



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA



Boletín Ambiental

Fotografía: Nevado del Ruiz
Fuente: Servicio Geológico Colombiano

Instituto de Estudios Ambientales -IDEA- Sede Manizales

205 | julio de
2023

Calidad del aire en Manizales
durante periodo de actividad
naranja del volcán Nevado del Ruiz

IDEA
Instituto de Estudios Ambientales

Calidad del aire en Manizales durante periodo de actividad naranja del volcán Nevado del Ruiz

Angel David Gálvez Serna, Erika Marcela Trejos Zapata, Carlos Mario González Duque, Mauricio Velasco García*, Jeannette Zambrano Nájera.

Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental -GTAIHA-
Instituto de Estudios Ambientales -IDEA- Universidad Nacional de Colombia
Sede Manizales

*Subdirección de Evaluación y Seguimiento Ambiental -Corporaldas-

1. Generalidades del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) de Manizales

El incremento en la demanda de recursos para suplir las necesidades de la población actual está trayendo diversas consecuencias ambientales, por ejemplo, un aumento en los niveles de contaminación del aire en centros urbanos.

El monitoreo de la contaminación atmosférica es fundamental dentro de la gestión de la calidad del aire y toma cada día más fuerza, ya que, junto con otros instrumentos (por ejemplo, inventarios de emisiones y modelización atmosférica) permite estudiar el estado de la calidad del aire, identificar posibles impactos de las fuentes de contaminación, analizar tendencias a mediano y largo plazo y, evaluar el riesgo sobre la salud humana. Todo esto genera las bases para plantear estrategias enfocadas en mitigar los niveles de contaminación y así garantiza un mayor bienestar de la población.

Actualmente, Manizales cuenta con un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) conformado por seis estaciones para el monitoreo activo de aire ambiente sobre el área urbana de la ciudad (ver Figura 1). En total, se tienen nueve (9) equipos para el monitoreo de material particulado en sus fracciones PM_{10} y $PM_{2.5}$, de los cuales, seis (6) equipos son de tipo manual para 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). La red es operada 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).

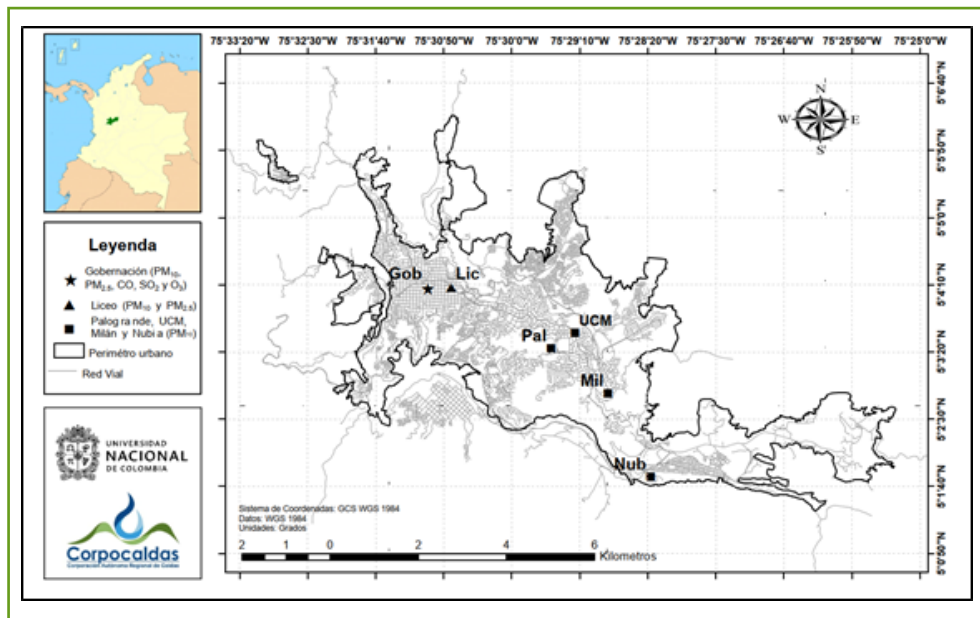


Figura 1. Mapa del área urbana de Manizales con ubicación de las estaciones de calidad del aire pertenecientes al SVCA

En el monitoreo de calidad del aire es importante comprender las diferencias entre las técnicas de monitoreo activas de tipo manual y automático, ya que, según el método, se pueden obtener datos de concentración en aire ambiente con periodicidad diaria o registros de concentración horaria de forma continua. En el caso del seguimiento de PM_{10} y $PM_{2.5}$ con equipos manuales (ver imagen de equipo manual de PM_{10} en la Figura 2a), se obtienen registros promedio diario de concentración en aire ambiente del contaminante de interés a partir de muestras que se toman cada tres días. Cabe mencionar que los resultados de concentración provenientes de equipos manuales son obtenidos una vez se realiza un análisis gravimétrico en el laboratorio, el cual consiste en el pesaje de filtros antes y después del monitoreo bajo condiciones controladas de humedad y temperatura.

De otra parte, los equipos automáticos con los que se monitorea material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) y gases (O_3 , SO_2 y CO) en la ciudad (ver imagen de cabina de monitoreo de gases y nefelómetro para PM en la Figura 2b), permiten la obtención continua de registros de concentración cada cinco minutos, datos a partir de los cuales se obtienen valores promedio horario (media aritmética) y registros promedio octohorario de gases como CO y O_3 (media móvil a partir de registros horarios). Todos los registros obtenidos de partículas y gases en aire ambiente (tanto de equipos manuales como automáticos) son comparados con los límites máximos permisibles definidos en la normativa colombiana; Resolución 2254 de 2017 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS-, 2017).

Los equipos de monitoreo operan bajo un método de ensayo específico para cuantificar las concentraciones según cada tipo de contaminante. De manera general, los equipos de tipo activo tienen una bomba de succión de aire y un medidor de volumen que permiten obtener la concentración del contaminante en términos de masa del contaminante por volumen de aire muestreado.



Figura 2. Algunos equipos de monitoreo del SVCA de Manizales. (a) Estación Liceo - Equipo manual Hi-Vol PM_{10} . (b) Estación Gobernación - Equipos automáticos, cabina de gases (O_3 , SO_2 y CO) y nefelómetro (PM_{10} y $PM_{2.5}$)

Cada estación del SVCA se encuentra en un lugar de interés y fue instalada con un propósito específico. En la Tabla 1 se resumen las características principales de cada una de las estaciones de monitoreo y las fuentes de emisión predominantes en el área de influencia. Las fuentes de emisión están relacionadas con las actividades desarrolladas en la zona circundante; además, es importante la caracterización del tipo de sector al que pertenezcan en la ciudad (residencial, comercial, industrial, entre otros). Cabe destacar que las mediciones obtenidas en los equipos corresponden al valor de concentración del contaminante en aire ambiente, por lo tanto, es complejo atribuir su valor a una fuente de emisión única. Los valores de concentración del SVCA representan la influencia de las fuentes de emisión circundantes en el área de influencia de la estación y el posible transporte de contaminantes provenientes de otras regiones. Es importante tener en cuenta también que, a pesar de que la ciudad tiene un área urbana pequeña (54 km² aproximadamente), se caracteriza por una topografía compleja y zonas con actividades diferenciadas, lo que otorga a las estaciones particularidades no solo en cuanto a las condiciones meteorológicas y condiciones de altura, sino también, en las dinámicas de las fuentes de emisión.

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

Estación (Abreviatura)	Características y fuentes de contaminantes*	Equipos	Propietario	Año de instalación	Latitud / Longitud	Altitud ms.n.m.
Gobernación (Gob)	CU, SC – MTV, MAI	PM ₁₀ – Manual ^a	Corpocaldas	2009	N 5° 4' 6.53" W 75° 31' 1.54"	155
		PM _{2.5} – Manual ^a	Corpocaldas	2009		
		SO ₂ – Automático	UN	2014		
		O ₃ – Automático	UN	2014		
		CO – Automático	Corpocaldas	2018		
		PM ₁₀ y PM _{2.5} – Automático ^b	Corpocaldas	2019		
Palogrande (Pal)	ZC, SR – MTV, SAI	PM ₁₀ – Manual ^c	UN	2009	N 5° 3' 22.4" W 75° 29' 31.3"	2154
Nubia (Nub)	ZSE, SR – MTV, MAI	PM ₁₀ – Manual ^c	UN	2009	N 5° 1' 47.0" W 75° 28' 18"	2091
Liceo (Lic)	CU, SC – ATV, PAI	PM ₁₀ – Manual ^c	Corpocaldas	2000	N 5° 4' 5.01" W 75° 30' 37.58"	2156
		PM ₁₀ y PM _{2.5} – Automático ^b	Corpocaldas	2019		
Milán (Mii)	ZC, SR – MTV, AAI	PM ₁₀ – Manual ^c	Corpocaldas	2012	N 5° 2' 48.5" W 75° 28' 48.68"	2188
Católica (UCM)	CU, SC – ATV, SAI	PM ₁₀ – Manual ^c	Corpocaldas - UCM	2021	N 5° 3'34.13" W 75°29'13.63"	2091

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:

TV: Alto tráfico vehicular

AI: Alta actividad industrial

ZI: 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

El objetivo del presente boletín es difundir algunos de los resultados obtenidos en el seguimiento de contaminantes atmosféricos que son monitoreados por el Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire de Manizales, comparando las concentraciones registradas durante el periodo de alerta naranja del volcán Nevado del Ruiz y el periodo previo del 2023, que se tomó como periodo base.

2. Metodología para análisis comparativo de concentraciones antes y durante el periodo de actividad volcánica en nivel naranja

Los resultados presentados en este boletín corresponden a un análisis comparativo de registros de concentración en aire ambiente provenientes de las mediciones del SVCA de Manizales durante 2023. Se compararon resultados obtenidos antes de decretarse el nivel de actividad naranja del volcán Nevado del Ruiz (enero 1 a marzo 30 de 2023), con los registros obtenidos durante los últimos meses con condiciones de actividad naranja del volcán (marzo 31 a junio 27 de 2023).

El análisis comparativo, estadístico y gráfico se enfocó en los contaminantes que pueden sufrir algún cambio derivado de las emisiones volcánicas. Por ejemplo, el Material Particulado (PM) en sus fracciones PM_{10} (partículas con diámetro menor o igual a 10 micrómetros) y $PM_{2.5}$ (partículas con diámetro menor o igual a 2.5 micrómetros). Este contaminante tiene la capacidad de ingresar al sistema respiratorio y ocasionar problemas en la salud que van desde tos, dificultad para respirar, asma, hasta infartos no letales y muertes prematuras en personas con problemas cardíacos (OMS, 2018). Adicionalmente, muchos de los efectos tóxicos y cancerígenos del aire contaminado en las ciudades, se han vinculado a la presencia de hidrocarburos (HC) como los aromáticos policíclicos PAH o HAP que son adsorbidos en el material particulado y posteriormente ingresan al sistema respiratorio (Quijano Parra & Meléndez Gélvez, 2014). De acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano – SGC: *“La ceniza volcánica está conformada por partículas que tienen un tamaño menor de dos milímetros; dicho material particulado puede ser de cristales de minerales, rocas o vidrio. Su composición depende de factores como el tipo de erupción o del volcán”* (Servicio Geológico Colombiano – SGC, 2023). Las cenizas volcánicas pueden recorrer entre cientos y miles de kilómetros desde un volcán en la dirección del viento predominante. De acuerdo con la US EPA: *“La ceniza volcánica fresca es arenosa, abrasiva, en ocasiones corrosiva y siempre desagradable. Aunque la ceniza no es altamente tóxica, puede afectar a los niños pequeños, a los ancianos y a quienes*

sufren problemas respiratorios. La ceniza también puede introducirse en los ojos y rayarlos, especialmente cuando hay mucho viento. La ceniza puede ser peligrosa para el ganado de pastoreo y dañar las instalaciones de tratamiento del agua potable y de las aguas residuales (u obligar su cierre) al obturar o dañar los equipos” (US EPA, 2023).

El dióxido de azufre (SO_2) es otro de los contaminantes de interés; este gas está ligado a posibles efectos adversos en la salud humana y los ecosistemas debido a sus características fisicoquímicas. Entre las principales fuentes de emisión de SO_2 , se destacan actividades antrópicas como los procesos de combustión o quema de combustibles fósiles, y en el caso particular relacionado con influencia volcánica; los gases volcánicos contienen potenciales gases nocivos como el SO_2 y el fluoruro de hidrógeno (H_2S). A nivel regional, estos gases pueden influir en fenómenos como la lluvia ácida.

Además de presentar resultados de la medición de los contaminantes PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y SO_2 , se incluye en este boletín, un análisis general de resultados del monitoreo del contaminante monóxido de carbono (CO). Este gas está asociado predominantemente a la combustión incompleta de combustibles fósiles, siendo un gas traza relativamente estable con una vida media de días o semanas, que puede brindar información interesante sobre posible influencia de fuentes de emisión antropogénica (vehicular o industrial, por ejemplo). En este sentido, al aplicar el análisis comparativo propuesto a este contaminante, se podrían inferir posibles cambios derivados netamente de actividad volcánica (en caso de obtener resultados diferentes para CO en comparación con PM y SO_2) o concluir que las diferencias obtenidas se deban a una combinación de factores de origen antropogénico, volcánico y meteorológico.

A continuación, se exponen algunas de las particularidades de los equipos del SVCA de Manizales necesarias para comprender cómo se obtienen los registros de concentración de los contaminantes mencionados y su periodicidad. Para conocer una descripción más detallada de los equipos y su principio de funcionamiento, se recomienda al lector, consultar, adicionalmente, los boletines

ambientales 149 y 188 del Instituto de Estudios Ambientales –IDEA de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, disponibles en: <https://idea.manizales.unal.edu.co/boletin-ambiental.html>.

2.1. Monitoreo de material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$)

El seguimiento de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en Manizales se realiza mediante dos técnicas de monitoreo de tipo activo. El primer caso corresponde a equipos manuales en donde se obtienen registros promedio diario de concentración en aire ambiente (muestras de 24 horas continuas), las cuales son tomadas cada tres días de acuerdo con las indicaciones del Protocolo de Operación de Sistemas de Vigilancia del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Cabe mencionar que, en Manizales se operan dos tipos de equipos manuales designados como métodos de referencia EPA, los equipos de alto volumen (se cuenta con cinco equipos de PM_{10} en la ciudad) y de bajo volumen, donde se tiene un equipo de PM_{10} y uno de $PM_{2.5}$ ambos en la estación Gobernación.

El método de alto volumen (Hi-Vol), referencia EPA 40CFR Parte 50 Apéndice J (EPA, 2017), es representado en la Figura 3a. El aire es impulsado hacia el cabezal, el cual está diseñado para fraccionar las partículas con tamaños mayores a $10\mu m$. Las partículas con diámetros iguales o menores a $10\mu m$ son recolectadas en un filtro de fibra de vidrio o microcuarzo que debe ser pesado antes y después del muestreo, con el objetivo de determinar el peso neto ganado. El volumen total de aire se determina a partir de la velocidad de flujo promedio y del tiempo de muestreo del equipo. Finalmente, para obtener el valor de concentración, la masa de las partículas recolectadas en el filtro se divide entre el volumen de aire muestreado, teniendo en cuenta el ajuste final a las condiciones de referencia de temperatura y presión (Thermo Andersen (2010)). En la Figura 3b se presenta un resumen del procedimiento de monitoreo de PM_{10} – Manual mediante la metodología de equipos de bajo volumen (Low-Vol) referencia EPA 40CFR Parte 50 Apéndice L (EPA, 2017).

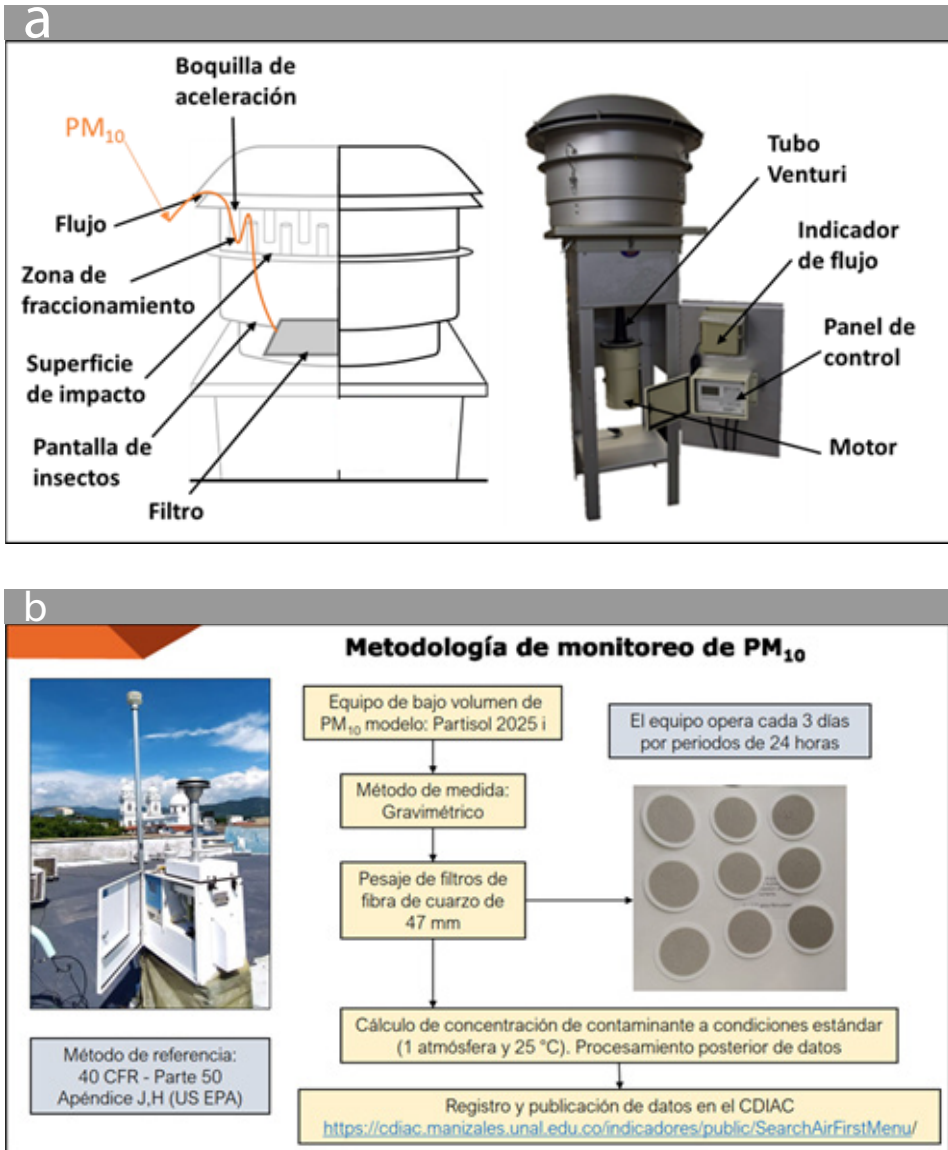


Figura 3. Esquema de muestreadores manuales de PM₁₀. a) Muestreador de alto volumen Hi-Vol. b) Muestreador de bajo volumen Low-Vol

Fuente: Thermo Andersen (2010) y Unal, Corpocaldas (2022) – Boletín informativo La Dorada, Caldas

Para el caso de los equipos automáticos, en el SVCA se cuenta con dos analizadores para la medición continua de PM_{10} y $PM_{2.5}$ mediante equipos que funcionan con métodos ópticos, modelo Air Pollution Monitor APM-2 (Nefelómetro) según método de referencia europeo designado EN 12341 y EN 14907. El corazón del dispositivo es un fotómetro de luz dispersa altamente sensible que aplica las características físicas de dispersión de la luz de las micropartículas para la determinación de su concentración (Comde-Derenda, 2014).

Este tipo de analizador permite separar las fracciones de partículas debido a la configuración de múltiples impactadores y genera un flujo constante de aire a 3.3 L/min. Una vez la muestra llega a la cámara de medición, un diodo láser ilumina un volumen de medición definido por la trayectoria del haz óptico. La luz reflejada por las partículas de aerosol dentro de este volumen de medición es registrada por el detector colocado en un ángulo de 90° . La señal de voltaje generada y luego amplificada por el detector representa una medida directa de la concentración de masa del aerosol en el volumen de medición ($0-1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Comde-Derenda, 2014). Esta técnica de medición permite obtener registros de concentración de forma continua cada cinco minutos, valores que posteriormente se promedian para obtener los registros de concentración con periodicidad horaria y diaria. La Figura 4 muestra una imagen del nefelómetro de la estación Gobernación.



Figura 4. Fotografía del analizador APM-2 ubicado en la estación Gobernación
Fuente: elaboración propia

2.2. Monitoreo de dióxido de azufre (SO₂)

El monitoreo de dióxido de azufre (SO₂) se realiza mediante un analizador automático de fluorescencia UV, Modelo T-100, Marca Teledyne API; método de referencia número EQSA-0495-100, EPA40 CFR Parte 53 (EPA, 2017). Este analizador determina la concentración de dióxido de azufre (SO₂) en el aire al exponer la muestra de aire a luz ultravioleta en el instrumento, lo cual causa que el SO₂ presente emita fluorescencia (Calaire - Unal, 2014).

El instrumento posee un diseño óptico avanzado combinado con un depurador de hidrocarburos, los cuales tienen una fluorescencia similar al SO₂, para evitar interferencias. El principio físico sobre el cual está basado el método de medición es la fluorescencia que ocurre cuando el dióxido de azufre (SO₂) cambia a su estado excitado (SO₂^{*}) por la luz ultravioleta con longitudes de onda en un

rango entre 190 a 230 nm. El analizador utiliza valores de calibración junto con otros parámetros de rendimiento, tales como, el desplazamiento del sensor, la intensidad de la lámpara UV, la cantidad de luz dispersa presente, las mediciones de temperatura y presión del gas de muestra, para calcular la concentración instantánea de SO_2 (Teledyne API, 2010).

La Figura 5 presenta una fotografía de la cabina de gases que se encuentran en la estación Gobernación, donde se realiza la medición continua de los contaminantes SO_2 , CO y O_3 , obteniendo registros cincominutales de concentración en aire ambiente de contaminantes gaseosos; valores que posteriormente se promedian para obtener los registros de concentración con periodicidad horaria, octohoraria (en el caso del CO y O_3) y diaria en el SVCA de Manizales.



Figura 5. Cabina de gases (SO_2 , CO y O_3) de la estación Gobernación
Fuente: elaboración propia

2.3 Monitoreo de monóxido de carbono (CO)

El monitoreo de monóxido de carbono (CO), se realiza mediante un analizador automático modelo 48i-ACSCC, Marca *Thermo scientific*, perteneciente al método de referencia número RFCA-0981-054, EPA40 CFR Parte 53 (EPA, 2017). El analizador modelo 48i opera bajo el principio de absorción de radiación infrarroja a una longitud de onda de 4.6 micrones por el CO. El instrumento utiliza una curva de calibración almacenada internamente para linealizar con precisión la salida del instrumento en cualquier

rango hasta una concentración de 10 000 ppm (Thermo Fisher Scientific Inc, 2007). La radiación de una fuente de infrarrojos se corta y pasa a través de un filtro de gas alternante entre CO y N₂, esta radiación pasa luego por un estrecho filtro de interferencia y entra al banco óptico, donde se produce la absorción del gas de la muestra para posteriormente salir del banco óptico y chocar con un detector de infrarrojo. El filtro de gas de CO actúa como un haz de referencia que no puede ser atenuado aún más por el CO de la muestra, mientras el N₂ es transparente a la radiación infrarroja y por lo tanto produce un haz de medida que si puede ser absorbido por el CO de la muestra (Thermo Fisher Scientific Inc, 2007).

Este contaminante se monitorea en la estación Gobernación, donde se realiza la medición continua los 365 días del año obteniendo registros cincominutales en el SVCA de Manizales.

2.4 Análisis de series temporales

Como se mencionó al inicio de la sección metodológica, el objetivo fundamental del análisis fue comparar de forma general los resultados obtenidos en el monitoreo de los contaminantes del aire descritos durante lo corrido de 2023, analizando los cambios en los perfiles diurnos, así como promedios horarios y diarios obtenidos antes de decretarse el nivel de actividad naranja del volcán Nevado del Ruiz (enero 1 a marzo 30 de 2023), y aquellos registrados en el periodo de actividad naranja del volcán (marzo 31 a junio 27 de 2023). Los cálculos y gráficos fueron realizados con el software R y librerías de utilidad para el análisis para datos de calidad del aire como “Openair” (Carslaw y Ropkins, 2015). El análisis estadístico propuesto consta de la estimación de la estadística básica (promedios, desviación estándar, mínimos y máximos).

Teniendo en cuenta que todos los equipos automáticos de PM₁₀, PM_{2.5} y gases analizados (SO₂ y CO) permiten la obtención de registros cincominutales, se calcularon los valores promedio horario (media aritmética) y registros prome-

dio diario, con el fin de tener un comparativo con la normatividad colombiana vigente: Resolución 2254 de 2017, que establece los límites máximos permisibles en aire ambiente para contaminantes criterio (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS-, 2017).

De otra parte, se realizó un análisis gráfico de las concentraciones promedio de los contaminantes monitoreados (PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 y CO), evaluando la evolución de las series temporales de cada contaminante. Asimismo, se generaron comparativos gráficos entre periodos de interés en diferentes escalas temporales (horario, diario y consolidados por día de la semana).

Se aclara que la información del presente boletín es publicada también a través de indicadores y estadísticos descriptivos en el CDIAC y el SISAIRE – IDEAM. 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 (datos, boletines informativos y material educativo), y de otras redes (hidrometeorológica, sismos y aguas subterráneas) de la ciudad de Manizales y el departamento de Caldas.

2.5 Visualización de imágenes satelitales de la pluma de dispersión del volcán y reportes del SGC

Finalmente, como herramientas de apoyo en el entendimiento de la influencia volcánica, se realizó la consulta de los boletines oficiales del Servicio Geológico Colombiano -SGC- y se revisaron plataformas externas relacionadas con imágenes satelitales que permiten visualizar el comportamiento de la columna de gases del volcán, como el producto del proyecto “Sentinel 5P/TROPOMI” de la European Space Agency (ESA), disponible en el repositorio: <https://so2.gsfc.nasa.gov/>. La consulta de los boletines oficiales del Servicio Geológico Colombiano – SGC – está disponible en el enlace: <https://www.sgc.gov.co/>, secciones: “Sala de Prensa” / “Boletines Extraordinarios” / “Boletines Semanales” / “Boletines Mensuales”. Allí se pueden consultar reportes de emisión del volcán, día y altu-

ra de la columna de gases desde la boca del volcán, direcciones predominantes de la pluma de emisión; en algunas situaciones extraordinarias hora exacta de emisión, entre otros factores geotérmicos relacionados con la actividad volcánica.

3. Resultados del monitoreo de calidad del aire. Análisis de su posible relación con la actividad volcánica

3.1 Comportamiento del material particulado

Un primer análisis de posibles cambios asociados con las concentraciones de material particulado se puede visualizar en las gráficas de evolución temporal de concentración horaria de material particulado obtenidas con los equipos automáticos de las estaciones Gobernación (Figura 6a) y Liceo (Figura 7a). Durante el periodo de actividad naranja se observó que las concentraciones no presentaron un incremento en sus valores horarios y, en cambio, se reportaron valores en ambas estaciones dentro de los rangos de medición obtenidos previo a decretarse el cambio en la actividad volcánica.

Al analizar los perfiles diurnos por cada día de la semana en Gobernación y Liceo (Figura 6b y Figura 7b respectivamente), se corrobora la tendencia a un descenso en los valores de concentración de PM durante el periodo de actividad naranja. Es importante destacar que el análisis de perfiles muestra cómo el comportamiento de las concentraciones no registró un cambio atípico en los niveles de concentración, que pudiera estar asociado, por ejemplo, a un episodio de emisión volcánica importante o una emisión atípica de una fuente antropogénica cercana.

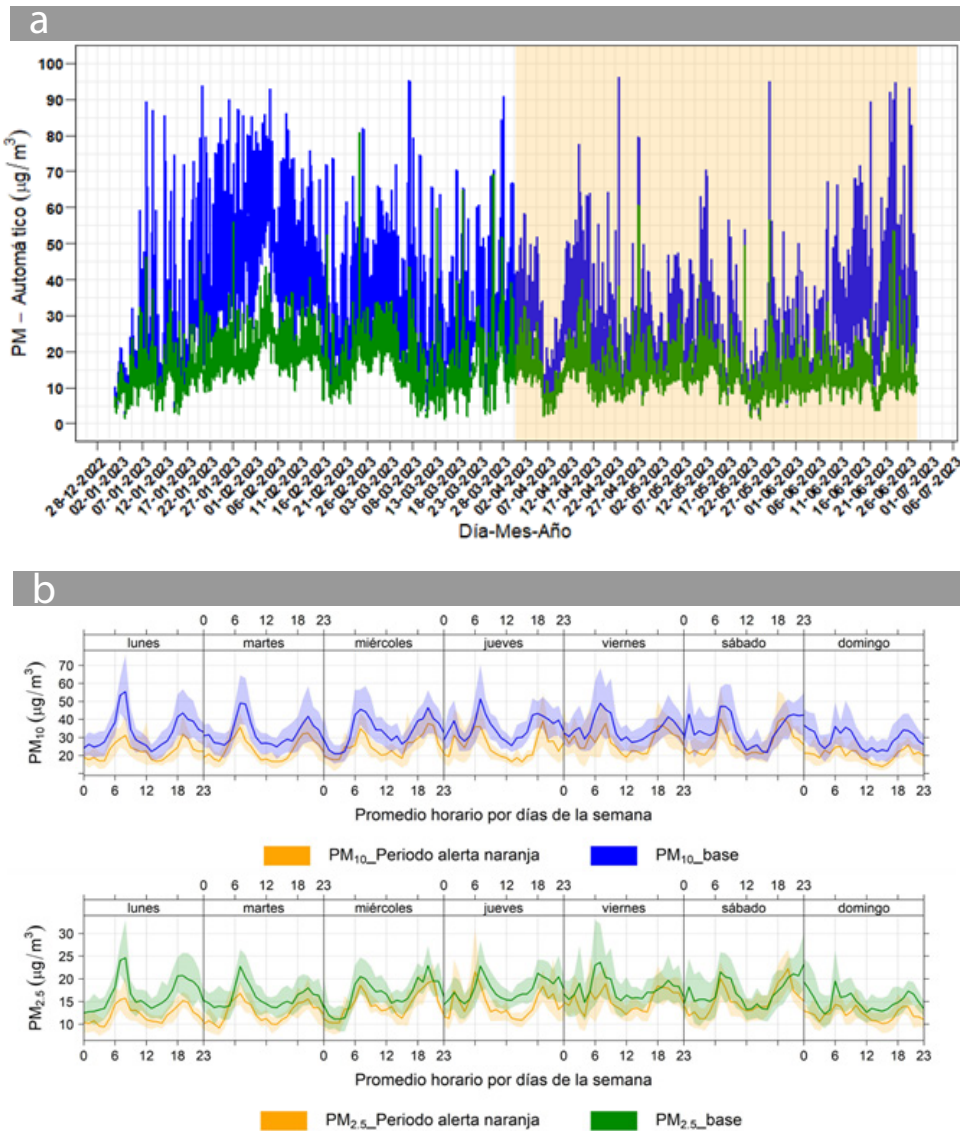


Figura 6. Concentraciones horarias de equipos automáticos de PM en la estación Gobernación. (a) Evolución temporal de PM₁₀ (azul) y PM_{2.5} (verde). La zona sombreada indica periodo de actividad volcánica en nivel naranja. (b) Promedio de concentraciones horarias por días de la semana para periodo sin actividad naranja (base) y con actividad naranja

Fuente: elaboración propia

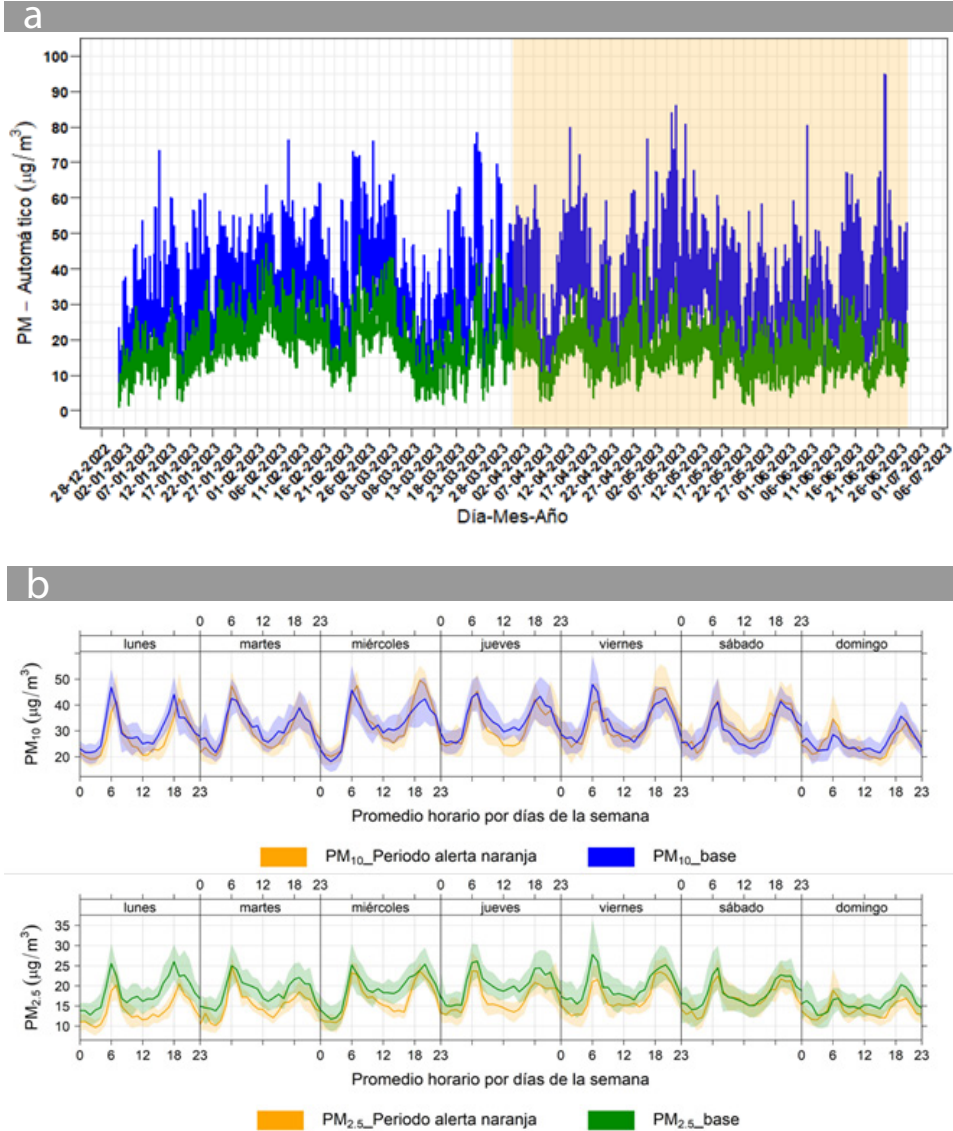


Figura 7. Concentraciones horarias de equipos automáticos de PM en la estación Liceo. (a) Evolución temporal de PM₁₀ (azul) y PM_{2.5} (verde). La zona sombreada indica periodo de actividad volcánica en nivel naranja. (b) Promedio de concentraciones horarias por días de la semana para periodo sin actividad naranja (base) y con actividad naranja

Fuente: elaboración propia

Este mismo comportamiento se obtuvo para los equipos manuales de PM_{10} (Figura 8), donde se observa claramente que en ninguna estación de monitoreo se registró un aumento importante de las concentraciones diarias de PM_{10} . Estimando los cambios porcentuales que se obtuvieron al comparar el promedio de concentraciones del periodo base con el del periodo de actividad volcánica (Tabla 2), se observa cómo en todas las estaciones de monitoreo del SVCA de Manizales, se presentó una disminución en el promedio de PM_{10} comparando el periodo de actividad naranja con el periodo base, con diferencias porcentuales entre el 26 % (Gobernación) y 3 % (Liceo). Este mismo comportamiento se presentó para $PM_{2.5}$ con diferencias porcentuales entre promedios de análisis de equipos automáticos de 15 % en Liceo y 18 % en Gobernación.

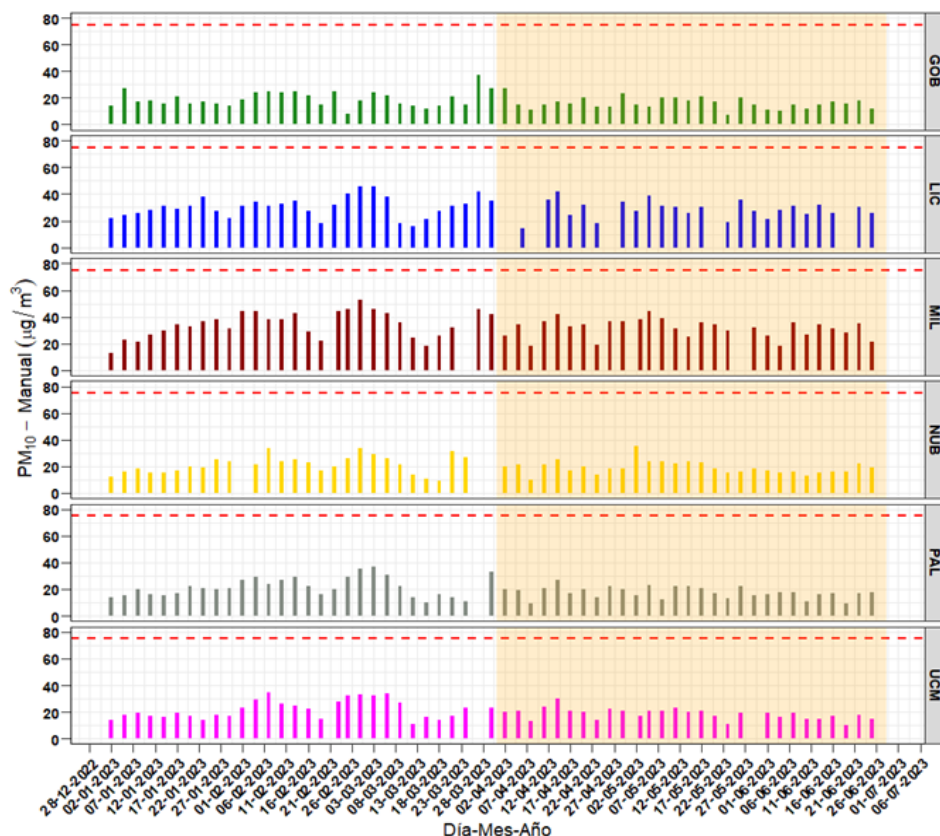


Figura 8. Evolución de las concentraciones diarias de equipos manuales de PM_{10} en estaciones del SVCA de Manizales. La zona sombreada indica periodo de actividad volcánica en nivel naranja. La línea punteada roja indica el límite normativo diario establecido en la Resolución 2254 de 2017

Tabla 2. Promedio general de concentraciones de contaminantes para periodo previo (base) y de actividad naranja en el SVCA de Manizales

Estación	Contaminante	Promedio de concentración ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) durante periodo base (enero 1 a marzo 30)	Promedio de concentración ($\mu\text{g} / \text{m}^3$) durante periodo actividad naranja (marzo 31 a junio 27)	Diferencia porcentual
Gobernación	PM ₁₀ -Automático	33.1 ($\sigma = 18.3$)	24.4 ($\sigma = 14.0$)	26%
	PM _{2.5} -Automático	16.6 ($\sigma = 7.6$)	13.7 ($\sigma = 5.8$)	18%
	PM ₁₀ -Manual	19.4 ($\sigma = 5.9$)	15.9 ($\sigma = 4.2$)	18%
	PM _{2.5} -Manual	12.9 ($\sigma = 4.9$)	12 ($\sigma = 3.2$)	7%
	SO ₂	5 ($\sigma = 2.2$)	4.5 ($\sigma = 2.3$)	10%
	CO	978.3 ($\sigma = 643.1$)	816.7 ($\sigma = 574.9$)	17%
Liceo	PM ₁₀ -Automático	30.8 ($\sigma = 12.3$)	29.9 ($\sigma = 12.6$)	3%
	PM _{2.5} -Automático	18.5 ($\sigma = 7.5$)	15.7 ($\sigma = 6.0$)	15%
	PM ₁₀ -Manual	30.4 ($\sigma = 7.8$)	28.5 ($\sigma = 6.6$)	6%
Milán	PM ₁₀ -Manual	34.5 ($\sigma = 9.9$)	31.5 ($\sigma = 6.9$)	9%
Palogrande	PM ₁₀ -Manual	21.6 ($\sigma = 7.3$)	17.6 ($\sigma = 4.3$)	19%
UCM	PM ₁₀ -Manual	21.9 ($\sigma = 6.9$)	18.6 ($\sigma = 4.2$)	15%
Nubia	PM ₁₀ -Manual	21.2 ($\sigma = 6.7$)	19 ($\sigma = 4.8$)	10%

σ : Desviación estándar

3.2. Comportamiento de los gases SO₂ y CO

Al igual que el material particulado, los resultados obtenidos en el monitoreo de gases como el SO₂, de influencia antrópica y volcánica muestran, en general, un comportamiento estable entre ambos periodos de comparación, con solo algunos picos puntuales (no continuos) que se han registrado en el equipo de

medición en lo corrido del año, pero con concentraciones que no revisten un riesgo para la salud humana (ver Figura 9). Asimismo, se refuerza la hipótesis de un impacto mínimo de las emisiones volcánicas durante el periodo de actividad naranja al analizar un gas traza como el monóxido de carbono (CO) (ver Figura 10), con marcada influencia antropogénica, ya que para este contaminante los resultados también muestran un comportamiento estable y similar al obtenido para PM y SO₂. Es decir, los cambios presentados en los perfiles de los contaminantes medidos en la red estuvieron influenciados principalmente por las dinámicas de emisión antropogénica y la meteorología de la región.

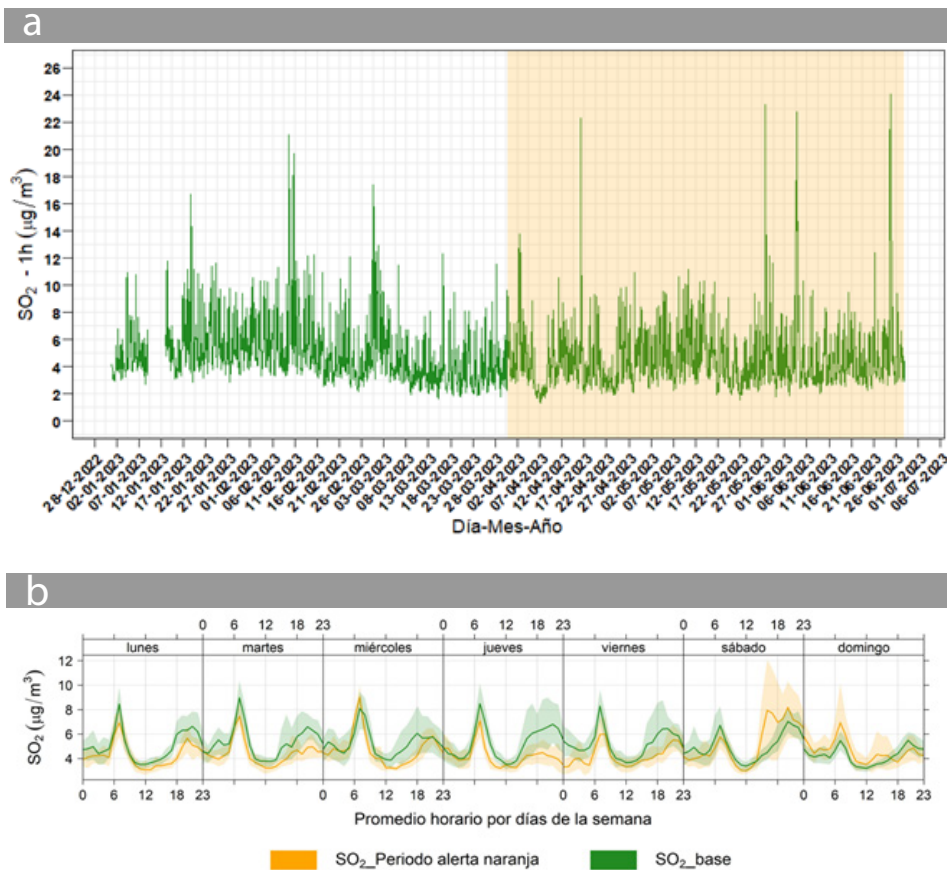


Figura 9. Concentración horaria de SO₂ en la estación Gobernación. (a) Evolución temporal. La zona sombreada indica periodo de actividad volcánica en nivel naranja. (b) Promedio de concentraciones horarias por días de la semana para periodo sin actividad naranja (base) y con actividad naranja

Fuente: elaboración propia

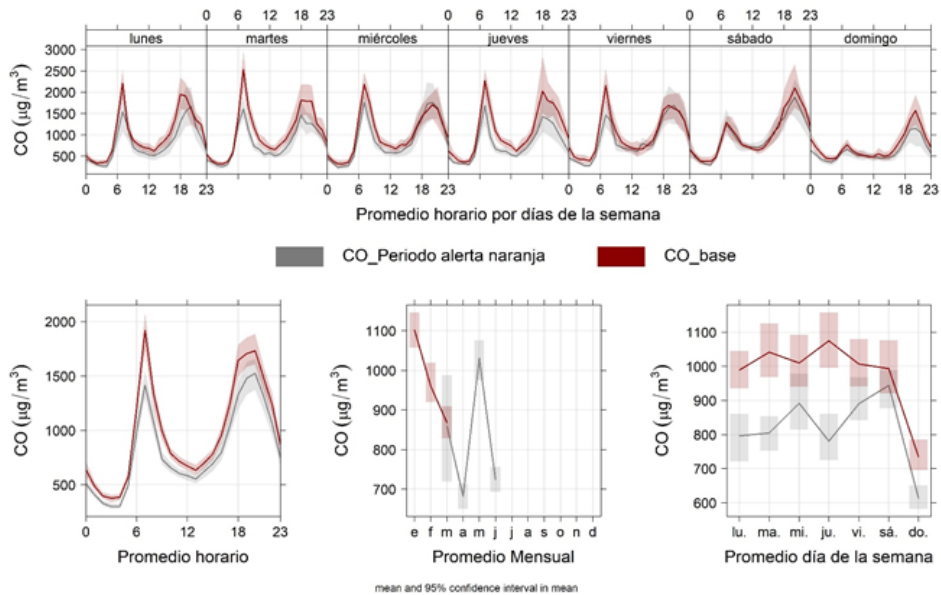


Figura 10. Perfiles de concentración horaria, diaria y por días de la semana, del contaminante CO monitoreado en la estación Gobernación para periodo sin actividad naranja (base) y con actividad naranja

Fuente: elaboración propia

3.3 Análisis del comportamiento de variables meteorológicas y concentración de PM_{10}

Con el fin de generar otros insumos adicionales para analizar y explicar los resultados obtenidos de los contaminantes atmosféricos monitoreados durante periodo de actividad naranja y periodo base (previo), se realizó un análisis del comportamiento de variables meteorológicas de interés como la precipitación y vientos (dirección y velocidad). En este sentido, se tomaron los registros meteorológicos medidos en la estación meteorológica Liceo, y se relacionaron con los registros horarios de concentración de PM_{10} automático obtenidos en dicha estación.

En términos del comportamiento de los vientos, las rosas de vientos obtenidas para periodo día y noche en Liceo (Figura 11) sugieren un patrón diferenciado del comportamiento del viento, asociado predominantemente a efectos orográficos y fenómenos regionales. Durante el día, predominaron entre enero y junio de 2023 vientos provenientes del norte y noroccidente, con velocidades que no superaron los 4 m/s (promedio cercano a los 0.8 m/s), valores de velocidad que sugieren una baja dispersión de contaminantes emitidos en cercanías de la estación y efectos predominantemente locales de fuentes de emisión circundantes. De otra parte, en la noche predominaron vientos provenientes del sur y suroriente, que podrían estar más asociados a un posible transporte de emisiones volcánicas (teniendo en cuenta que el volcán Nevado del Ruiz se ubica al suroriente de la ciudad de Manizales). Sin embargo, la baja velocidad del viento, que en promedio no superó los 0.25 m/s, y porcentajes de calmas cercanos al 47 % sugieren nuevamente que las fuentes de emisión ubicadas en el área de influencia de la estación Liceo pueden ser las responsables principales de los niveles de concentración en aire ambiente de contaminantes medidos en este sector, como el material particulado.

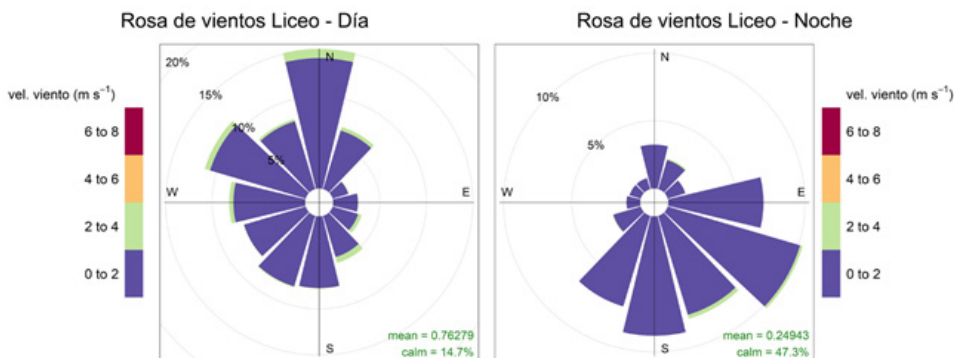


Figura 11. Rosa de vientos para periodo día (06:00 a.m. – 05:00 p.m.) y periodo noche (06:00 p.m. – 05:00 a.m.) en la estación meteorológica Liceo durante enero a junio de 2023
Fuente: elaboración propia

Dicha hipótesis cobra mayor fuerza al analizar el gráfico polar de PM_{10} presentado en la Figura 12, donde se relacionan las concentraciones horarias del contaminante con los registros de dirección y velocidad del viento. Se observa cómo las mayores concentraciones registradas en la estación Liceo entre enero y junio de 2023, se obtuvieron con velocidades del viento menores a 1 m/s o con vientos de calma principalmente. Con vientos de mayor velocidad, que pueden indicar influencia de transporte regional de contaminantes, las mayores concentraciones de PM_{10} se presentaron con vientos provenientes del occidente y noroccidente; direcciones que no indican propiamente el transporte de contaminantes provenientes del volcán.

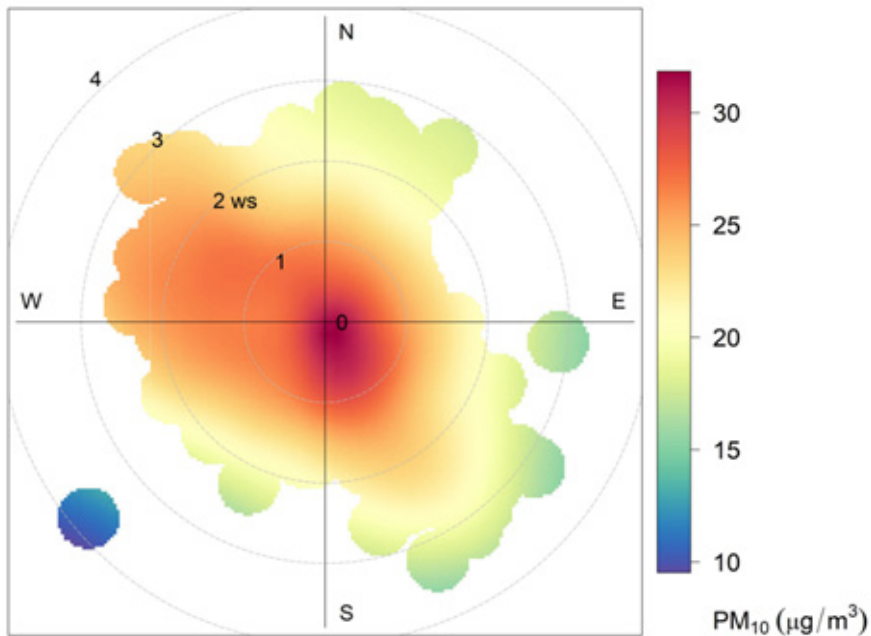


Figura 12. Gráfico polar de concentración de PM_{10} – Automático en la estación Liceo entre enero y junio de 2023

Fuente: elaboración propia

Finalmente, en la Figura 13 se muestra la evolución de la precipitación total diaria registrada en la estación meteorológica Liceo entre enero y junio de 2023, donde se observa que no se presentó una disminución importante de lluvia durante el periodo de actividad naranja, al contrario, se presentaron lluvias de forma periódica que pudieron contribuir a la disminución de las concentraciones de contaminantes en aire ambiente, por un fenómeno de lavado atmosférico. Este es otro factor de tipo meteorológico que pudo tener gran relevancia en la disminución de las concentraciones de material particulado y gases, obtenidas durante el periodo de actividad naranja en comparación con el periodo base de análisis.

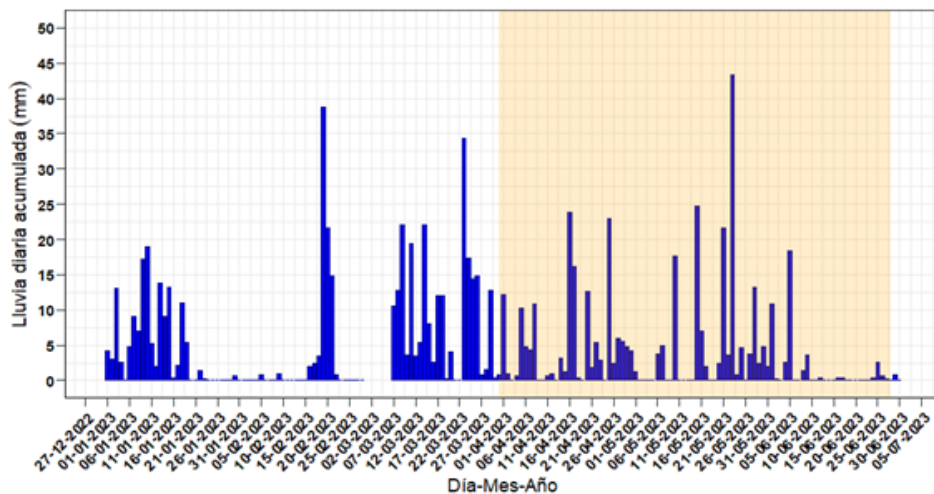


Figura 13. Precipitación diaria acumulada en la estación meteorológica Liceo durante enero a junio de 2023. La zona sombreada indica periodo de actividad volcánica en nivel naranja
Fuente: elaboración propia

3.4. Algunos reportes de emisiones del volcán y su posible impacto en máximos de concentración obtenidos

Durante el periodo de análisis se realizó 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 emisiones atmosféricas de esta fuente puntual natural asociadas con ceniza volcánica y SO_2 . La Tabla 3 presenta un resumen con algunos de los días que tuvieron alturas significativas de la columna de gases emitidos (superiores a los 1500 metros). De estos días se destaca que, durante actividad en nivel amarillo el 61 % 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. De otra parte, durante la actividad en nivel naranja el 54 % de los reportes presentaron predominancia de vientos hacia el occidente y/o noroccidente. Esta disminución es un indicativo inicial de influencia de los patrones de viento y la posibilidad de no identificar incrementos considerables en la concentración de los contaminantes atmosféricos monitoreados en Manizales.

El efecto de la columna de gases fue notorio para algunas concentraciones de cada mes bajo condiciones que favorecen el transporte a mesoescala de contaminantes, como sucedió por ejemplo el 14 de enero, cuyos registros de concentraciones diarias de SO_2 fueron de 9.3 ug/m^3 , caso similar al ocurrido el día 08 de febrero que registró concentraciones de 53.6 ug/m^3 para PM_{10} y 8.8 ug/m^3 de SO_2 .

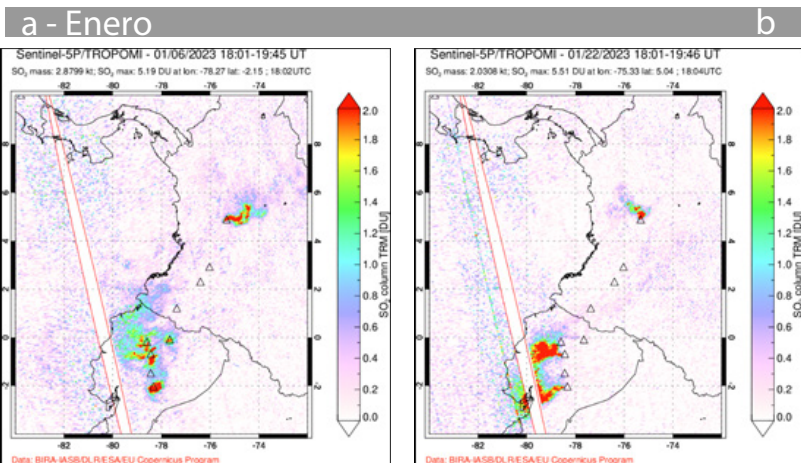
De manera complementaria la Figura 14 y la Figura 15 presentan algunos ejemplos de imágenes satelitales tomadas por el proyecto “Sentinel 5P/TROPOMI” de la European Space Agency (ESA) para algunos días del periodo de actividad amarillo y naranja respectivamente; en particular, los días 06-Ene, 22-Ene, 01-Feb, 15-Feb, 11-Mar y 20-Mar, 10-Abr, 15-Abr, 12-May y 25-May, donde se observa el comportamiento de la pluma del volcán y las concentra-

ciones para la columna atmosférica de SO₂ con valores alrededor de las 1.8 unidades Dobson. Las imágenes muestran que, pese al nivel de actividad amarillo, la actividad de emisión volcánica de este gas es recurrente, asimismo, se ejemplifica el efecto de los vientos en el transporte de la pluma de emisión volcánica.

Tabla 3. Resumen de emisiones volcánicas significativas (altura de la columna de gases superiores a los 1500 m), con posible afectación en concentraciones diarias de PM₁₀ – Automático y SO₂ en la estación Gobernación (SGC, 2023)

Fecha (dd-mm)	Altura de la columna (m)	Predominancia del viento	PM ₁₀ – Automático (µg/m ³)	SO ₂ (µg/m ³)
Nivel de actividad amarillo				
6-ene	2900	Sur - Suroriente	21.1	6.3
14-ene	1800	Norte-Noroccidente	17.3	9.3
22-ene	1700	Suroccidente	37.3	7.1
1-feb	1800	Noroccidente	51.7	7
8-feb	3800	Occidente	53.6	8.8
15-feb	1600	No predominante	37.4	6.1
6-mar	2000	Noroccidente	27.6	3.7
11-mar	3000	Suroccidente	15.6	4.7
20-mar	2700	-	20.2	5.9
23-mar	2100	-	30.9	6.3
31-mar	1800	Noroccidente	32.1	5.1
Nivel de actividad naranja				
4-abr	1500	Noroccidente	17.5	3.8
5-abr	1700	Suroccidente	14.1	4.1
7-abr	1500	Suroriente	6.4	1.9
8-abr	1700	Oriente - Suroriente	7.3	3.1
9-abr	1800	Oriente	10.3	4.3
10-abr	2300	Norte - Nororiente	12.7	4.2
11-abr	2500	Noroccidente	17.9	5.2

12-abr	1800	Suroccidente - Noroccidente	17.5	5.2
13-abr	1500	Suroccidente	17.3	3.8
15-abr	1600	Noroccidente	19.6	4.1
18-abr	1800	—	9.7	4.2
19-abr	1800	Suroriente	12.1	4.7
21-abr	1800	—	13.9	2.9
24-abr	2200	Noroccidente	12.5	4.3
25-abr	2500	Noroccidente	13.7	5.4
26-abr	1800	Suroccidente	15.7	5.6
2-may	3000	Noroccidente	13.1	4.4
6-may	1800	Occidente	18.9	4.7
10-may	2000	Noroccidente	17	6.4
12-may	1900	Oriente	17.9	4.9
23-may	1800	Nororiente	8.1	3.4
25-may	2800	Nororiente	11.1	4.3



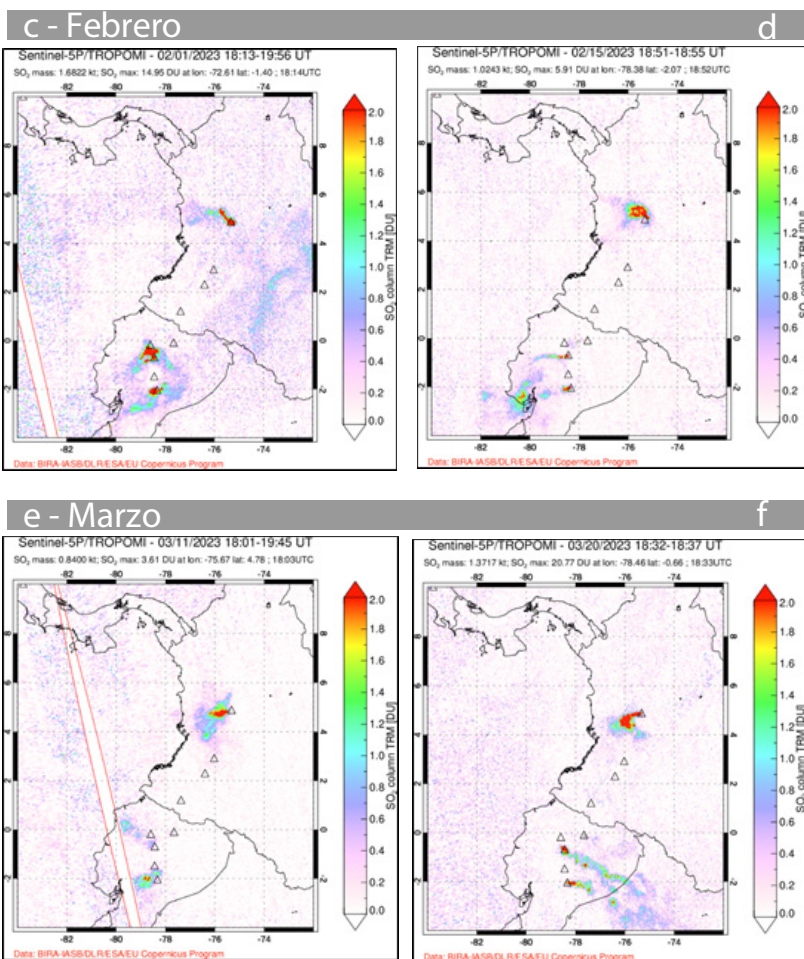


Figura 14. Algunas imágenes del comportamiento de la columna de SO₂ registradas por el satélite TROPOMI durante actividad amarilla: (a) 06-Ene, (b) 22-Ene, (c) 01-Feb, (d) 15-Feb, (e) 11-Mar y (f) 20-Mar

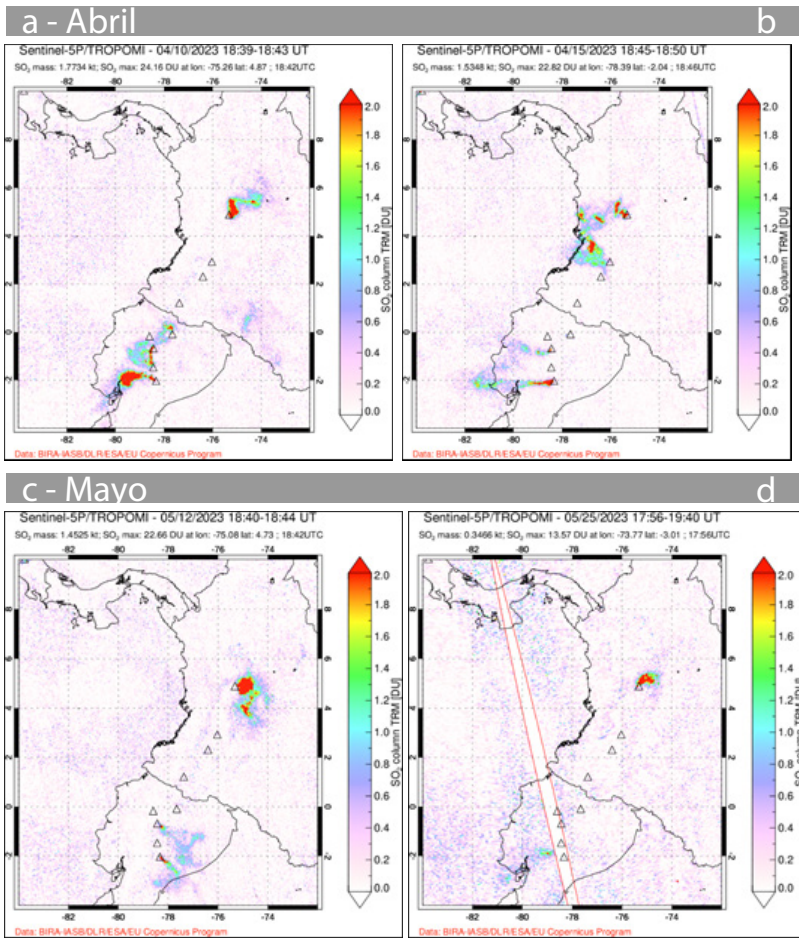


Figura 15. Algunas imágenes del comportamiento de la columna de SO₂ registrada por el satélite TROPOMI durante actividad naranja: (a) 10-Abr, (b) 15-Abr, (c) 12-May y (d) 25-May

4. Conclusiones

En términos generales, los niveles de concentración de contaminantes como material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) y dióxido de azufre (SO_2), presentaron valores similares, e incluso inferiores, a los registrados antes de decretarse el nivel de actividad naranja del volcán. Factores como la presencia de lluvias y días donde no se presentó un comportamiento del viento que favoreciera la dispersión de las emisiones volcánicas hacia la ciudad, pueden ser una de las causas que expliquen la poca variación en los niveles de concentración de los contaminantes medidos en el periodo de análisis.

Los resultados obtenidos sugieren entonces, que durante el periodo de actividad naranja, la predominancia de efectos asociados a emisiones antropogénicas en Manizales tuvo mayor peso en los niveles de concentración de contaminantes como material particulado y gases como SO_2 (también de influencia volcánica) y CO (un gas traza de origen predominantemente antrópico). Lo anterior, teniendo en cuenta, además, el papel relevante de las condiciones meteorológicas en los niveles de concentración de contaminantes, no solo desde el punto de vista de fenómenos de dispersión asociados con el comportamiento de los vientos, sino también, otros fenómenos como el lavado atmosférico propiciado por la lluvia; destacando que el periodo de análisis presentado en este boletín fue predominantemente lluvioso.

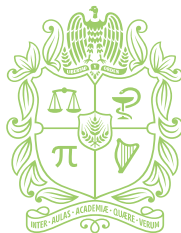
Es importante aclarar entonces que, las variaciones en la concentración de material particulado y gases durante el periodo de actividad naranja no pueden atribuirse exclusivamente al comportamiento del volcán. Los equipos de monitoreo que miden la concentración en aire ambiente de los contaminantes analizados dan cuenta de un valor de concentración que es producto de la dinámica de fuentes de emisión antrópicas (vehículos, industrias, entre otros), y fuentes naturales (como, por ejemplo, las emisiones del volcán Nevado del Ruiz), sumado a otros factores de tipo meteorológico que dominan la dispersión del contaminante en la atmósfera. En este último aspecto, el viento es una

de las variables fundamentales que gobierna el transporte de contaminantes desde regiones apartadas a la zona de medición.

5. REFERENCIAS

- Calaire – UNAL (2014). Laboratorio de Calidad de Aire, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Toma de muestras para la determinación de Dióxido de Azufre SO₂ en el aire ambiente, método automático equivalente EPA-EQSA-0495-100. (TELEDYNE 100E Medición Continua Mediante Fluorescencia UV).
- 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.
- Comde-Derenda (2014). Report in performance testing Air Pollution Monitor 2 (APM-2) for the components suspended particulate matter PM₁₀ and PM_{2.5} (1 ed.). Stahnsdorf, Germany, 14532.
- EPA, 2017. Environmental Protection Agency. List of designated reference and equivalent methods, June 16, 2017.
- Unal, Corpocaldas (2022). Boletín informativo de resultados históricos de monitoreo de calidad del aire por PM en La Dorada, Caldas. CDIAC - Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas. Recuperado de cdiac.manizales.unal.edu.co/ el 7 de junio de 2023.
https://cdiac.manizales.unal.edu.co/publicaciones/Boletin_informativo_PM_La_Dorada-Caldas.pdf
- US EPA, 2023. Volcanes. <https://espanol.epa.gov/espanol/volcanes>
- 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)

- Protocolo para muestreo de partículas respirables (PM_{10}) utilizando el equipo muestreador de alto volumen PM_{10} de Flujo Constante, Red de Vigilancia de la Calidad del Aire.
- Quijano Parra, A., & Meléndez Gélvez, I. (2014). Identificación De Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (Haps) En El Aire De Cúcuta-Colombia: Efecto Gen Tóxico. Revista EIA, 11(21), 79–87. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=101658239&lang=es&site=ehost-live%0A10.14508/reia.2014.11.21>
- Thermo Andersen, 2010. Manual de Operación, Muestreador de alto volumen HVPM10.
- Teledyne API (2010). TELEDYNE ADVANCED POLLUTION INSTRUMENTATION Model T100 UV Fluorescence SO_2 Analyzer, Operation Manual.
- Thermo Fisher Scientific Inc. (2007). Model 48i. Instruction Manual. Gas filter correlation CO analyzer. Part Number 101891-00.



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Instituto de Estudios Ambientales - IDEA -
Teléfono: 8879300 Ext. 50190
Cra 27 #64-60 / Manizales - Caldas
<http://idea.manizales.unal.edu.co>
idea_man@unal.edu.co

Edición, Diseño y Diagramación: IDEA Sede Manizales
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales