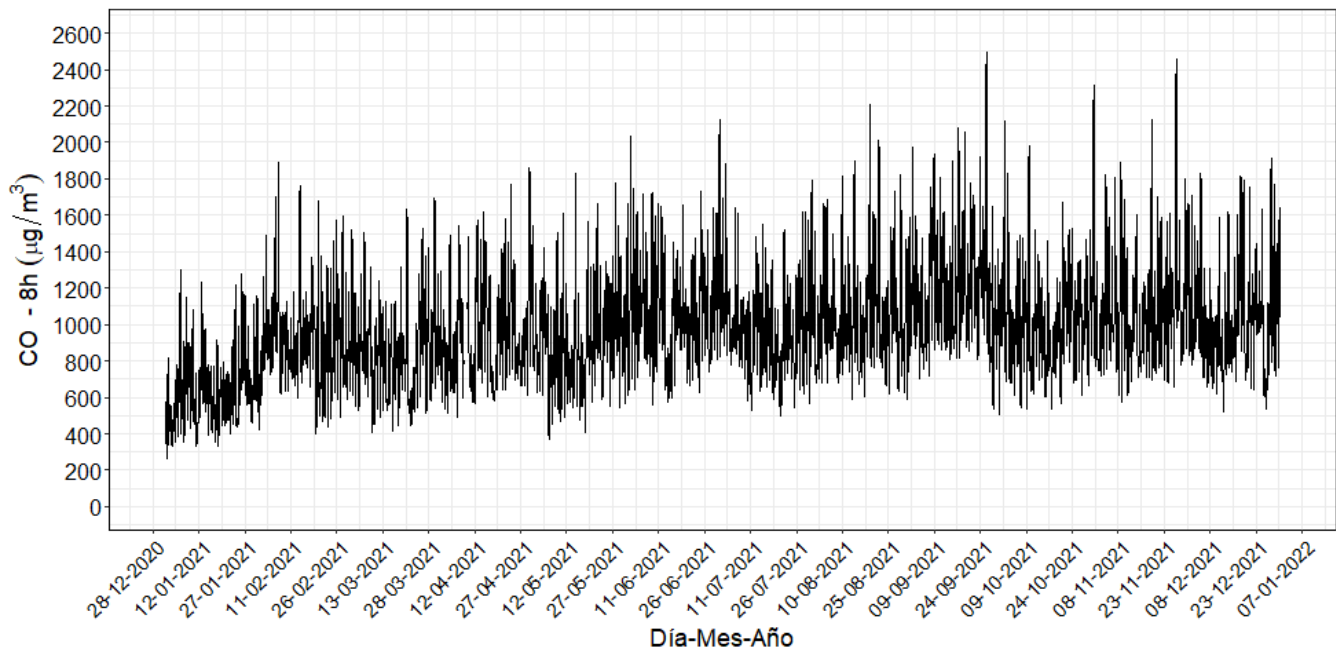


Figura 16 Evolución temporal de concentraciones promedio octohoraria de CO durante el año 2021

El nivel máximo permisible octohorario de la Resolución 2254 de 2017 equivalente a $5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no fue superado en ningún día

Para el caso de la hora pico del medio día se registran concentraciones alrededor de los 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 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 un patrón estable con valores promedio alrededor de los 1100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y una concentración mínima los domingos (día con la menor actividad económica de la ciudad) con un valor promedio cercano a los 820 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta disminución cercana al 25% en comparación con el promedio semanal, indica la representatividad del aporte de las fuentes de emisión móviles en las concentraciones de CO observadas.

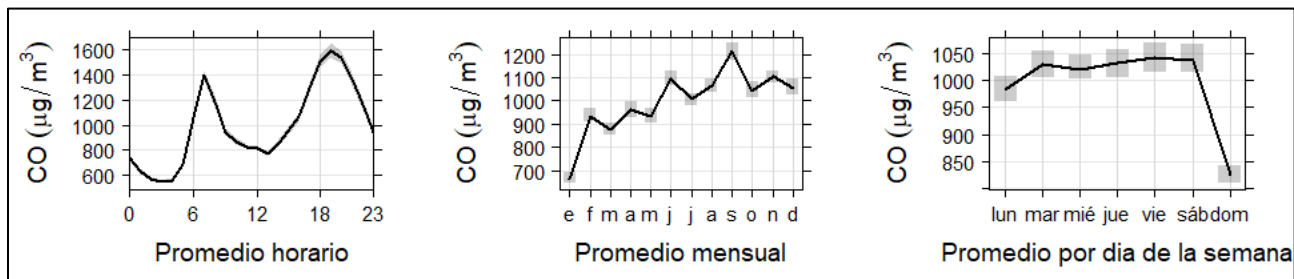


Figura 17. Variación promedio de CO horario (izquierda), mensual (centro) y por día de la semana (derecha) durante el año 2021

La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%

4.2. Monitoreo de dióxido de azufre (SO_2)

La Tabla 6 presenta los estadísticos descriptivos comparativos para SO_2 durante el período de análisis. Para este equipo en particular se tienen registros a partir del 12 de febrero, debido a algunas fallas en el sistema de medición. Se observó que, durante el año 2021, las concentraciones promedio medianas³ se encontraron alrededor de 6.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (desv. std = 2.12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), con un máximo valor registrado de 28.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ obtenido en agosto, valor sin explicación atribuible a pesar de algunos reportes de actividad volcánica durante este mes (ver sección 5.1). Al comparar los registros de la mediana del 2021 con respecto al año 2020 (2.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2019 (4.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), se observó un aumento del 170 y 41 % respectivamente, indicando un posible aumento en la presencia de vehículos en inmediaciones de la estación. Estas fuentes móviles en ruta utilizan combustibles como gasolina y diésel y han sido identificadas como fuentes de aporte de este contaminante en la ciudad y que similarmente al CO, se ha identificado su relación con las fuentes primarias de emisión en la estación Gobernación (Unal – Corpocaldas, 2020; Unal - Corpocaldas, 2019).

³ Debido a que la serie de datos no posee una distribución normal, se deciden utilizar pruebas estadísticas no paramétricas que permitan evidenciar los cambios en las concentraciones, sin incluir el sesgo estadístico de los datos.

Se destaca que los datos presentan sesgo estadístico hacia la derecha y la mediana tiende a ser menor que los promedios, indicando la variabilidad de las concentraciones de este contaminante en la ciudad. Con respecto a los promedios mensuales, se puede observar que durante febrero se presentó el mayor registro con un valor promedio de $9.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mes con alta influencia de emisiones del volcán Nevado del Ruiz, donde se registraron emisiones de la columna de gases con alturas superiores a los 1200 m (SGC, 2020), sumado a ello la ausencia en las precipitaciones pudo inducir el aumento y transporte regional de este contaminante.

Tabla 6. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) durante el año 2021

| Estadísticos* | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Sep. | Oct. | Nov. | Dic. | Total |
|-----------------|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Promedio | ---*** | 9.2 | 7.1 | 5.8 | 5.1 | 5.6 | 5.6 | 5.2 | 6.4 | 6.4 | 8.5 | 8.2 | 6.7 |
| Mediana | --- | 8.6 | 6.8 | 5.5 | 4.7 | 5.1 | 5.1 | 4.7 | 5.5 | 5.7 | 7.9 | 7.5 | 6.1 |
| Incertidumbre** | --- | 0.27 | 0.27 | 0.97 | 0.97 | 0.97 | 2.07 | 2.07 | 2.07 | 2.07 | 2.07 | 2.07 | 1.40 |
| Dev. Est. | --- | 2.4 | 1.8 | 2.1 | 1.8 | 2.0 | 1.9 | 2.2 | 2.9 | 2.6 | 2.0 | 2.1 | 2.1 |
| Min. | --- | 5.4 | 3.3 | 2.1 | 2.1 | 2.5 | 2.5 | 2.2 | 2.6 | 2.9 | 5.5 | 4.5 | 2.1 |
| Max. | --- | 16.9 | 14.8 | 21.2 | 14.3 | 14.2 | 12.8 | 28.1 | 24.5 | 20.9 | 18.7 | 18.9 | 28.1 |
| Percentil 95 | --- | 13.5 | 10.9 | 9.6 | 8.5 | 9.6 | 9.4 | 9.2 | 12 | 11.7 | 12.4 | 12.4 | 11 |
| N° Datos | --- | 395 | 768 | 669 | 719 | 696 | 744 | 744 | 716 | 744 | 720 | 744 | 10906 |

* 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.

*** Numero de datos no validos (<30% del mes)

De manera complementaria, la Figura 18 presenta la evolución de concentraciones horarias de SO_2 durante el período 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). Se destaca que todos los registros están dentro de los límites permitidos por la normatividad vigente ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 1 hora).

Adicionalmente, la Figura 19 presenta la variación promedio horaria, mensual y por día de la semana. Se observa un comportamiento horario 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 $9.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente. Asimismo, se observan mínimos alrededor de los $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al medio día (entre las 11 am y 1 pm). Al comparar el promedio por día de la semana, se observa un comportamiento con máximos de concentración los sábados con un valor medio alrededor de los $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y mínimos promedio los domingos alrededor de los $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

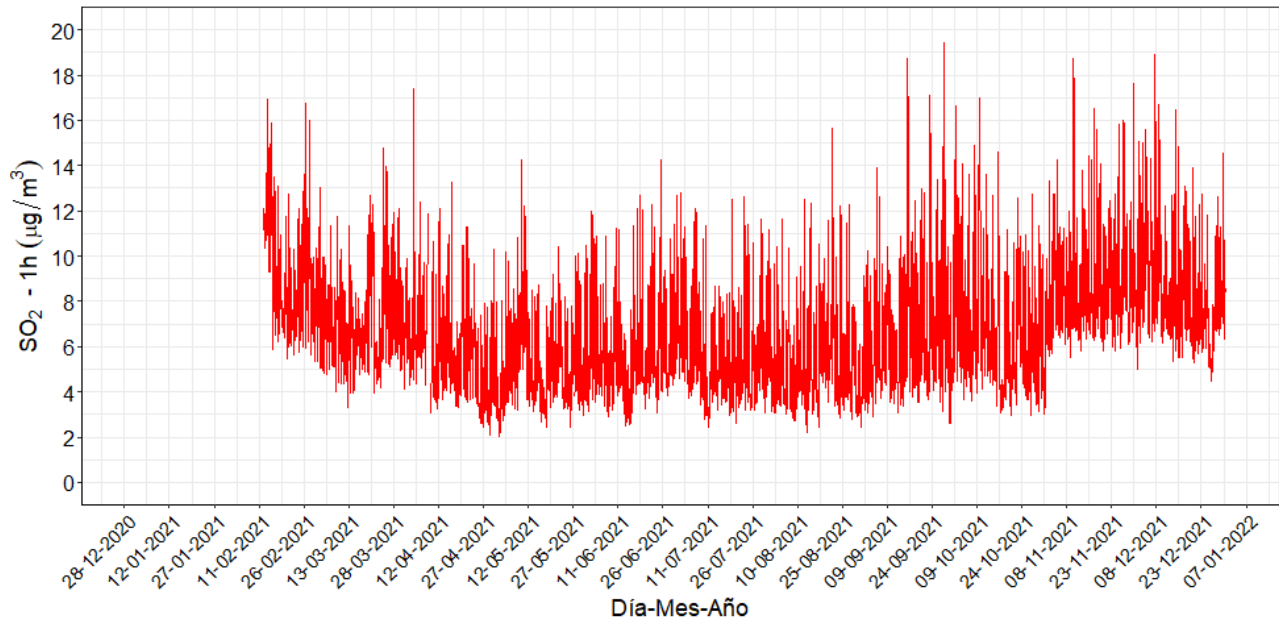


Figura 18. Evolución temporal de concentraciones promedio horario de SO₂ durante el año 2021

El nivel máximo permisible horario de la Resolución 2254 de 2017 equivalente a 100 µg/m³ no fue superado en ningún día

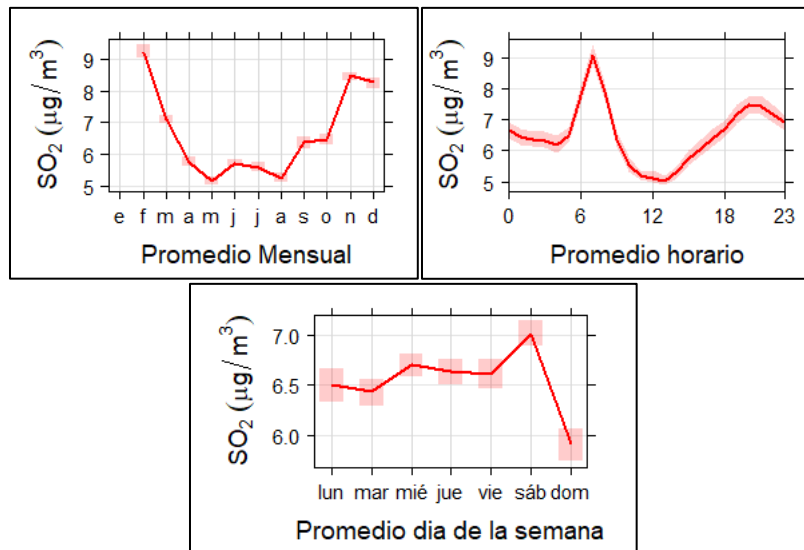


Figura 19. Variación promedio de SO₂ horario, mensual y por día de la semana durante el año 2021

La barra sombreada indica la variación sobre el promedio con una confianza del 95%

4.3. Monitoreo de ozono troposférico (O₃)

La Tabla 7 presenta los estadísticos descriptivos para O₃ durante el periodo de análisis, así como la subclasificación entre las concentraciones del día (diurno) y la noche (nocturno). Se observó que, durante el 2021, las concentraciones promedio medianas⁴ se encontraron alrededor de 21.8 µg/m³ para el día completo, 34.3 µg/m³ para la jornada diurna y 15.6 µg/m³ para la jornada nocturna. Al comparar los registros de la mediana diaria del 2021 con respecto al año 2020 (14.2 µg/m³) y 2019 (14.8 µg/m³), se observó un aumento del 46 y 40 % respectivamente, indicando un posible aumento en la emisión de precursores de O₃, un comportamiento relacionado directamente con la presencia de vehículos en inmediaciones de la estación que generan contaminantes como los óxidos de nitrógeno NO_x.

Se destaca que los datos presentan sesgo estadístico hacia la derecha y la mediana tiende a ser menor que los promedios, indicando la variabilidad de las concentraciones de este contaminante en la ciudad. Con respecto a los promedios mensuales, se puede observar que, inversamente al CO, durante febrero se presentó el menor registro con un valor para la mediana de 8.9 µg/m³ y durante septiembre se registró el mayor promedio mensual con un valor de 97.9 µg/m³.

De manera complementaria, la Figura 20 presenta la evolución de concentraciones octohorarias de O₃ durante el período de análisis. El promedio aritmético es estimado a partir de los datos cincominutales 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 O₃ se encontraron por debajo de los límites permitidos por la normatividad vigente (100 µg/m³ para promedios de 8 horas).

Tabla 7. Estadísticos descriptivos mensuales para concentraciones promedio de O₃ (µg/m³) durante el año 2021 y su comparativo entre periodos

| Estadísticos | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Sep. | Oct. | Nov. | Dic. | Total |
|-------------------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------------|
| Promedio | 12.8 | 11.5 | 13.7 | 31.6 | 23.7 | 27.4 | 32.4 | 34.5 | 41.2 | 29.3 | 28.1 | 27.7 | 25.3 |
| Mediana | 10 | 8.9 | 11.3 | 28.8 | 20.6 | 22.4 | 28.7 | 32.3 | 38.8 | 25.5 | 23.3 | 21.6 | 21.8 |
| Incertidumbre** | 1.18 | 1.18 | 1.18 | 0.812 | 0.812 | 0.812 | 0.883 | 0.883 | 0.883 | 0.883 | 0.883 | 0.883 | 0.81 |
| Min. | 1.4 | 0.4 | 0.9 | 3.1 | 3.4 | 3.9 | 4.9 | 6.4 | 7.5 | 0.9 | 3.6 | 4.2 | 0.4 |
| Max. | 44.2 | 39.1 | 45.1 | 83.7 | 68.6 | 75.9 | 92.3 | 86 | 97.9 | 87.9 | 82.5 | 81.1 | 97.9 |
| Percentil 95 | 30.6 | 29 | 32.5 | 66.5 | 51.4 | 63.1 | 65.8 | 68.4 | 79.8 | 65.9 | 64 | 66.5 | 56 |
| N° Datos | 639 | 696 | 697 | 669 | 720 | 668 | 744 | 707 | 517 | 672 | 720 | 744 | 877 |
| Espacio en blanco | | | | | | | | | | | | | |

⁴ Debido a que la serie de datos no posee una distribución normal, se deciden utilizar pruebas estadísticas no paramétricas que permitan evidenciar los cambios en las concentraciones, sin incluir el sesgo estadístico de los datos.

| Estadísticos | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Sep. | Oct. | Nov. | Dic. | Total |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Promedio diario | 18.1 | 16.1 | 19.1 | 40.3 | 32.6 | 37.3 | 43 | 43.7 | 53.4 | 39.9 | 38.3 | 38.3 | 33.9 |
| Mediana diaria | 18.3 | 16.5 | 19.4 | 40.7 | 33.7 | 36.9 | 44.6 | 44.3 | 54.9 | 40.9 | 38.8 | 36.4 | 34.3 |
| Desv. Est. | 10 | 9.3 | 10 | 19.8 | 15.3 | 18.5 | 18.5 | 18.5 | 21.8 | 19.6 | 18.7 | 20.3 | 16.3 |
| Max. | 44.2 | 39.1 | 45.1 | 83.7 | 68.6 | 75.9 | 92.3 | 86 | 97.9 | 87.9 | 82.5 | 81.1 | 97.9 |
| N° Datos | 315 | 348 | 349 | 333 | 360 | 332 | 372 | 353 | 257 | 336 | 360 | 372 | 6124 |
| Promedio nocturno | 7.8 | 6.9 | 8.2 | 23.1 | 14.9 | 17.2 | 21.8 | 25.3 | 29.1 | 18.7 | 17.8 | 17.1 | 16.7 |
| Mediana nocturna | 6.8 | 5.5 | 7.6 | 21.1 | 13.1 | 15.1 | 20.7 | 22.9 | 27.2 | 16.5 | 16.1 | 14.4 | 15.6 |
| Desv. Est. | 4.8 | 4.7 | 5.1 | 13.1 | 8.9 | 10.4 | 10.7 | 13.3 | 15 | 11.4 | 9.3 | 10.1 | 9.5 |
| Max. | 29.9 | 21.7 | 27.7 | 58.5 | 42.7 | 48.1 | 51.4 | 71.9 | 74.4 | 49.4 | 53.5 | 62.7 | 74.4 |
| N° Datos | 324 | 348 | 348 | 336 | 360 | 336 | 372 | 354 | 260 | 336 | 360 | 372 | 6158 |

* 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.

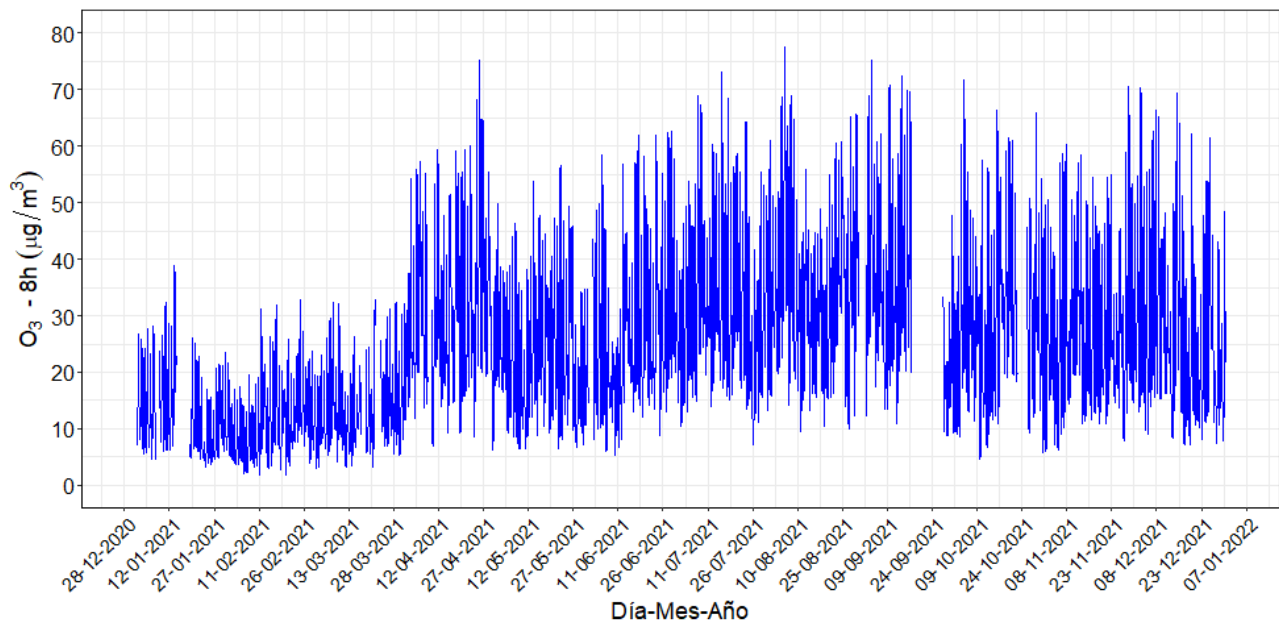


Figura 20. Evolución temporal de concentraciones promedio octohorario de O₃ durante el año 2021

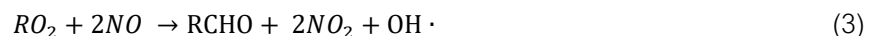
El nivel máximo permisible octohorario de la Res. 2254 de 2017 equivalente a 100 µg/m³, no fue superado

Para poder explicar el comportamiento de este contaminante, se resalta que el O_3 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 O_3 son los óxidos de nitrógeno (NO_x , que representa especies NO y NO_2) y los compuestos orgánicos volátiles (COVs). En la ciudad de Manizales ambos precursores son dominados por emisiones vehiculares (Unal - Corpocaldas, 2020). La formación de O_3 depende directamente de la relación entre COVs/ NO_x y la habilidad oxidativa de la atmósfera, que depende de la presencia de radicales hidroxilos ($OH\cdot$) en el ambiente.

Bajo una relación mayor a 1 entre COVs/ NO_x , los radicales hidroxilos (OH) reaccionarán mayoritariamente con los COVs para generar moléculas de agua, NO_2 y especies de aldehídos (ver reacciones 1, 2 y 3). Por otro lado, con una baja relación de COVs/ NO_x las reacciones de NO_x serán predominantes (ver reacciones 3, 4, 5 y 6) y removerán los radicales OH del sistema, generando consumo de O_3 mediante la reacción de titulación (ver reacción 6); para finalmente inducir la producción de especies como ácido nítrico que posteriormente precipitan en forma seca o húmeda (Sengel y otros, 2020; Fabián y Dameris, 2014).

En este sentido, la disminución de emisiones de contaminantes primarios puede ser interpretada como una reducción de emisiones de precursores como los NO_x , debido al bajo tráfico vehicular. Este fenómeno altera las reacciones fotoquímicas induciendo una mayor generación de O_3 , debido a que los radicales ($OH\cdot$) tenderán hacia la reacción con COVs y favorecerán la producción neta de NO_2 (reacciones 1, 2 y 3).

Posteriormente, la fotólisis del NO_2 (reacción 4) favorecerá la generación de O_3 (Ver reacción de titulación (6)) y el equilibrio será desplazado hacia el lado izquierdo de la reacción, este fenómeno reducirá la habilidad oxidativa de la atmósfera y por ende disminuirá el consumo de O_3 durante la noche (reacción 7), generando así un remanente atmosférico de O_3 que puede aumentar los niveles de concentración para el día siguiente (Sengel y colaboradores, 2020).



Dónde: R representa una cadena de hidrocarburos (Ej. Etano (C_2H_6) el grupo R representara la cadena C_2H_5); M representa cualquier mediador inerte que permita conservar el momento de la reacción (Ej. Nitrógeno).



Dónde: $h\nu$ representa la energía fotoquímica efecto de la radiación solar en su longitud de onda corta.

A medida que aumenta la generación de precursores en la atmósfera, se presenta una competencia por el consumo de radicales hidroxilos (OH) presentes en el ambiente y la reacción de titulación (reacción 6) es desplazada hacia un mayor consumo de O_3 , por consiguiente, una reducción de las concentraciones observadas. En este sentido se podría sugerir que las concentraciones de O_3 en la ciudad de Manizales se encuentran dominadas por la presencia de COVs en la atmósfera (Li, 201; Sengel y otros, 2020).

La Figura 21 presenta 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, se 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 $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y niveles de radiación promedio cercanos a los $500 \text{ W}/\text{m}^2$.

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 $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 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. Adicionalmente, la ausencia de radiación solar disminuye 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. Este fenómeno impide la libre dispersión de contaminantes en la atmósfera. De otra parte, se identifica que las concentraciones diurnas son aproximadamente 2.3 veces más elevadas que en las noches, con una mediana diurna de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una nocturna de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De manera general se evidencia que los promedios obtenidos no presentan relación clara con los días de la semana.

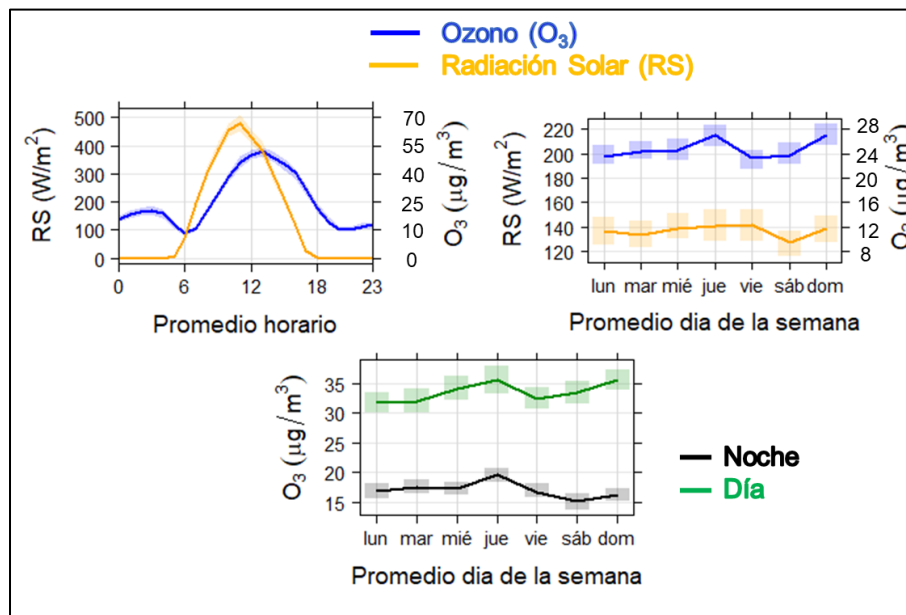


Figura 21. Variación promedio horaria y por día de la semana de O_3 – Radiación solar. Se incluye además el comportamiento promedio semanal entre las horas diurnas y nocturnas durante el año 2021

4.4. Índices de calidad del aire (ICA) para O₃, SO₂ y CO en el SVCA de Manizales

La Figura 22 presenta los índices de calidad del aire (ICA) obtenidos en las estaciones de monitoreo de CO, SO₂ y O₃. El ICA representa mediante un indicador de color, el estado de la calidad del aire de acuerdo con la concentración de cada contaminante y su posible afectación a la salud. Para el cálculo de este indicador se utiliza la metodología propuesta por la resolución 2254 de 2017 (capítulo IV artículo 18 al 21) del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (MADS 2017). Se destaca que la calidad del aire se clasificó como buena durante todo el año 2021 para los contaminantes mencionados.

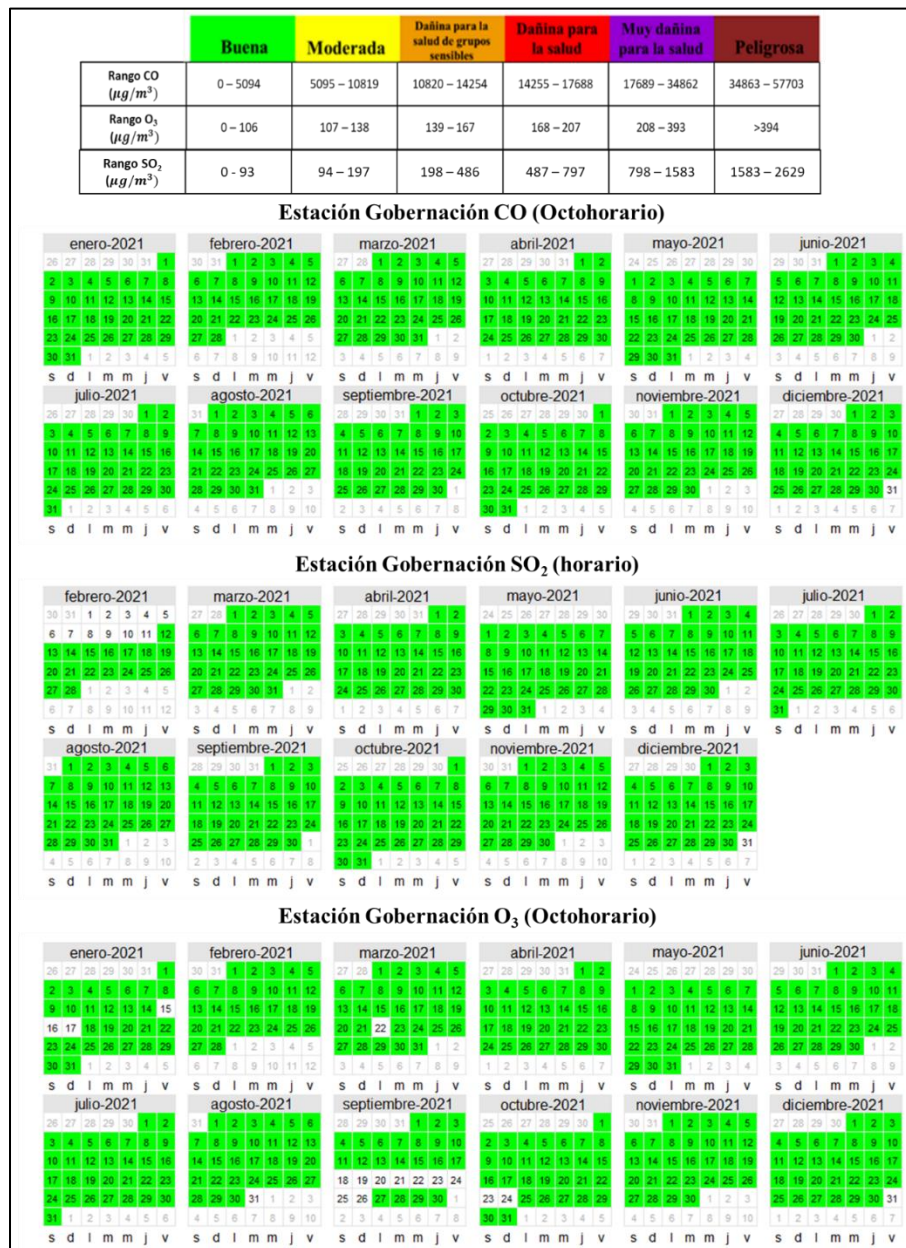


Figura 22. Índice de calidad del aire (ICA) para CO, SO₂ y O₃ en Manizales durante el año 2021

Cálculo según lineamientos de la Resolución 2254 de 2017 del MADS

5. ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS

5.1. Emisiones volcánicas – Volcán Nevado del Ruiz

Durante el año 2021 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. La Tabla 8 presenta un resumen con algunos de los días que tuvieron alturas significativas para la columna de gases (superiores a los 1100 metros). De estos días se destaca que el 70% de los reportes presentaron predominancia de vientos hacia el occidente y/o noroccidente, ubicación de Manizales, generando una posible afectación a la calidad del aire por esta fuente en la ciudad.

El efecto de esta columna de gases fue notorio para algunas concentraciones de febrero, marzo y mayo, en donde se registraron bajas humedades relativas (77.7 a 87.3%), condiciones que favorecen el transporte a meso escala de contaminantes, como sucedió Por ejemplo el 27 de febrero, cuyos registros de concentraciones diarias de PM_{2.5} fueron de 23 µg/m³ y de SO₂ de 9.7 µg/m³ respectivamente. Similarmente se evidenció un aumento para los registros de noviembre y diciembre, en donde la actividad volcánica presentó un leve aumento con respecto al patrón de comportamiento que llevaba, generando promedios para SO₂ por encima de 8 µg/m³.

Tabla 8. Resumen de emisiones volcánicas significativas (Altura de la columna de gases superiores a los 1100 m), posible afectación en concentraciones de PM_{2.5} – Manual y SO₂ en la estación Gobernación (SGC, 2021)

| Fecha (dd-mm) | Altura de la columna (m) | Predominancia del viento | Concentración promedio de PM _{2.5} (µg/m ³) – Día posterior de monitoreo (dd/mm) | Concentración promedio diaria de SO ₂ (µg/m ³) |
|---------------|--------------------------|-----------------------------|---|---|
| 3-ene | 1256 | Noroccidente | 5 – 04/01 | NA |
| 7-ene | 1108 | Occidente - Noroccidente | 10 – 07/01 | NA |
| 30-ene | 1520 | Noroccidente - Suroccidente | 16 – 31/01 | NA |
| 7-feb | 1149 | Noroccidente - Occidente | 19 – 09/02 | NA |
| 26-feb | 1154 | Noroccidente - Suroccidente | 23 – 27/02 | 9.7 |
| 6-mar | 1328 | Occidente | 13 – 08/03 | 7.5 |
| 14-mar | 1217 | Occidente - Suroccidente | 12 – 14/03 | 5.6 |
| 20-mar | 2140 | Occidente - Suroccidente | 15 – 20/03 | 8.9 |
| 29-mar | 2572 | Occidente - Suroccidente | 11 – 29/03 | 8.3 |
| 11-abr | 2118 | Occidente - Noroccidente | 4 – 11/04 | 4.9 |
| 19-abr | 1400 | Occidente - Noroccidente | 7 – 19/04 | 6.8 |

| Fecha (dd-mm) | Altura de la columna (m) | Predominancia del viento | Concentración promedio de PM _{2.5} (µg/m ³) – Dia posterior de monitoreo (dd/mm) | Concentración promedio diaria de SO ₂ (µg/m ³) |
|---------------|--------------------------|---------------------------|---|---|
| 20-abr | 2150 | Occidente - Noroccidente | 6 – 22/04 | 5.9 |
| 1-may | 1460 | Occidente - Noroccidente | 13 – 1/05 | 4 |
| 9-may | 1290 | Noroccidente - Suroriente | 16 – 10/05 | 7.9 |
| 19-may | 1128 | Occidente - Noroccidente | 21 – 19/05 | 5.1 |
| 31-may | 2700 | Occidente - Noroccidente | 16 – 31/05 | 6.5 |
| 28-jul | 2171 | Noroccidente | 14 – 30/07 | 6.9 |
| 14-ago | 1435 | Occidente - Noroccidente | 17 – 14/08 | 5.9 |
| 20-ago | 1154 | Occidente - Noroccidente | 20 – 20/08 | 5.8 |
| 25-ago | 1170 | Occidente - Noroccidente | 22 – 26/08 | 4.9 |
| 6-sep | 1588 | Occidente - Noroccidente | 11 – 07/09 | 5.4 |
| 3-oct | 1436 | Nororiente | 26 – 04/10 | 7.5 |
| 8-oct | 1412 | Nororiente | 24 – 10/10 | 7.4 |
| 18-oct | 1950 | Occidente - Noroccidente | 11 – 19/10 | 5.4 |
| 25-oct | 1583 | Occidente - Noroccidente | 10 – 25/10 | 5.9 |
| 1-nov | 2460 | Occidente - Noroccidente | 12 – 02/11 | 7.2 |
| 8-nov | 1861 | Occidente - Noroccidente | 12 – 08/11 | 8.4 |
| 10-nov | 2484 | Sororiente - Nororiente | 14 – 11/11 | 8.8 |
| 16-nov | 1827 | Sororiente - Nororiente | 11 – 17/11 | 8.5 |
| 23-nov | 1530 | Sororiente - Nororiente | 13 – 23/11 | 8.3 |
| 1-dic | 1470 | Occidente - Noroccidente | 13 – 02/12 | 7.4 |
| 12-dic | 2656 | Occidente - Noroccidente | 18 – 14/12 | 7.3 |
| 17-dic | 1800 | Occidente - Noroccidente | 17 – 17/12 | 9.5 |
| 22-dic | 1681 | Oriente - Suroriente | 15 – 23/12 | 7.8 |

NA: Indica que el día no contó con mediciones.

6. REFERENCIAS

- Carslaw, D.C. y Ropkins K., 2015. The openair manual – opensource tools for analysing air pollution data. Manual for version 1.1-4. King's college London.
- 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>.
- G. Loosmore y R. Cederwall, 2004. 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
- 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, 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.
- Organización Mundial de la Salud – OMS, 2018. [En línea] Disponible en: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Organización Mundial de la Salud – OMS, 2021. WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.
- Our World in Data, “Indoor Air Pollution” Hannah Ritchie and Max Roser, 11 2019. [En línea]. Disponible en: <https://ourworldindata.org/indoor-air-pollution>. [Último acceso: 23/10/2020].
- Servicio geológico colombiano (SGC), 2020. Boletín semanal de actividad del volcán Nevado del Ruiz. Manizales, Caldas. Dirección de geo amenazas.
- 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>
- Unal – Corpocaldas, 2019a. Actualización del inventario de emisiones atmosféricas en la ciudad de Manizales año base 2017. Boletín de resultados. Disponible en: <http://cdiac.manizales.unal.edu.co/inicio/publicaciones.php>
- Unal – Corpocaldas, 2019b. Boletín CA Manizales año 2019. Disponible en: http://cdiac.manizales.unal.edu.co/inicio/publicaciones/Bolet%C3%ADn_CA_Manizales_a%C3%B1o_2020.pdf
- Unal – Corpocaldas, 2020. Boletín CA Manizales año 2020. Disponible en: https://cdiac.manizales.unal.edu.co/publicaciones/Boletin_calidad_aire_Manizales_a%C3%B1o_2019.pdf