

**Evaluación de la calidad del aire en zonas cercanas al Valle de Aburra/Antioquia,
Colombia por contaminantes atmosféricos con influencia minera e industrial.**

Ricardo Andrés Sánchez Gerena

Trabajo de grado para optar el título de Químico Ambiental

Director

Ciro Eduardo Rozo Correa

Magíster en Química

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Química Ambiental

2026

Agradecimientos

Agradezco profundamente a todas las personas que han contribuido a la realización de esta tesis. En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis, Ciro Rozo, por su orientación, apoyo y dedicación durante todo el proceso de investigación. Su experiencia y conocimiento en el tema han sido fundamentales para el éxito de este proyecto. También quiero agradecer a los docentes de la facultad, por su sabiduría, guía y apoyo académico durante mi trayectoria universitaria. Su enseñanza y dedicación han sido esenciales para mi formación y crecimiento intelectual. A mis compañeros de estudios y amigos les agradezco su apoyo emocional y académico durante estos años de estudio. Su amistad y compañerismo han sido esenciales para superar los desafíos que he enfrentado.

A mi familia, les expreso mi más profundo agradecimiento por su amor incondicional, apoyo y sacrificios. Sin su presencia y motivación, no habría podido alcanzar este logro. También quiero extender mi agradecimiento a mis jefes en las prácticas, junto con todo el equipo en el área de consultoría, por la oportunidad de aplicar mis conocimientos en un entorno real y por su orientación y apoyo durante mi estancia en la empresa. Su confianza en mí ha sido fundamental para mi crecimiento profesional. Agradezco de corazón a todos los que han hecho posible la culminación de esta tesis. Su contribución ha sido invaluable, y espero que este trabajo sea un reflejo de su apoyo y dedicación.

Contenido

Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo general	14
1.2 Objetivos específicos	14
2. Marco referencial	14
2.1 Marco teórico	14
2.1.1 Índice de la calidad del aire	18
2.2 Estado del arte	20
2.3 Marco legal.....	22
2.3.1 Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	22
2.3.2 Decreto 1076 de 2015	24
3. Método	25
3.1 Área de estudio.....	25
3.2 Metodología para la evaluación de la calidad del aire	26
3.2.1 Análisis estadístico	27
3.2.2 Cálculo del índice de Calidad del Aire (ICA).....	28
4. Resultados y discusión	29
4.1 Monitoreo de parámetros meteorológicos.....	29
4.2 Monitoreo de concentraciones de Material Particulado (PM ₁₀).....	41
4.3 Concentraciones de material particulado PM _{2.5}	46

4.4 Concentraciones de Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	51
4.5 Concentraciones de Dióxido de Azufre (SO ₂)	56
4.6 Concentraciones de Ozono (O ₃).....	61
5. Rosas de Contaminación.....	66
6. Índice de Calidad del Aire (ICA).....	70
6.1 Índice de calidad del aire para PM ₁₀	71
6.2 Índice de calidad del aire para PM _{2.5}	73
6.3 Índice de calidad del aire para NO ₂	75
6.4 Índice de calidad del aire para SO ₂	77
6.5 Índice de calidad del aire para O ₃	79
7. Conclusiones	81
8. Recomendaciones	82
Referencias.....	84

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Descripción general del índice de calidad del aire</i>	19
Tabla 2. <i>Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio para la calidad del aire</i>	23
Tabla 4. <i>Resumen de los parámetros meteorológicos de muestreo</i>	30
Tabla 5. <i>Escala de precipitación diaria y mensual</i>	34
Tabla 6. <i>Distribución de la frecuencia de los vientos para 2022</i>	36
Tabla 7. <i>Distribución de la frecuencia de los vientos para 2023</i>	38
Tabla 8. <i>Concentraciones diarias de PM10 para 2022</i>	41
Tabla 9. <i>Concentraciones diarias de PM10 para 2023</i>	44
Tabla 10. <i>Concentraciones diarias de PM2.5 para 2022</i>	47
Tabla 11. <i>Concentraciones diarias de PM2.5 para 2023</i>	49
Tabla 12. <i>Concentraciones máximas horarias - NO₂ para 2022</i>	52
Tabla 13. <i>Concentraciones máximas horarias - NO₂ para 2023</i>	54
Tabla 14. <i>Concentraciones máximas horarias - SO₂ para 2022</i>	56
Tabla 15. <i>Concentraciones máximas horarias - SO₂ para 2023</i>	58
Tabla 16. <i>Concentraciones máximas horarias – O₃ para 2022</i>	61
Tabla 17. <i>Concentraciones máximas horarias – O₃ para 2023</i>	63

Lista de figuras

Figura 1. <i>Mapa general del departamento de Antioquía.</i>	25
Figura 2. <i>Estación meteorológica instalada.</i>	29
Figura 3. <i>Temperatura promedio diaria junio de 2022 y junio de 2023.</i>	31
Figura 4. <i>Precipitación acumulada diaria junio 2022 – 2023.</i>	33
Figura 5. <i>Velocidad promedio diaria junio 2022 – 2023</i>	35
Figura 6. <i>Distribución de los Vientos para 2022.</i>	37
Figura 7. <i>Rosa de viento para junio 2022.</i>	38
Figura 8. <i>Distribución de los Vientos para 2023.</i>	39
Figura 9. <i>Rosa de viento para junio 2023.</i>	40
Figura 10. <i>Concentración promedio de PM_{10} para 2022.</i>	42
Figura 11. <i>Concentración promedio de PM_{10} para 2023.</i>	45
Figura 12. <i>Concentración de $PM_{2.5}$ para 2022.</i>	48
Figura 13. <i>Concentración de $PM_{2.5}$ para 2023.</i>	50
Figura 14. <i>Concentraciones promedio horarias de NO_2 CA-1 para 2022.</i>	52
Figura 15. <i>Concentraciones promedio horarias de NO_2 CA-2 para 2022.</i>	52
Figura 16. <i>Concentraciones promedio horarias de NO_2 CA-3 para 2022.</i>	53
Figura 17. <i>Concentraciones promedio horarias de NO_2 CA-1 para 2023.</i>	54
Figura 18. <i>Concentraciones promedio horarias de NO_2 CA-2 para 2023.</i>	55
Figura 19. <i>Concentraciones promedio horarias de NO_2 CA-3 para 2023.</i>	55
Figura 20. <i>Concentraciones promedio horarias de SO_2 CA-1 para 2022.</i>	57
Figura 21. <i>Concentraciones promedio horarias de SO_2 CA-2 para 2022.</i>	57
Figura 22. <i>Concentraciones promedio horarias de SO_2 CA-3 para 2022.</i>	58

Figura 23. <i>Concentraciones promedio horarias de SO₂ CA-1 para 2023.</i>	59
Figura 24. <i>Concentraciones promedio horarias de SO₂ CA-2 para 2023.</i>	59
Figura 25. <i>Concentraciones promedio horarias de SO₂ CA-3 para 2023.</i>	60
Figura 26. <i>Concentraciones promedio horarias de O₃ CA-1 para 2022.</i>	62
Figura 27. <i>Concentraciones horarias de O₃ CA-2 para 2022.</i>	62
Figura 28. <i>Concentraciones promedio horarias de O₃ CA-3 para 2022.</i>	63
Figura 29. <i>Concentraciones promedio horarias de O₃ CA-1 para 2023.</i>	64
Figura 30. <i>Concentraciones promedio horarias de O₃ CA-2 para 2023.</i>	64
Figura 31. <i>Concentraciones promedio horarias de O₃ CA-3 para 2023.</i>	65
Figura 32. <i>Rosas de contaminación – NO₂ 2022.</i>	66
Figura 33. <i>Rosas de contaminación – NO₂ 2023.</i>	67
Figura 34. <i>Rosas de contaminación – SO₂ 2022.</i>	68
Figura 35. <i>Rosas de contaminación – SO₂ 2023.</i>	68
Figura 36. <i>Rosas de contaminación – O₃ 2022.</i>	69
Figura 37. <i>Rosas de contaminación – O₃ 2023.</i>	69
Figura 38. <i>Índice de Calidad del Aire - ICA-PM₁₀ Año 2022.</i>	71
Figura 39. <i>Índice de Calidad del Aire - ICA-PM₁₀ Año 2023.</i>	72
Figura 40. <i>Índice de Calidad del Aire - ICA-PM_{2.5} Año 2022.</i>	73
Figura 41. <i>Índice de Calidad del Aire - ICA-PM_{2.5} Año 2023.</i>	74
Figura 42. <i>Índice de Calidad del Aire - ICA-NO₂ Año 2022.</i>	75
Figura 43. <i>Índice de Calidad del Aire - ICA-NO₂ Año 2023.</i>	76
Figura 44. <i>Índice de Calidad del Aire - ICA-SO₂ Año 2022.</i>	77
Figura 45. <i>Índice de Calidad del Aire - ICA-SO₂ Año 2023.</i>	78

Figura 46. <i>Índice de Calidad del Aire - ICA-O₃ Año 2022.</i>	79
Figura 47. <i>Índice de Calidad del Aire - ICA-O₃ Año 2023.</i>	80

Resumen

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la calidad del aire en un área cercana a una zona de actividad minera en el departamento de Antioquia, mediante el análisis de los contaminantes atmosféricos (NO_2 , SO_2 , O_3 , PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$) y a través del cálculo del Índice de Calidad del Aire (ICA). Para ello, se realizó un análisis comparativo del mes de junio para los años 2022 y junio del año 2023, utilizando datos obtenidos de tres estaciones de monitoreo. Se evaluaron las concentraciones de los contaminantes atmosféricos, identificando los factores meteorológicos que influyen en su dispersión y acumulación en este periodo de tiempo. Asimismo, se calcularon los valores del ICA para cada contaminante atmosférico con el fin de determinar su impacto en la calidad del aire. Los resultados indicaron que las concentraciones de los contaminantes evaluados no excedieron la normativa vigente. Sin embargo, el ozono (O_3) presentó concentraciones cercanas al umbral normativo, particularmente en la estación durante el año 2023. En el cálculo del ICA, la mayoría de las estaciones se mantuvieron en una categoría buena para la salud, lo que indica condiciones favorables de calidad del aire en la zona de estudio. Este análisis proporciona información clave para la gestión ambiental y el desarrollo de estrategias de mitigación orientadas a mejorar la calidad del aire en la región.

Palabras clave: calidad del aire, índice de calidad del aire (ICA), contaminantes atmosféricos, meteorología, gestión ambiental, minería

Abstract

The present study aims to evaluate air quality in an area near a mining activity zone in the department of Antioquia by analyzing the criteria pollutants (NO_2 , SO_2 , O_3 , PM_{10} , and $\text{PM}_{2.5}$) and their relationship with meteorological conditions through the calculation of the Air Quality Index (AQI). To achieve this, a comparative analysis was conducted between the years 2022 and 2023 using data obtained from monitoring stations. The concentrations of criteria pollutants and their temporal variability were characterized, identifying the meteorological factors that influence their dispersion and accumulation. Additionally, AQI values were calculated for each pollutant to determine their impact on air quality and public health. Furthermore, pollution roses were generated to assess the influence of wind direction and speed on the distribution of pollutants in the study area. The results indicated that there were no exceedances for any of the pollutants evaluated according to current regulations. However, ozone (O_3) showed concentrations close to the regulatory threshold, particularly at station CA-1 during 2023. In the AQI calculation, most stations remained in a good category for health, indicating favorable air quality conditions in the study area. This analysis provides key information for environmental management and the development of mitigation strategies aimed at improving air quality in the region.

Keywords: air quality, air quality index (AQI), air pollutants, meteorology, environmental management, mining

Introducción

La contaminación atmosférica es un problema ambiental y de salud pública de gran relevancia, especialmente en regiones donde las actividades industriales y mineras generan emisiones significativas de contaminantes. La presencia de compuestos como el dióxido de nitrógeno (NO_2), el dióxido de azufre (SO_2), el ozono troposférico (O_3) y el material particulado (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$) puede afectar negativamente la calidad del aire y representar un riesgo para la salud humana, especialmente en poblaciones expuestas de manera prolongada. Estudios realizados en zonas mineras de Colombia han evidenciado que las actividades extractivas pueden incrementar las concentraciones de material particulado en el aire, superando en ocasiones los límites establecidos por la normativa ambiental. Por ejemplo, en el departamento del Cesar, la Corporación Autónoma Regional del Cesar (Corpocesar) opera el Sistema Especial de Vigilancia de la Calidad del Aire de la Zona Carbonífera del Cesar (SEVCA-ZCC), que monitorea la calidad del aire en áreas afectadas por la explotación minera de carbón. Sin embargo, se han identificado desafíos en la representatividad y cobertura de los datos recopilados, lo que subraya la necesidad de fortalecer estos sistemas para garantizar una evaluación precisa de la calidad del aire en la región (Corpocesar, 2019; Montes, et ál., 2024; Ministerio De Ambiente [MAVDT], 2010). En Antioquia, el Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) es operado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (s.f.), y el Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA). La red de monitoreo cuenta con múltiples estaciones que miden diversos contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas, proporcionando información en tiempo real para la gestión ambiental y la toma de decisiones. Estas estaciones se clasifican según su representatividad, ya sea poblacional, de tráfico o industrial, permitiendo evaluar el impacto de

diferentes fuentes de emisión en la calidad del aire (Area Metropolitana del Valle de Aburra, 2019).

Estudios previos han evidenciado que la variabilidad en las concentraciones de contaminantes atmosféricos está influenciada por factores meteorológicos como la temperatura, la radiación solar y la velocidad del viento. Además, se ha demostrado que la exposición prolongada a niveles elevados de estos contaminantes puede generar impactos negativos en la salud, afectando principalmente a poblaciones vulnerables como niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias preexistentes. Sin embargo, el monitoreo en zonas mineras sigue siendo limitado, lo que resalta la necesidad de estudios que permitan evaluar la calidad del aire en estos entornos y su impacto en la salud pública. En este contexto, el presente estudio se enfoca en la evaluación de la calidad del aire en un área cercana a una zona de actividad minera en el departamento de Antioquia, específicamente en los alrededores de los municipios de Cisneros y Santo Domingo. Se analizaron las concentraciones de NO_2 , SO_2 , O_3 , PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ durante los periodos de mayo y junio de 2022 y 2023, comparando su variabilidad y su relación con las condiciones meteorológicas. Adicionalmente, se calculó el Índice de Calidad del Aire (ICA) para evaluar el impacto en la salud pública y el cumplimiento de la normativa vigente. La recolección de datos fue realizada con el apoyo de la empresa Applus K2 Ingeniería S.A.S, siguiendo protocolos establecidos para garantizar la precisión de las mediciones. Los resultados obtenidos permitirán comprender la influencia de las condiciones atmosféricas en la dispersión y acumulación de contaminantes, proporcionando información clave para la implementación de estrategias de mitigación y gestión de la calidad del aire en la región.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Evaluar las concentraciones de contaminantes atmosféricos (NO_2 , SO_2 , O_3 , PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$) producto de las emisiones de actividad minera e industrial con el fin de conocer su impacto ambiental en zonas cercanas al valle de aburra ubicado en el departamento de Antioquia, mediante un análisis comparativo de datos del mes de junio para el año 2022 y el 2023 como complemento de la práctica empresarial.

1.2 Objetivos específicos

Calcular el Índice de Calidad del Aire (ICA) de los contaminantes atmosféricos evaluados realizando un análisis comparativo de sus valores del mes de junio para el año 2022 y el año 2023, con el fin de evaluar la dinámica y evolución del ICA en el periodo de estudio.

Analizar la relación entre las concentraciones de los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas, interpretando los patrones de dispersión y las posibles fuentes emisoras en zonas cercanas al Valle de Aburrá, con el fin de identificar factores de acumulación y dispersión que influyen en la calidad del aire.

2. Marco referencial

2.1 Marco teórico

La calidad del aire es un factor determinante en la salud pública y el equilibrio ambiental de las ciudades. Está influenciada por la presencia de contaminantes atmosféricos, los cuales

pueden ser de origen natural o antropogénico. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación del aire es responsable de numerosas enfermedades respiratorias y cardiovasculares, lo que subraya la importancia de su monitoreo y control. Los principales contaminantes del aire urbano incluyen material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles (COV). Estos contaminantes provienen principalmente de fuentes industriales, el transporte vehicular y actividades de combustión. La acumulación de estos compuestos en la atmósfera contribuye a la formación de smog y puede generar impactos negativos en la biodiversidad y la salud humana (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2024; Climate y Clean Air Coalition, 2018).

Para dimensionar los distintos tamaños de material particulado que influyen en la calidad del aire, se establece una comparación entre el diámetro de un cabello humano y el diámetro de las partículas monitoreadas en la zona. Este análisis permite contextualizar la magnitud de las partículas en suspensión y su potencial impacto en la salud y el medio ambiente.

Los contaminantes atmosféricos provenientes de las ciudades representan una amenaza significativa para la calidad del aire en entornos urbanos. Las principales fuentes de estos contaminantes son las actividades industriales, las emisiones del sector energético y el transporte vehicular. Las fábricas y plantas de generación de energía liberan grandes cantidades de gases de efecto invernadero debido a la combustión de carbón y otros combustibles fósiles, lo que contribuye a la formación de lluvia ácida y deterioro de infraestructuras urbanas.

El material particulado generado por procesos industriales, como la producción de cemento, la fundición de metales y la refinación de petróleo, puede permanecer en suspensión en la atmósfera durante largos períodos, afectando la calidad del aire y la salud respiratoria de la

población. Además, los NOx y los compuestos orgánicos volátiles emitidos por las industrias reaccionan con la luz solar para formar ozono troposférico, un contaminante que exacerba problemas respiratorios y cardiovasculares. La contaminación atmosférica industrial también afecta el equilibrio climático urbano, ya que la acumulación de partículas y gases contaminantes contribuye al fenómeno de isla de calor en las ciudades, alterando los patrones de temperatura y precipitación.

Los proyectos de construcción, tanto de corto como de largo plazo, impulsados por los gobiernos y empresas constructoras, también influyen en los niveles de contaminación atmosférica en las ciudades. La edificación de infraestructuras como carreteras, edificios y sistemas de transporte público genera emisiones significativas de material particulado y gases contaminantes debido al uso de maquinaria pesada y materiales como cemento y asfalto. Durante la ejecución de estos proyectos, el aumento del tráfico vehicular y las actividades de demolición y excavación pueden contribuir al deterioro de la calidad del aire. Por ello, es esencial que las políticas gubernamentales integren medidas de sostenibilidad, como la implementación de normativas vigentes para la reducción de emisiones en el sector de la construcción y la planificación urbana orientada a minimizar el impacto ambiental (OMS, 2024).

Las actividades mineras representan una de las fuentes más significativas de contaminación del aire, especialmente en regiones urbanas cercanas a centros de explotación. Estas actividades generan emisiones de partículas suspendidas, metales pesados y gases tóxicos que pueden dispersarse en el aire y afectar a las poblaciones aledañas. Uno de los principales contaminantes generados por la minería es el material particulado (MP), el cual puede incluir partículas finas y ultrafinas que permanecen en suspensión durante largos periodos. Estas partículas, al ser inhaladas, pueden penetrar en el sistema respiratorio y causar enfermedades

pulmonares crónicas. Las operaciones mineras a menudo involucran la voladura de rocas y el uso de maquinaria pesada, lo que libera grandes cantidades de gases contaminantes, como el dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y monóxido de carbono (CO). Además, algunas minas de carbón y metales pesados pueden liberar mercurio (Hg) y otros compuestos tóxicos al aire, lo que contribuye a la contaminación atmosférica de las ciudades cercanas.

Los contaminantes emitidos por la minería pueden viajar grandes distancias dependiendo de las condiciones meteorológicas y topográficas. La dirección y velocidad del viento, la humedad relativa y la precipitación influyen en la dispersión y el depósito de partículas contaminantes en áreas urbanas. Esto puede agravar los problemas de calidad del aire y aumentar la incidencia de enfermedades respiratorias en la población.

La contaminación del aire generada por la minería puede provocar la acidificación del suelo y cuerpos de agua cercanos, afectando la flora y fauna de la región. El depósito de metales pesados en suelos agrícolas puede comprometer la producción de alimentos y generar bioacumulación en la cadena trófica. Diversos estudios han demostrado que la exposición prolongada a contaminantes atmosféricos provenientes de la minería puede desencadenar enfermedades respiratorias crónicas, como la neumoconiosis y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) (Ministerio de Salud, 2021).

La presencia de metales pesados en el aire se ha asociado con problemas neurológicos y enfermedades cardiovasculares. Para reducir el impacto de la minería en la calidad del aire urbano, es fundamental implementar estrategias de mitigación efectivas. Algunas de estas incluyen la implementación de sistemas de control de emisiones de partículas y gases tóxicos, reforestación y creación de barreras naturales para reducir la dispersión de contaminantes, monitoreo constante de la calidad del aire en zonas urbanas cercanas a explotaciones mineras. La

calidad del aire en entornos urbanos es un aspecto clave para la salud pública y la sostenibilidad ambiental. Las actividades mineras, al ser una fuente significativa de contaminación atmosférica, requieren regulaciones estrictas y estrategias de mitigación adecuadas para minimizar sus efectos negativos. La implementación de tecnologías más limpias y el monitoreo constante de los contaminantes atmosféricos son medidas fundamentales para garantizar un aire más saludable para la población (Ministerio de Ambiente, 2019).

2.1.1 Índice de la calidad del aire

El Índice de Calidad del Aire (ICA) en Colombia es el principal indicador utilizado para evaluar y comunicar el estado de la calidad del aire a nivel nacional. Su cálculo es regulado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y se basa en la medición de los principales contaminantes atmosféricos, entre ellos, material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO) y ozono troposférico (O_3). El ICA traduce las concentraciones de estos contaminantes en datos cualitativos, permitiendo clasificar la calidad del aire en niveles que van desde "Buena" hasta "Peligrosa". Esta clasificación facilita la interpretación de los datos y su relación con los impactos en la salud pública.

Además de servir como una herramienta de monitoreo ambiental, el ICA permite a las autoridades y a la población tomar decisiones informadas sobre la exposición a la contaminación atmosférica, especialmente en grupos vulnerables, como niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias.

A continuación, en la Tabla 1. Se presentan los rangos del ICA y sus efectos en la salud.

Tabla 1. Descripción general del índice de calidad del aire

ICA	Clasificación	Efectos a la salud de acuerdo con el rango del ICA
0-50	Buena	La contaminación atmosférica supone un riesgo bajo para la salud.
51-100	Moderada	Posibles síntomas respiratorios en grupos poblacionales sensibles.
101-150	Dañina a la salud para grupos sensibles	Los grupos poblacionales sensibles pueden presentar efectos sobre la salud. 1) Ozono troposférico: Las personas con enfermedades pulmonares, niños, adultos mayores y las que constantemente realizan actividad física al aire libre, debe reducir su exposición a los contaminantes del aire. 2) MP: Las personas con enfermedad cardíaca o pulmonar, los adultos mayores y los niños se consideran sensibles y por lo tanto en mayor riesgo."
151-200	Dañina a la salud	Todos los individuos pueden comenzar a experimentar efectos sobre la salud. Los grupos sensibles pueden experimentar efectos más graves para la salud.
201-300	Muy dañina a la salud	Estado de alerta que significa que todos pueden experimentar efectos más graves para la salud.
301-500	Peligrosa	Advertencia sanitaria. Toda la población puede presentar efectos adversos graves en la salud humana y están propensos a verse afectados por graves efectos sobre la salud.

Tomado de (MADS, 2017).

Ecuación 1. Fórmula de cálculo para el índice de calidad del aire (ICA). Tomado de (MADS, 2017)

$$ICA_p = \frac{I_{Alto} - I_{bajo}}{PC_{Alto} - PC_{bajo}} \times (C_p - PC_{bajo}) + I_{bajo}$$

En donde

ICA_p = Índice de Calidad del Aire para el contaminante p

C_p = Concentración medida para el contaminante p

PC_{Alto} = Punto de corte mayor o igual a C_p

PC_{Bajo} = Punto de corte menor o igual a C_p

I_{Alto} = Valor del ICA correspondiente al PC_{Alto}

I_{Bajo} = Valor del ICA correspondiente al PC_{Bajo}

2.2 Estado del arte

El "Informe Final de Calidad del Aire en el Valle de Aburrá" presentó una evaluación exhaustiva de la situación ambiental en la región correspondiente al Convenio de Asociación No. 243 de 2012, coordinado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y con un equipo de expertos de diversas instituciones. Este informe se centró en el seguimiento y monitoreo de contaminantes atmosféricos, el cumplimiento de normativas y la accesibilidad de información, buscando mejorar la gestión del recurso aire. La Red de Monitoreo de Calidad del Aire (REDMCA) se compuso de 22 estaciones fijas y una unidad móvil que midieron distintos contaminantes, incluyendo PM_{10} , $PM_{2.5}$, ozono, dióxido de nitrógeno y monóxido de carbono. Los datos obtenidos por estas estaciones permitieron evaluar el estado de la calidad del aire y fueron fundamentales para el cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos por la normativa colombiana. El informe destacó que el $PM_{2.5}$ fue el contaminante más preocupante, mostrando niveles que llevaron a clasificaciones de calidad del aire como "Moderada" y "Dañina para grupos sensibles". Durante 2012, se informaron días con niveles de $PM_{2.5}$ que superaron continuamente los estándares, especialmente en estaciones ubicadas en áreas urbanas y de tráfico. Se registraron un total de 11 excedencias a los límites diarios de $PM_{2.5}$, y se observó que la calidad del aire, mayormente clasificada como "Moderada", mostró días críticos que comprometieron la salud de la población vulnerable. La red también indicó interacciones significativas entre los niveles de humedad y las concentraciones de $PM_{2.5}$, sugiriendo que condiciones meteorológicas pudieron influir en los resultados de calidad. El índice de calidad del aire (ICA) reveló que las estaciones de monitoreo en localidades con alta exposición vehicular y contaminación industrial fueron responsables de las concentraciones más altas de $PM_{2.5}$, mientras que las concentraciones de ozono fueron más críticas en áreas suburbanas. A pesar de las

mejoras observadas en años anteriores, los resultados aún evidenciaron una problemática persistente en la contaminación atmosférica. El informe finalizó con recomendaciones sobre la necesidad de continuar con el monitoreo y realizar ajustes en la gestión de la calidad del aire, subrayando la importancia de la participación comunitaria en la comprensión y gestión de la contaminación. El compromiso del área metropolitana fue proporcionar información accesible y relevante sobre calidad del aire, contribuyendo a la conciencia y acción frente a esta problemática ambiental (Gómez, et ál., 2013).

En el municipio la Ceja, Antioquia se realizó un monitoreo de las concentraciones de PM_{2.5} utilizando 28 dispositivos de bajo costo en un contexto de urbanización y crecimiento poblacional acelerado. Se identificó que las infecciones respiratorias son el principal problema de salud infantil y que la calidad del aire deteriorada está vinculada con la mortalidad y morbilidad, especialmente en zonas de alto tráfico. Aunque las concentraciones diarias de PM_{2.5} generalmente se mantuvieron dentro de los límites normativos, se registraron picos críticos durante las celebraciones de fin de año, asociados al uso de pólvora. También se observaron aumentos de PM_{2.5} en horarios específicos (4:00-8:00 y 18:00-20:00), influenciados por el tráfico y factores meteorológicos. La percepción ciudadana sobre la calidad del aire no siempre coincidió con los datos reales, evidenciando la necesidad de mayor concienciación. Este estudio resalta el valor del monitoreo comunitario y el uso de datos ciudadanos para fortalecer la gestión ambiental y la salud pública (García, 2023).

La universidad de Córdoba evaluó la calidad del aire en Montería, entre el 20 de septiembre y el 20 de octubre de 2019, mediante el monitoreo continuo de NO₂, SO₂ y CO con equipos especializados. Los resultados indicaron que las concentraciones de estos contaminantes estuvieron dentro de los límites establecidos en la Resolución 2254 de 2017 del MADS, aunque

el SO₂ superó los estándares más estrictos de la OMS. La ubicación geográfica de Montería favorece la dispersión de contaminantes debido a su baja altitud, altas temperaturas y vientos constantes, lo que contribuye a una buena calidad del aire. Además, la medición se realizó en época de lluvias, lo que pudo influir en la reducción de contaminantes por deposición. A pesar de que los puntos de monitoreo incluían zonas de alta circulación vehicular, las concentraciones medidas fueron bajas, posiblemente debido a la poca industrialización y el reducido parque automotor de la ciudad. El estudio recomienda realizar estudios en diferentes épocas del año, ampliar los puntos de monitoreo, mantener los equipos en óptimas condiciones y comparar con estudios históricos para evaluar tendencias de contaminación (Ochoa, 2021).

2.3 Marco legal

2.3.1 Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

La presente resolución establece los estándares de calidad del aire y los niveles máximos permitidos de contaminantes en la atmósfera, con el propósito de garantizar un ambiente óptimo para reducir los riesgos en la salud humana derivados de la exposición a estos compuestos y establecer medidas para la gestión del recurso aire a nivel nacional.

Tabla 2. *Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio para la calidad del aire.*

<i>Contaminante</i>	<i>Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Tiempo de exposición</i>
Material Particulado (PM10)	50	Anual
	75	24 horas
Material Particulado (PM2.5)	25	Anual
	37	24 horas
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	60	Anual
	200	1 hora
Dióxido de Azufre (SO ₂)	50	24 horas
	100	1 hora
Ozono (O ₃)	100	8 horas

A partir del 1° de julio de 2018, se establecieron límites específicos para los contaminantes atmosféricos PM10 y PM2.5 en periodos de exposición de 24 horas. De acuerdo con lo estipulado en el Parágrafo 1, los niveles máximos permitidos son de 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 y 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2.5. Estos valores fueron definidos con el propósito de mejorar la calidad del aire y reducir los efectos negativos en la salud humana. Para determinar si los niveles máximos permisibles establecidos en la normativa se están cumpliendo, la concentración de los contaminantes debe evaluarse en cada punto de monitoreo de manera independiente. Según lo indicado en el Parágrafo 2°, no es válido calcular el promedio de mediciones de distintos puntos de monitoreo, ya que esto podría afectar la precisión en la evaluación de la calidad del aire en un área determinada. Este criterio busca garantizar un control más riguroso y representativo de las condiciones ambientales reales.

El seguimiento y la medición de los contaminantes criterio deben realizarse conforme a los lineamientos técnicos establecidos. Como se especifica en el Parágrafo 3°, las autoridades ambientales competentes tienen la obligación de efectuar estas mediciones siguiendo los procedimientos, frecuencias y metodologías definidas en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, este protocolo define los procedimientos para la calibración

y verificación de equipos, así como los criterios de validez y aseguramiento de la calidad de los datos. La aplicación de estos estándares permite obtener datos fiables y comparables, facilitando así una gestión eficiente de la calidad del aire en el territorio nacional (MADS, 2017).

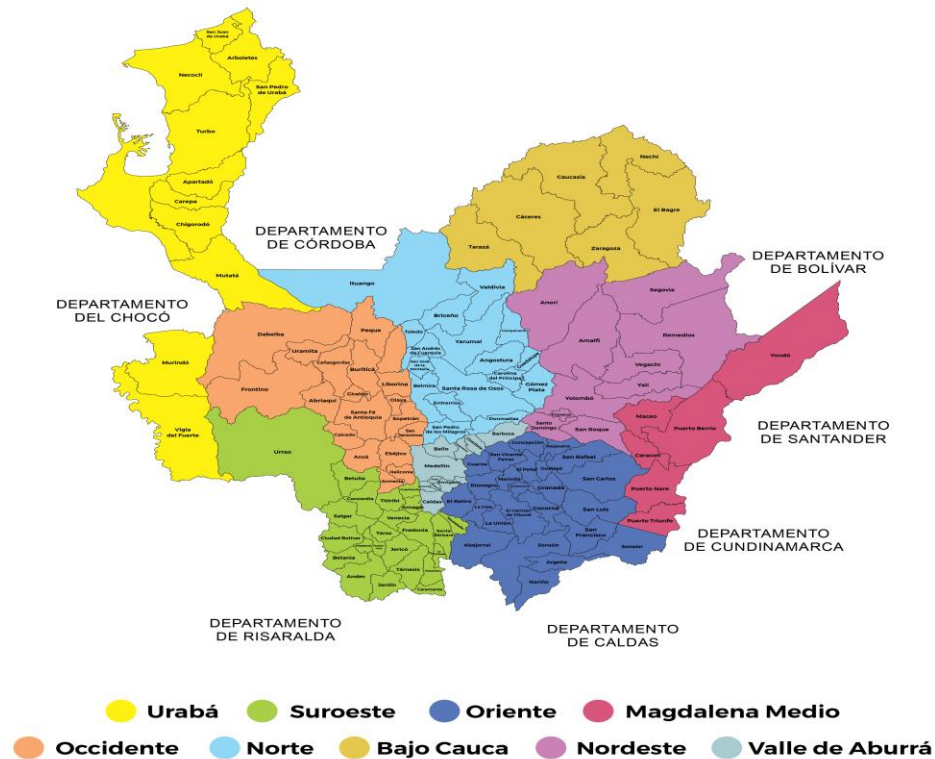
2.3.2 Decreto 1076 de 2015

Promulgado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, compila y regula las disposiciones ambientales del país, estableciendo principios clave para la gestión y protección de la calidad del aire. En su Título 5, aborda la prevención y control de la contaminación atmosférica, señalando las competencias de las corporaciones autónomas regionales (CAR) y otras entidades encargadas de la vigilancia y regulación de las emisiones contaminantes. Este marco normativo define los contaminantes más relevantes, como materiales particulados (PM10 y PM2.5), óxidos de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃) y dióxido de azufre (SO₂), y establece los procedimientos para el control de sus niveles en fuentes fijas y móviles. Además, el decreto exige la implementación de planes de contingencia para hacer frente a episodios críticos de contaminación, asegurando una respuesta adecuada ante emergencias. También regula los permisos de emisión y las medidas de control para proteger la salud pública y el medio ambiente, sirviendo de base para la evaluación de la calidad del aire (Decreto 1076, 2015).

3. Método

3.1 Área de estudio

Figura 1. *Mapa general del departamento de Antioquia.*



Tomado de Gobernación de Antioquia (2018).

El Valle de Aburrá, ubicado en la cordillera central de los andes en el departamento de Antioquia, es una subregión metropolitana de aproximadamente 60 kilómetros de extensión que alberga a Medellín y otros nueve municipios. Con una altitud promedio de 1.538 metros sobre el nivel del mar, presenta un clima templado con temperaturas que oscilan entre 17 °C y 27 °C, y dos periodos lluviosos anuales. La economía de la zona se basa en diversas actividades productivas, entre las que destacan la agricultura, la ganadería, el comercio, el turismo y la

minería, sectores fundamentales para el desarrollo económico y social de la región. Dentro de estas actividades, la minería principalmente de oro, cobre, carbón y materiales de construcción representa una fuente relevante de emisiones atmosféricas en el valle. Según datos oficiales, en la zona operan más de varias unidades mineras, cuyos procesos de extracción y de transporte generan constantemente contaminantes atmosféricos en una región con condiciones geográficas y meteorológicas que favorecen su acumulación. Esta particularidad, sumada a las emisiones urbanas e industriales, convierte a la actividad minera en un factor clave para evaluar la calidad del aire en el Valle de Aburrá (Infolocal, 2024; Area Metropolitana Valle de Aburrá, s.f.; Ochoa, 2020).

3.2 Metodología para la evaluación de la calidad del aire

La evaluación de la calidad del aire en zonas mineras es fundamental para comprender el impacto de las actividades extractivas en el entorno. En este estudio se realizó un análisis comparativo de la calidad del aire en una zona minera cercana al valle de aburra, Antioquia, considerando el mes de junio para el año 2022 y junio del año 2023. Se monitorearon los contaminantes atmosféricos PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , SO_2 y O_3 , junto con variables meteorológicas relevantes, con este objetivo, se utilizaron datos obtenidos de tres estaciones de monitoreo: CA-1, CA-2 y CA-3 ubicadas alrededor de la zona de estudio. El monitoreo se llevó a cabo siguiendo estrictamente los Métodos de Referencia Estándar (SRM) de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), en cumplimiento con las especificaciones técnicas exigidas por la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia para redes de monitoreo. Para la medición del material particulado, se empleó un método de muestreo activo y gravimétrico, conforme a la normativa EPA e-CFR. Título 40, Parte 50.

Específicamente, para PM₁₀ se utilizaron equipos Hi Vol VFC (Alto Volumen) con controlador de flujo Venturi, operando con un flujo entre 1.02 a 1.24 m³/min durante 24 horas. Para PM_{2.5} se emplearon muestreadores Low Vol VFC – Wilbur (Bajo Volumen), con flujos programables de hasta 18 L/min controlados por el sistema Activol™. En cuanto a los contaminantes gaseosos, se utilizaron analizadores automáticos de monitoreo continuo. La determinación del Dióxido de Azufre (SO₂) se basó en el método de fluorescencia ultravioleta (EPA e-CFR. Título 40, Parte 50, Apéndice A-1). El Dióxido de Nitrógeno (NO₂) se midió mediante el principio de Quimioluminiscencia de fase gaseosa (EPA e-CFR. Título 40, Parte 50, Apéndice F), y el Ozono (O₃) se determinó por Fotometría de luz UV (EPA e-CFR. Título 40, Parte 50, Apéndice D). Para los contaminantes atmosféricos NO₂, SO₂ y O₃ el monitoreo se llevó a cabo únicamente durante los primeros 18 días del mes de junio para el año 2022 y junio del año 2023, conforme a los requerimientos y directrices establecidas para el proyecto en la empresa. Esta duración según lo solicitado permitió obtener datos representativos de estos contaminantes en la zona.

Las variables meteorológicas, incluyendo temperatura, dirección y velocidad del viento, así como precipitación, fueron registradas mediante una estación meteorológica modelo Vantage Vue. Adicionalmente, para la identificación de posibles fuentes externas de contaminación asociadas a incendios forestales, se empleó el sistema de monitoreo FIRMS de la NASA (NASA, 2023).

3.2.1 Análisis estadístico

Los datos recolectados fueron procesados mediante herramientas especializadas para evaluar el comportamiento de los contaminantes atmosféricos. Se empleó la plataforma de software AmbiensQ (Applus, 2023). Para determinar la concentración de contaminantes y

analizar sus tendencias temporales. Adicionalmente, se utilizó el software estadístico (R Project) Team (2023), para el modelado de dispersión de contaminantes en función de las condiciones meteorológicas predominantes. Para evaluar la influencia de la dirección y velocidad del viento en la dispersión de contaminantes, se recurrió al software WRPLOT View Lakes Environmental Software (2023), con el cual se elaboró las rosas de viento. Asimismo, Microsoft Excel fue utilizado para la representación gráfica y el análisis comparativo de las concentraciones de contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas. El análisis comparativo de los datos correspondientes del mes de junio para el año 2022 y junio del año 2023 permitió identificar tendencias y variaciones en la concentración de los contaminantes evaluados. Además, se estableció la relación entre las variables meteorológicas y las concentraciones de los contaminantes atmosféricos, con el fin de determinar posibles patrones de arrastre y deposición para los contaminantes.

3.2.2 Cálculo del índice de Calidad del Aire (ICA)

El Índice de Calidad del Aire (ICA) fue determinado con base en los datos obtenidos durante el monitoreo, siguiendo la Norma Nacional de Calidad del Aire establecida por la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). Se calcularon los valores diario promedio de cada contaminante atmosférico (PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , SO_2 y O_3), y se clasificaron según los Niveles Máximos Permisibles de Concentración definidos en esta normativa para evaluar la calidad del aire en la zona de estudio (MADS, 2017).

4. Resultados y discusión

4.1 Monitoreo de parámetros meteorológicos

Se ubicó una estación meteorológica Vantage Vue; marca Davis Instruments, en la estación CA-2. Con esto se busca estudiar el comportamiento de las condiciones atmosféricas más relevantes para identificar su influencia sobre la dispersión de contaminantes en la atmósfera para la zona de estudio durante los días de trabajo de campo.

Figura 2. Estación meteorológica instalada.



Los datos recopilados permiten identificar patrones predominantes en la velocidad y dirección del viento, los cuales son fundamentales para evaluar la trayectoria y dispersión de los contaminantes atmosféricos. Por otro lado, el análisis de la pluviometría en la región resulta crucial para determinar la presencia y eficacia de los procesos de remoción húmeda, conocido también como lavado atmosférico. Este fenómeno ocurre cuando la precipitación arrastra y deposita partículas y gases presentes en la atmósfera, reduciendo así sus concentraciones y mejorando la calidad del aire. La eficacia de este proceso depende del volumen, intensidad y tipo de precipitación, así como de la naturaleza de los contaminantes involucrados. Asimismo, la integración de variables meteorológicas como la humedad relativa y la temperatura, junto con parámetros de superficie, contribuye a la estimación de la estabilidad atmosférica. En el periodo

de estudio la presión atmosférica en el área de monitoreo mostró diferencias significativas entre 2022 y 2023. En 2022, los valores oscilaron entre 651.89 y 655.12 mmHg, con un promedio de 653.57 mmHg. En 2023, el rango fue más amplio, entre 613.19 y 652.82 mmHg, con un promedio de 631.06 mmHg. La disminución de la presión en 2023 podría estar relacionada con cambios en la circulación atmosférica o la presencia de sistemas de baja presión en el período analizado.

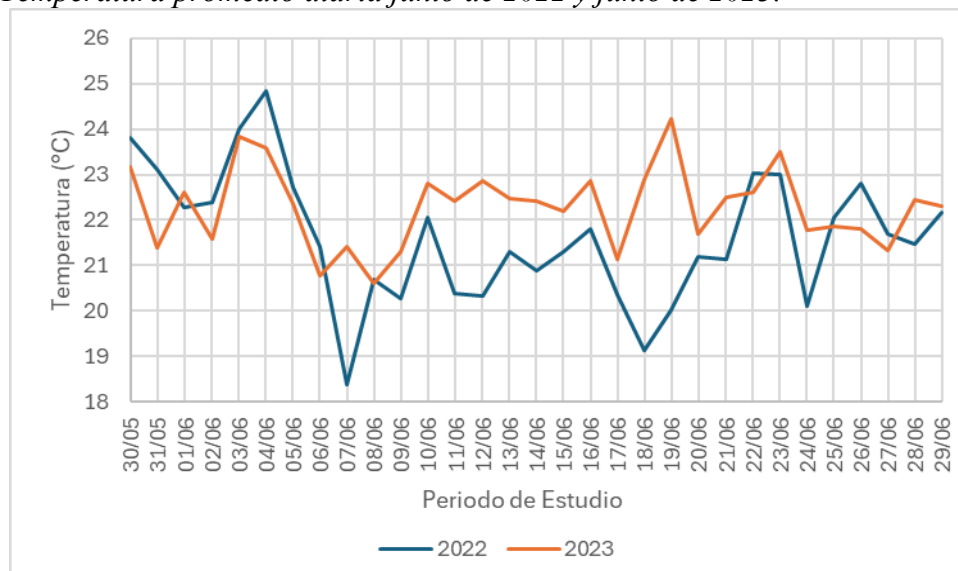
En la tabla 4, se presentan los registros diarios obtenidos a partir de la estación meteorológica ubicada en la estación CA-2, donde se consolida el valor promedio de los parámetros meteorológicos medidos para el mes de junio del año 2022 y 2023 con el objetivo de identificar diferencias en su comportamiento.

Tabla 3. Resumen de los parámetros meteorológicos de muestreo

<i>Parámetro</i>	<i>Temperatura (°C)</i>		<i>Precipitación (mm H₂O)</i>		<i>Velocidad del Viento (m/s)</i>	
<i>Fecha/Año</i>	<i>2022</i>	<i>2023</i>	<i>2022</i>	<i>2023</i>	<i>2022</i>	<i>2023</i>
30/05	23,81	23,18	0,25	4,20	0,47	0,53
31/05	23,12	21,40	60,6	5,44	1,62	0,72
01/06	22,27	22,60	14,49	12,94	0,95	0,60
02/06	22,38	21,59	8,13	4,56	0,64	0,57
03/06	24,00	23,85	6,57	0,25	1,38	0,50
04/06	24,83	23,58	0,00	8,89	1,48	0,40
05/06	22,73	22,35	4,57	8,13	1,11	0,64
06/06	21,41	20,78	0,75	12,70	0,40	0,40
07/06	18,39	21,41	11,69	24,64	0,77	0,53
08/06	20,68	20,60	6,11	12,45	0,48	0,40
09/06	20,26	21,29	8,36	1,78	0,40	0,40
10/06	22,05	22,80	42,42	14,98	0,40	0,40
11/06	20,38	22,43	21,08	1,00	0,57	0,40
12/06	20,34	22,87	14,23	0,25	0,40	0,58
13/06	21,30	22,47	0,25	2,79	0,40	0,77
14/06	20,89	22,41	4,82	17,27	0,40	0,46
15/06	21,29	22,19	76,95	0,51	0,40	0,40
16/06	21,80	22,86	38,09	27,94	0,45	0,50
17/06	20,35	21,14	7,37	5,09	0,40	0,40

<i>Parámetro</i>	<i>Temperatura (°C)</i>		<i>Precipitación (mm H₂O)</i>		<i>Velocidad del Viento (m/s)</i>	
<i>Fecha/Año</i>	<i>2022</i>	<i>2023</i>	<i>2022</i>	<i>2023</i>	<i>2022</i>	<i>2023</i>
18/06	19,13	22,90	29,45	0,00	0,88	0,40
19/06	20,03	24,22	41,71	0,00	1,35	0,40
20/06	21,19	21,69	20,63	6,86	0,66	0,40
21/06	21,13	22,50	11,85	3,30	1,31	0,40
22/06	23,03	22,60	15,51	5,76	0,97	0,60
23/06	22,99	23,50	0,86	11,55	0,88	0,65
24/06	20,11	21,78	4,17	8,63	1,45	0,72
25/06	22,05	21,85	0,50	20,49	1,59	0,40
26/06	22,81	21,80	10,64	1,43	1,04	0,40
27/06	21,68	21,33	4,37	3,24	0,99	0,40
28/06	21,48	22,44	13,21	4,55	1,57	0,44
29/06	22,18	22,31	6,06	2,08	0,75	0,63
<i>Promedio</i>	21,62	22,28	15,67	7,54	0,86	0,50
<i>Máximo</i>	24,83	24,22	76,95	27,94	1,62	0,77
<i>Mínimo</i>	18,39	20,60	0,00	0,00	0,40	0,40

Figura 3. Temperatura promedio diaria junio de 2022 y junio de 2023.

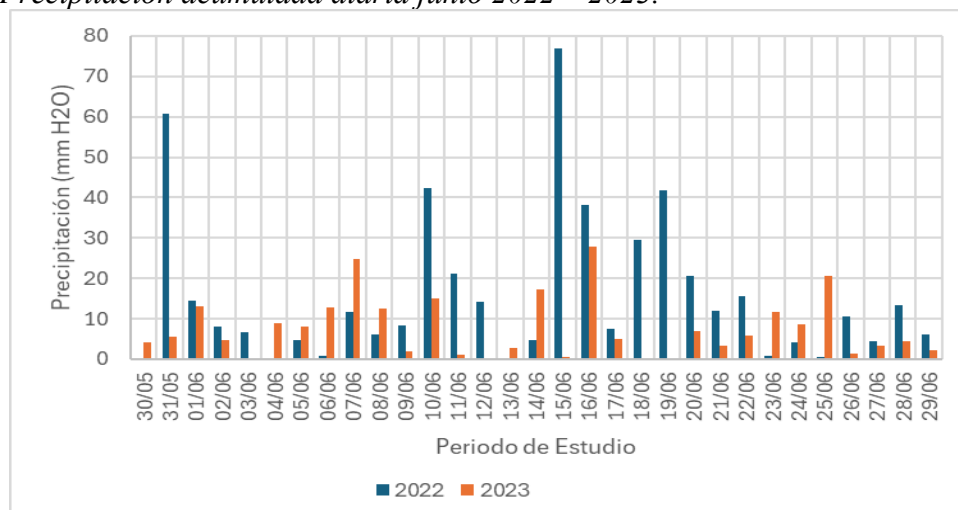


En la Tabla 4 y Figura 3, se observa que para el año 2022 la temperatura presentó variaciones entre un mínimo de 18.39 °C, registrado el 7 de junio y un máximo de 24.83 °C, medido el 4 de junio, con un promedio de 21.62 °C durante el período de monitoreo. Para el año

2023, la temperatura mínima se registró el 8 de junio, con un valor de 20.60 °C, mientras que la temperatura máxima se alcanzó el 19 de junio, con 24.22 °C, obteniendo un valor promedio de 22.28 °C.

Al comparar ambos años, se evidencia un aumento en la temperatura mínima en 2023 respecto a 2022, mientras que la temperatura máxima fue ligeramente menor. Además, el incremento de 0.66 °C en el promedio de temperatura en 2023 sugiere un calentamiento generalizado, posiblemente influenciado por variaciones en la cobertura nubosa, circulación atmosférica y otros factores meteorológicos.

Dado que las fluctuaciones térmicas influyen en la dispersión de los contaminantes atmosféricos, se identifica que entre las 08:00 y las 18:00 horas podrían registrarse mayores concentraciones de material particulado, pues las temperaturas en este intervalo superan los 21°C. Según Stafoggia (2008), existe una relación proporcional entre la temperatura y la concentración de material particulado, observándose que a temperaturas más altas suelen corresponder concentraciones más elevadas de este contaminante. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de una relación inversa o la ausencia de correlación en determinados contextos, debido a factores como la velocidad del viento y la influencia de fuentes emisoras locales.

Figura 4. *Precipitación acumulada diaria junio 2022 – 2023.*

Como se muestra en la Figura 4, la precipitación máxima diaria en 2022 alcanzó un valor de 76.95 mm, registrado el 15 de junio. De acuerdo con la escala de precipitación establecida por la Secretaría Distrital de Ambiente, presentada en la Tabla 5, este valor se clasifica como "Torrencial" (precipitación diaria >70 mm), lo que indica lluvias intensas y persistentes en la región durante este periodo. La precipitación mínima se observó el 4 de junio, con un valor nulo, lo que indica ausencia total de precipitación en ese día. El promedio mensual de precipitación en junio 2022 fue de 15.67 mm, lo que lo ubica en la categoría de "Escasa" (0-20 mm/mes), reflejando una distribución irregular de las lluvias, con eventos aislados de alta intensidad.

En contraste, para el año 2023, la precipitación máxima registrada fue de 27.94 mm, medida el 16 de junio, clasificándose dentro del rango de "Fuerte" (21-50 mm/día). La precipitación mínima se presentó los días 18 y 19 de junio con valores nulos, sin registro de lluvia. El promedio mensual en 2023 fue de 7.54 mm, clasificándose también como "Escasa" (0-20 mm/mes), evidenciando un periodo con lluvias menos intensas y menor acumulación de agua en comparación con el año anterior.

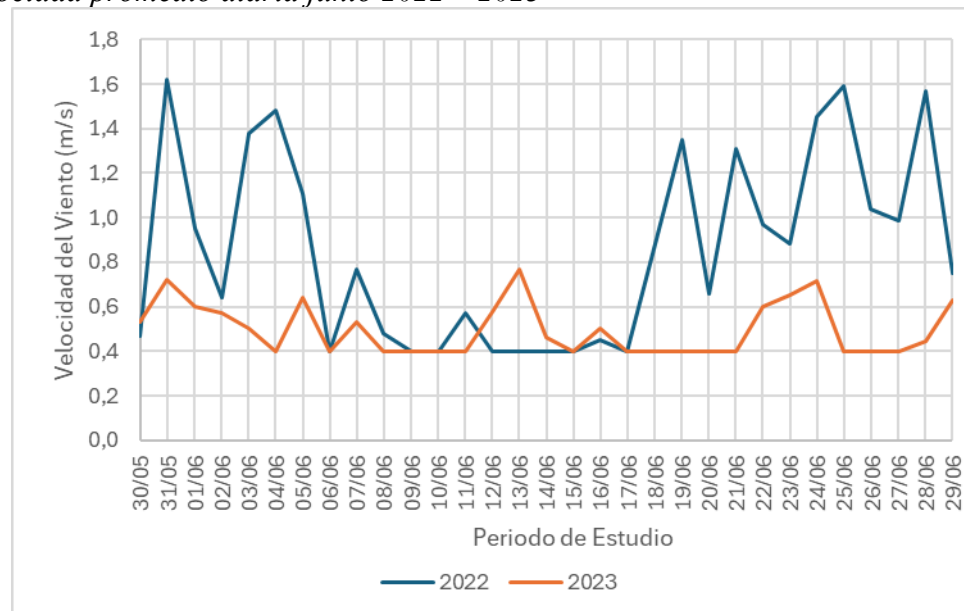
Tabla 4. *Escala de precipitación diaria y mensual*

<i>Denominación</i>	<i>Precipitación Diaria (mm)</i>	<i>Precipitación Mensual (mm)</i>
Escasa	0-5	0 -20
Ligera	6 -10	21-40
Moderada	11-20	41 – 80
Fuerte	21-50	81 – 200
Muy Fuerte	51-70	201-280
Torrencial	>70	>281

Tomado de Secretaría Distrital de Ambiente, Dirección de Control Ambiental, Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá D.C (2009).

Al comparar ambos años, se observa una reducción significativa en la precipitación en 2023 respecto a 2022. La máxima precipitación diaria en 2023 (27.94 mm) fue 63.7% menor que la de 2022 (76.95 mm), el promedio mensual también disminuyó en aproximadamente 51.9% (15.67 mm en 2022 a 7.54 mm en 2023). Este patrón sugiere que el mes de junio de 2023 experimentó un periodo más seco, ligeramente más cálido y con eventos de lluvia menos intensos en comparación con 2022.

Las precipitaciones constituyen un mecanismo altamente eficiente para la remoción de contaminantes atmosféricos. Por esta razón, en el presente estudio se espera que este factor tenga un impacto significativo en la concentración de los contaminantes evaluados, considerando que, en la mayoría de los días con registro de lluvias, estas fueron de intensidad considerable.

Figura 5. *Velocidad promedio diaria junio 2022 – 2023*

Durante el período de monitoreo, la velocidad promedio del viento en junio de 2022 fue de 0.86 m/s, con un valor mínimo de 0.40 m/s, registrado en varios días a lo largo del mes, especialmente entre el 6 y 17 de junio. En contraste, la velocidad máxima alcanzó 1.62 m/s, medida el 31 de mayo, seguido de una velocidad de 1.59 m/s y 1.57 m/s, registrado el 25 y 28 de junio, lo que indica la presencia de eventos puntuales de mayor intensidad. En junio de 2023, la velocidad del viento mostró una reducción significativa, con un promedio de 0.50 m/s. La velocidad mínima de 0.40 m/s se presentó con mayor frecuencia, observándose en distintos días a lo largo del mes, principalmente entre el 4 y el 27 de junio. A diferencia de 2022, la velocidad máxima registrada en 2023 fue considerablemente menor, alcanzando 0.77 m/s el 13 de junio, lo que refleja una menor variabilidad en la circulación del aire. Se observó que para 2022 las horas del día con los registros más altos de velocidad del viento se presentaron a las 07:00 y 21:00 horas, con valores de 1.24 m/s. Mientras que para 2023, las horas del día con los registros más altos se presentaron a las 3:00 y 21:00 horas, con valores de 0.94 m/s y 1.10 m/s. En

consecuencia, se puede considerar que las franjas horarias de la mañana y la noche son los periodos en los que el viento tiene mayor potencial para influir en la dispersión de contaminantes atmosféricos, como se muestra en la Figura 5.

Los datos evidencian una disminución general en la velocidad del viento en 2023, tanto en su valor promedio como en su valor máximo. Mientras que en 2022 se alcanzó una velocidad máxima de 1.62 m/s, en 2023 el valor más alto registrado fue menos de la mitad (0.77 m/s). Además, en 2023 se observaron más días con velocidades mínimas de 0.40 m/s, lo que sugiere una reducción en la circulación del aire.

Este cambio en la dinámica del viento puede influir en la dispersión de contaminantes atmosféricos. En 2022, la mayor velocidad del viento favoreció un transporte y dispersión más eficiente de los contaminantes, reduciendo su concentración en la atmósfera. En contraste, en 2023, la menor velocidad del viento pudo haber generado condiciones más propicias para la acumulación de contaminantes, especialmente en horas de estabilidad atmosférica.

La disminución de la velocidad del viento en 2023 también puede estar relacionada con la reducción en la cantidad de precipitación y el aumento de la temperatura promedio. Un menor transporte de humedad limita la formación de nubosidad y lluvias, mientras que una menor circulación de aire contribuye a un calentamiento más pronunciado de la superficie.

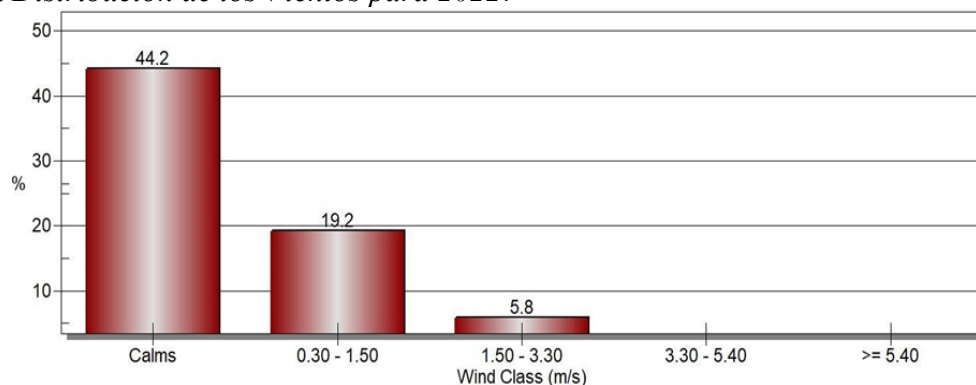
Tabla 5. *Distribución de la frecuencia de los vientos para 2022.*

<i>Directions / Wind Classes (m/s)</i>	<i>Aire Ligero 0.30 - 1.50</i>	<i>Brisa Ligera 1.50 - 3.30</i>	<i>Brisa suave 3.30 - 5.40</i>	<i>Brisa moderada y mayores >= 5.40</i>	<i>Total (%)</i>
N	0.21%	0.00%	0.00%	0.00%	0.21%
NNE	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
NE	1.46%	0.21%	0.00%	0.00%	1.67%
ENE	6.67%	1.88%	0.00%	0.00%	8.54%
E	4.38%	2.08%	0.00%	0.00%	6.46%
ESE	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
SE	1.46%	0.00%	0.00%	0.00%	1.46%

<i>Directions / Wind Classes (m/s)</i>	<i>Aire Ligero 0.30 - 1.50</i>	<i>Brisa Ligera 1.50 - 3.30</i>	<i>Brisa suave 3.30 - 5.40</i>	<i>Brisa moderada y mayores >= 5.40</i>	<i>Total (%)</i>
SSE	0.21%	0.21%	0.00%	0.00%	0.42%
S	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
SSW	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
SW	0.63%	0.00%	0.00%	0.00%	0.63%
WSW	1.88%	0.63%	0.00%	0.00%	2.50%
W	0.42%	0.63%	0.00%	0.00%	1.04%
WNW	1.46%	0.21%	0.00%	0.00%	1.67%
NW	0.21%	0.00%	0.00%	0.00%	0.21%
NNW	0.21%	0.00%	0.00%	0.00%	0.21%
Sub-Total	19.17%	5.83%	0.00%	0.00%	25.00%
Calms					44.17%
Missing/Incomplete					30.83%
Total					100.00%

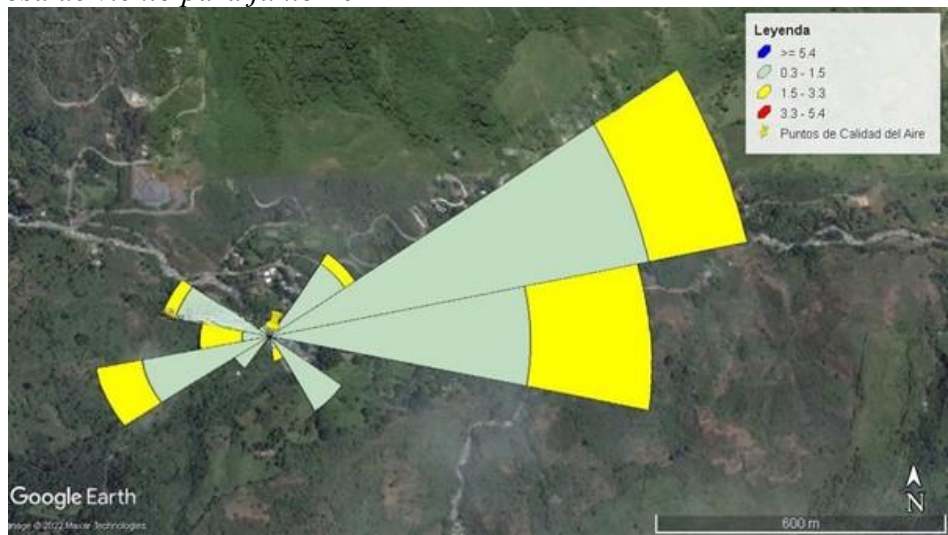
Según la escala de Beaufort, utilizada para evaluar la intensidad del viento con base en sus efectos sobre la superficie terrestre y marina, la Tabla 6 muestra la distribución de frecuencias de dirección y velocidad del viento en el área de estudio. Estos datos fueron procesados con el software WRPLOT View (versión 8.0.2) de Lakes Environmental.

Figura 6. *Distribución de los Vientos para 2022.*



A partir del análisis de los datos recopilados en la Figura 6, para 2022 se identificó que la categoría de “vientos en calma” representa un porcentaje significativo del 44.17%, seguida de los vientos clasificados como “aire ligero” (19.17%) y “brisa ligera” (5.83%).

Figura 7. Rosa de viento para junio 2022.



En la figura 7, se presenta la rosa de los vientos obtenida para la zona de estudio, donde se observa que la dirección predominante del viento es Este-Noreste (ENE) con un 8.54%, seguida de Este (E) con un 6.46% y Oeste-Suroeste (WSW) con un 2.50%.

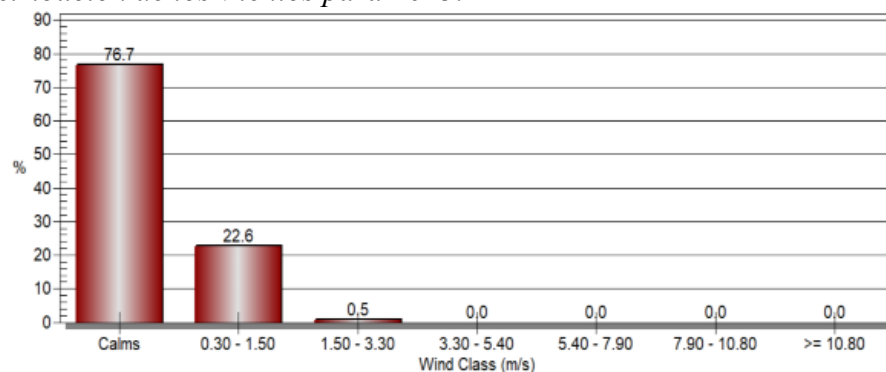
Por otro lado, en la Tabla 7 se muestra la distribución de frecuencias de dirección y velocidad del viento en el área de estudio para 2023.

Tabla 6. Distribución de la frecuencia de los vientos para 2023

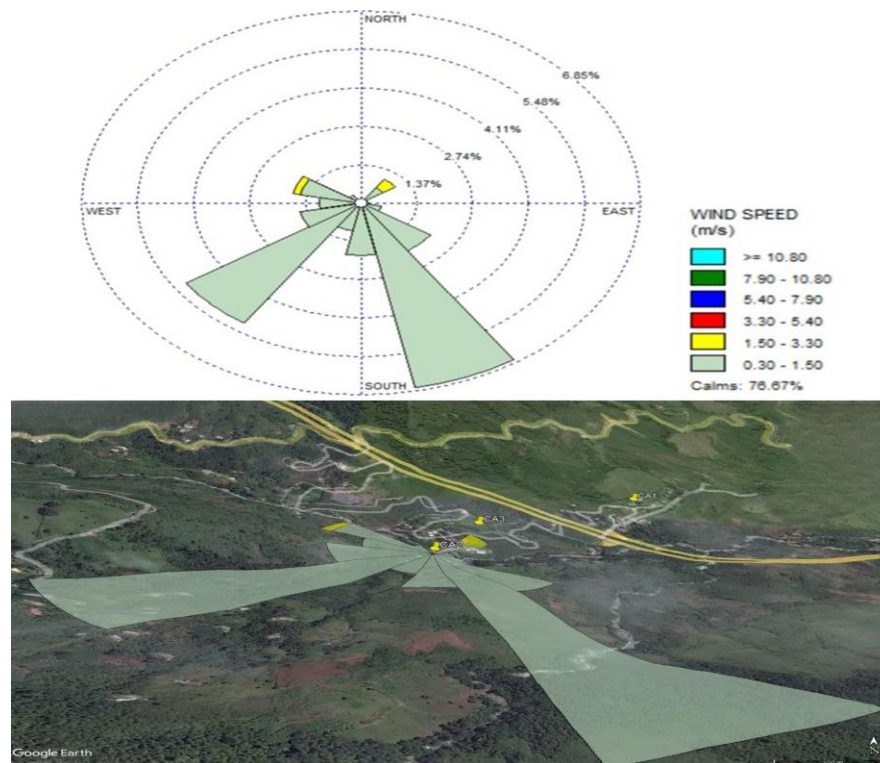
Directions / Wind Classes (m/s)	Aire Ligero 0.30 - 1.50	Brisa Ligera 1.50 - 3.30	Brisa suave 3.30 - 5.40	Brisa moderada y mayores >= 5.40	Total (%)
N	0.00	0.00	0.00%	0.00%	0.00%
NNE	0.00	0.00	0.00%	0.00%	0.00%
NE	0.69	0.34	0.00%	0.00%	1.03%
ENE	0.17	0.00	0.00%	0.00%	0.17%

<i>Directions / Wind Classes (m/s)</i>	<i>Aire Ligero 0.30 - 1.50</i>	<i>Brisa Ligera 1.50 - 3.30</i>	<i>Brisa suave 3.30 - 5.40</i>	<i>Brisa moderada y mayores >= 5.40</i>	<i>Total (%)</i>
E	0.00	0.00	0.00%	0.00%	0.00%
ESE	0.51	0.00	0.00%	0.00%	0.51%
SE	2.06	0.00	0.00%	0.00%	2.06%
SSE	6.69	0.00	0.00%	0.00%	6.69%
S	1.89	0.00	0.00%	0.00%	1.89%
SSW	1.03	0.00	0.00%	0.00%	1.03%
SW	5.15	0.00	0.00%	0.00%	5.15%
WSW	1.54	0.00	0.00%	0.00%	1.54%
W	1.03	0.00	0.00%	0.00%	1.03%
WNW	1.54	0.17	0.00%	0.00%	1.72%
NW	0.34	0.00	0.00%	0.00%	0.34%
NNW	0.00	0.00	0.00%	0.00%	0.00%
Sub-Total	22.64%	0.51%	0.00%	0.00%	23.16%
Calms					76.67%
Missing/Incomplete					0.17%
Total					100.00%

Figura 8. Distribución de los Vientos para 2023.



A partir del análisis de los datos recopilados en la Figura 8 y Tabla 7, para 2023 se identificó que la categoría de “vientos en calma” representa un porcentaje significativo del 76.67%, seguida de los vientos clasificados como “aire ligero” (22.64%) y “brisa ligera” (0.51%).

Figura 9. Rosa de viento para junio 2023.

En la Figura 9, se presenta la rosa de los vientos obtenida para la zona de estudio durante el periodo de muestreo, observando que la dirección predominante es Sur-Sureste (SSE) con 6.69% y Sur- Oeste (SW) con un 5.15%.

La menor velocidad del viento en 2023 pudo haber favorecido un mayor calentamiento de la superficie, ya que una menor circulación de aire reduce la disipación del calor acumulado durante el día, lo que explicaría el aumento en la temperatura mínima y promedio. En contraste, en 2022, una mayor velocidad del viento pudo haber facilitado la evaporación y la formación de nubosidad, resultando en precipitaciones más intensas y frecuentes.

4.2 Monitoreo de concentraciones de Material Particulado (PM₁₀)

A continuación, se analizan los datos correspondientes a cada año de manera independiente, con el fin de evaluar las tendencias y variaciones en las concentraciones de PM₁₀ en cada estación de monitoreo.

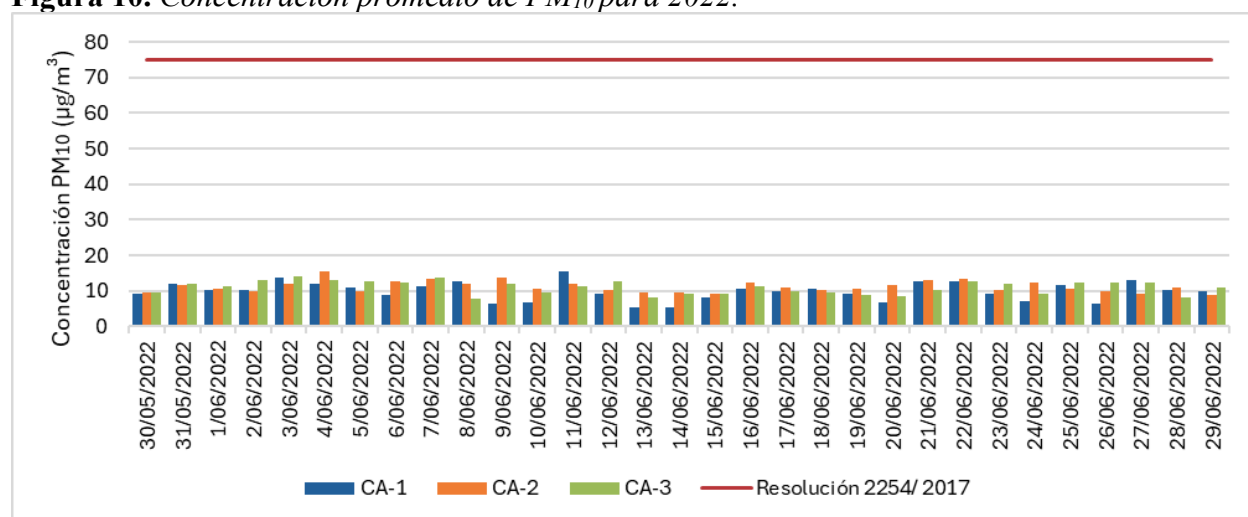
En la Tabla 8 se presentan los resultados de las concentraciones de PM₁₀ medidas en las tres estaciones de monitoreo (CA-1, CA-2 y CA-3) durante el período de evaluación, comprendido entre el 30 de mayo y el 29 de junio de 2022 y 2023. Se evidencia que las concentraciones diarias se mantuvieron por debajo del límite de 75 µg/m³ para 24 horas, establecido en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).

El tiempo de medición para PM₁₀ en las muestras válidas osciló entre 24 ± 1 horas, cumpliendo con los requisitos normativos, además no se registraron datos inválidos durante el monitoreo.

Tabla 7. Concentraciones diarias de PM₁₀ para 2022

<i>Fecha</i>	<i>Estación CA-1 (µg/m³)</i>	<i>Estación CA-2 (µg/m³)</i>	<i>Estación CA-3 (µg/m³)</i>	<i>Resolución 2254/ 2017 (µg/m³)</i>
30/05/2022	9,20	9,45	9,58	75
31/05/2022	11,87	11,57	12,10	75
1/06/2022	10,37	10,55	11,38	75
2/06/2022	10,10	9,77	12,99	75
3/06/2022	13,78	11,94	14,17	75
4/06/2022	11,95	15,44	13,20	75
5/06/2022	11,02	9,90	12,62	75
6/06/2022	9,00	12,68	12,43	75
7/06/2022	11,30	13,23	13,82	75
8/06/2022	12,59	11,88	7,94	75
9/06/2022	6,55	13,84	12,05	75
10/06/2022	6,68	10,73	9,58	75
11/06/2022	15,35	11,81	11,24	75
12/06/2022	9,18	10,11	12,55	75

<i>Fecha</i>	<i>Estación CA-1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Estación CA-2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Estación CA-3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Resolución 2254/ 2017 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>
13/06/2022	5,30	9,57	8,30	75
14/06/2022	5,42	9,64	9,22	75
15/06/2022	7,98	9,36	9,28	75
16/06/2022	10,72	12,26	11,17	75
17/06/2022	10,02	10,77	9,96	75
18/06/2022	10,49	10,26	9,58	75
19/06/2022	9,10	10,57	8,76	75
20/06/2022	6,61	11,71	8,63	75
21/06/2022	12,59	12,91	10,29	75
22/06/2022	12,78	13,27	12,62	75
23/06/2022	9,21	10,39	11,95	75
24/06/2022	7,26	12,28	9,12	75
25/06/2022	11,50	10,48	12,23	75
26/06/2022	6,38	9,98	12,31	75
27/06/2022	12,92	9,23	12,34	75
28/06/2022	10,40	10,94	8,22	75
29/06/2022	9,79	9,01	10,80	75
Promedio	9,92	11,15	10,98	75
Máximo	15,35	15,44	14,17	75
Mínimo	5,30	9,01	7,94	75

Figura 10. Concentración promedio de PM_{10} para 2022.

En la Figura 10, se presentan los resultados de PM₁₀ en comparación con el límite normativo. Se observa que la concentración más alta se registró en la estación CA-2, con un valor de 15.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 4 de junio de 2022, mientras que la concentración más baja se midió en la estación CA-1, con 5.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 13 de junio de 2022. En ninguno de los días de monitoreo se presentaron excedencias con respecto a los valores máximos permisibles establecidos en la normativa vigente.

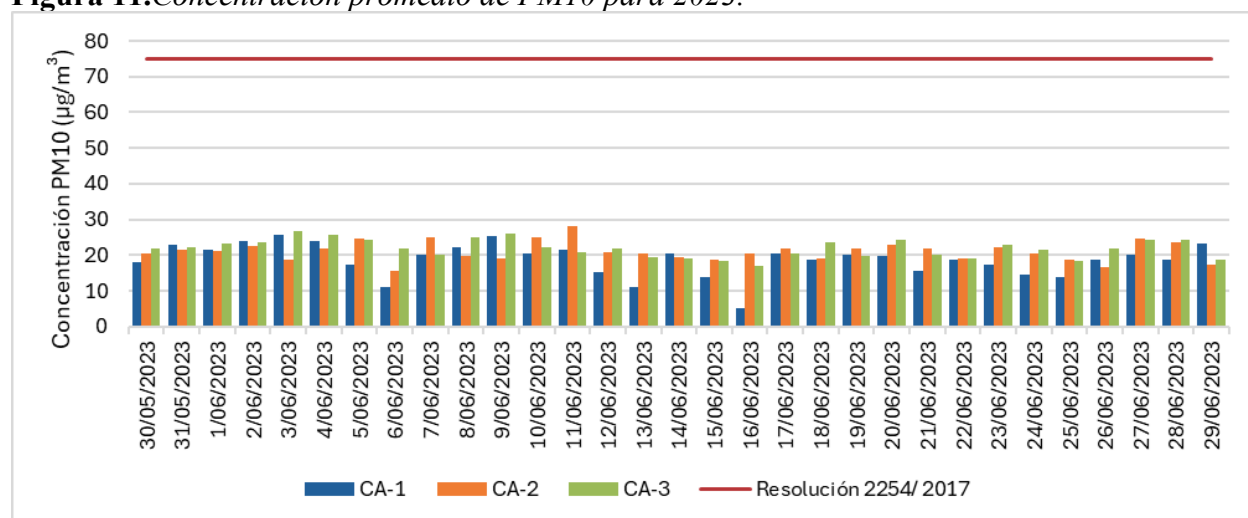
En la Tabla 8 se observa que la estación CA-2 registró el valor promedio más alto (11.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que la estación CA-1 presentó el más bajo (9.92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). A partir de la información estadística presentada se identificó que la mayor dispersión del contaminante se presentó en la estación CA-1, seguida por CA-3 y CA-2.

Los resultados de las concentraciones de PM₁₀ medidas en las tres estaciones de monitoreo (CA-1, CA-2 y CA-3) durante el período de estudio en el año 2023 se presentan en la Tabla 9, donde se evidencia que las concentraciones diarias se mantuvieron por debajo del límite de 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 horas, establecido en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).

El tiempo de medición para PM₁₀ en las muestras válidas se mantuvo igual al año anterior dado que osciló entre 24 ± 1 horas, cumpliendo con los requisitos normativos, y no se registraron datos inválidos durante el monitoreo.

Tabla 8. *Concentraciones diarias de PM10 para 2023*

<i>Fecha</i>	<i>Estación CA-1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Estación CA-2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Estación CA-3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Resolución 2254/ 2017 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>
30/05/2023	17,98	20,60	21,73	75
31/05/2023	22,77	21,57	22,05	75
1/06/2023	21,61	21,17	23,18	75
2/06/2023	23,88	22,50	23,76	75
3/06/2023	25,57	18,60	26,91	75
4/06/2023	23,88	21,97	25,71	75
5/06/2023	17,45	24,60	24,38	75
6/06/2023	11,02	15,44	22,00	75
7/06/2023	20,20	24,98	20,00	75
8/06/2023	22,38	19,72	24,89	75
9/06/2023	25,38	19,09	25,95	75
10/06/2023	20,46	24,94	22,15	75
11/06/2023	21,36	28,20	20,77	75
12/06/2023	15,35	20,96	21,99	75
13/06/2023	11,20	20,41	19,55	75
14/06/2023	20,36	19,37	19,22	75
15/06/2023	14,01	18,76	18,52	75
16/06/2023	5,30	20,55	16,90	75
17/06/2023	20,64	21,76	20,42	75
18/06/2023	18,57	18,97	23,56	75
19/06/2023	20,12	21,97	19,68	75
20/06/2023	19,72	23,06	24,31	75
21/06/2023	15,46	21,83	20,21	75
22/06/2023	18,60	19,22	19,02	75
23/06/2023	17,35	22,33	22,86	75
24/06/2023	14,46	20,36	21,61	75
25/06/2023	13,96	18,58	18,23	75
26/06/2023	18,84	16,62	21,94	75
27/06/2023	20,15	24,67	24,43	75
28/06/2023	18,67	23,56	24,40	75
29/06/2023	23,37	17,50	18,84	75
Promedio	18,71	21,09	21,91	75
Máximo	25,57	28,20	26,91	75
Mínimo	5,30	15,44	16,90	75

Figura 11. Concentración promedio de PM10 para 2023.

En la Figura 11, se presenta de manera grafica las concentraciones de PM10 para el año 2023 en comparación con el límite normativo. Se observa que la concentración más alta se registró en la estación CA-2, con 28.20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 11 de junio, mientras que la concentración más baja se midió en la estación CA-1, con 5.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 16 de junio. En comparación con 2022, los valores máximos en todas las estaciones aumentaron significativamente. En ninguno de los días de monitoreo se presentaron excedencias con respecto a los valores máximos permisibles establecidos en la normativa vigente.

La Tabla 9 muestra que la estación CA-3 registró el valor promedio más alto (21.91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que la estación CA-1 presentó el más bajo (18.71 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Con base en la información estadística presentada se identificó que la mayor dispersión del contaminante se presentó en la estación CA-1, seguida por la estación CA-3 y la estación CA-2, dicha variabilidad puede ser atribuida no solo a la naturaleza de las fuentes, sino también a los cambios que a diario se producen en las condiciones meteorológicas, en las actividades propias de la zona y operación de áreas industriales.

A partir del análisis individual de cada año, a continuación, se presenta una comparación de las concentraciones de PM10 en 2022 y 2023, considerando la influencia de las condiciones meteorológicas predominantes en cada período.

En términos generales, se observa un incremento significativo en las concentraciones de PM10 en 2023 en comparación con 2022. En 2022, la estación con mayor concentración promedio fue CA-2, mientras que en 2023 esta posición la ocupó CA-3. La estación CA-1 fue la que presentó las concentraciones más bajas en ambos años.

Este aumento de material particulado PM10 en 2023 puede estar relacionado con factores meteorológicos adversos, como una reducción del viento en un 42% en comparación con 2022, lo que implica un menor transporte y dispersión de contaminantes. Asimismo, la precipitación disminuyó en un 51.9%, reduciendo el proceso de eliminación de partículas por deposición húmeda. El aumento en la temperatura promedio de 21.62 °C en 2022 a 22.28 °C en 2023 pudo contribuir a una mayor resuspensión de partículas en la atmósfera, debido a su influencia en la evaporación de humedad en el suelo y la consecuente movilización de polvo y otras partículas. Además, la presión atmosférica en 2023 fue en promedio 22.51 mmHg menor que en 2022, lo que sugiere un comportamiento atmosférico menos estable, favoreciendo la acumulación de contaminantes en superficie. No obstante, esta reducción no fue suficiente para mejorar la calidad del aire, dado que la baja velocidad del viento prevaleció como el factor dominante.

4.3 Concentraciones de material particulado PM2.5

Los resultados de las concentraciones diarias de PM2.5 obtenidas en las tres estaciones de monitoreo durante el período seco se presentan en la Tabla 10 se evidencia que los valores

registrados no superan el límite normativo de $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 horas, establecido en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).

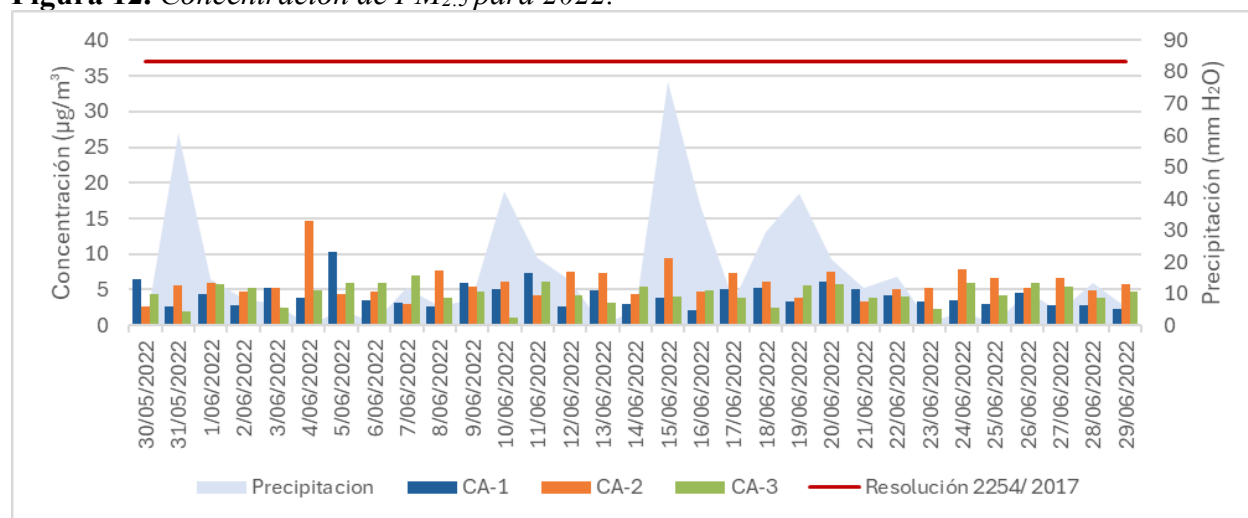
El tiempo de medición para PM_{2.5} en las muestras válidas osciló entre 24 ± 1 horas, cumpliendo con los requisitos normativos, y no se registraron datos inválidos durante el monitoreo.

Tabla 9. Concentraciones diarias de PM_{2.5} para 2022

<i>Fecha</i>	<i>Estación CA-1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Estación CA-2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Estación CA-3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Resolución 2254/ 2017 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>
30/05/2022	6,39	2,61	4,41	37
31/05/2022	2,56	5,65	1,98	37
1/06/2022	4,38	5,97	5,82	37
2/06/2022	2,74	4,67	5,20	37
3/06/2022	5,28	5,28	2,52	37
4/06/2022	3,88	14,58	4,90	37
5/06/2022	10,38	4,42	6,01	37
6/06/2022	3,54	4,64	6,03	37
7/06/2022	3,12	2,98	7,00	37
8/06/2022	2,67	7,73	3,82	37
9/06/2022	6,00	5,48	4,67	37
10/06/2022	5,08	6,04	1,15	37
11/06/2022	7,30	4,29	6,10	37
12/06/2022	2,71	7,52	4,24	37
13/06/2022	4,86	7,36	3,20	37
14/06/2022	3,01	4,39	5,35	37
15/06/2022	3,88	9,36	4,02	37
16/06/2022	2,20	4,79	4,98	37
17/06/2022	5,03	7,36	3,78	37
18/06/2022	5,20	6,09	2,50	37
19/06/2022	3,42	3,85	5,60	37
20/06/2022	6,20	7,44	5,80	37
21/06/2022	5,08	3,32	3,88	37
22/06/2022	4,16	5,15	4,07	37
23/06/2022	3,26	5,25	2,25	37
24/06/2022	3,55	7,82	5,94	37
25/06/2022	3,06	6,56	4,28	37
26/06/2022	4,59	5,32	5,89	37

<i>Fecha</i>	<i>Estación CA-1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Estación CA-2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Estación CA-3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Resolución 2254/ 2017 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>
27/06/2022	2,83	6,70	5,42	37
28/06/2022	2,86	4,87	3,86	37
29/06/2022	2,21	5,79	4,79	37
Promedio	4,24	5,91	4,50	37
Máximo	10,38	14,58	7,00	37
Mínimo	2,20	2,61	1,15	37

Figura 12. Concentración de $\text{PM}_{2.5}$ para 2022.



En la Figura 12, se presentan las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ en comparación con el límite normativo. Se observa que la concentración más alta se registró en la estación CA-2, con un valor de $14.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 4 de junio de 2022, mientras que la concentración más baja se midió en la estación CA-3, con $1.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 10 de junio de 2022. En ninguno de los días de monitoreo se presentaron excedencias con respecto a los valores máximos permisibles establecidos en la normativa vigente.

En la tabla 10 se registra la concentración promedio obtenida en las estaciones de monitoreo durante el estudio. Se observa que la estación CA-2 registró el valor promedio más alto ($5.91 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que la estación CA-1 presentó el más bajo ($4.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$). A partir de

la información estadística presentada se identificó que la mayor dispersión del contaminante se presentó en la estación CA-2, seguida por CA-1 y CA-3.

En la Tabla 11 se presentan las concentraciones de PM_{2.5} medidas en las tres estaciones de monitoreo (CA-1, CA-2 y CA-3) durante el período de estudio en el año 2023. Se evidencia que las concentraciones diarias se mantuvieron por debajo del límite normativo de 37 µg/m³ para 24 horas, establecido en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), como se ilustra en la Figura 17.

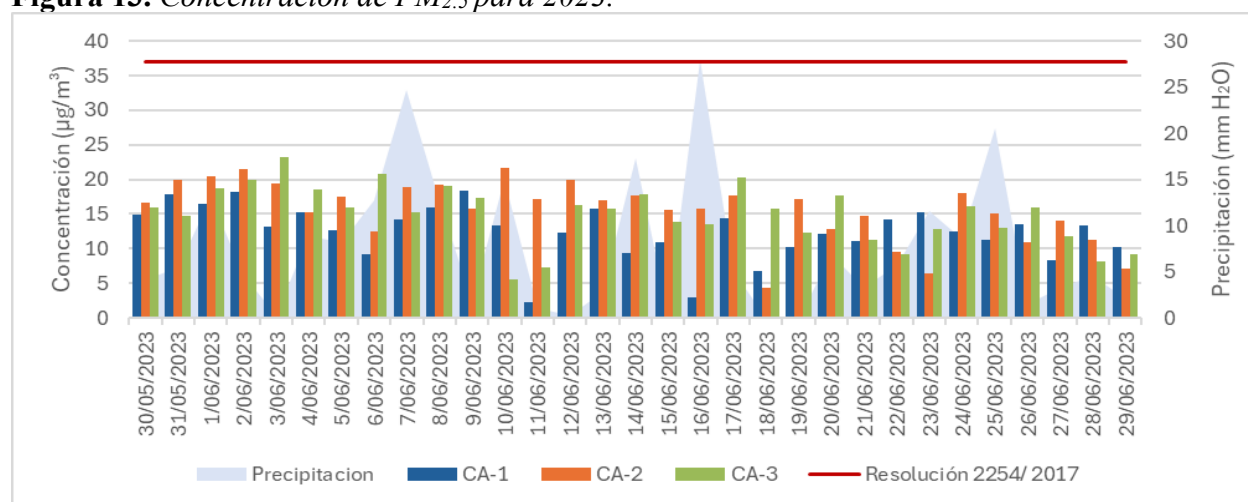
El tiempo de medición para PM_{2.5} en las muestras válidas se mantuvo igual al año anterior dado que osciló entre 24 ± 1 horas, cumpliendo con los requisitos normativos, y no se registraron datos inválidos durante el monitoreo.

Tabla 10. Concentraciones diarias de PM_{2.5} para 2023

<i>Fecha</i>	<i>Estación CA-1 (µg/m³)</i>	<i>Estación CA-2 (µg/m³)</i>	<i>Estación CA-3 (µg/m³)</i>	<i>Resolución 2254/ 2017 (µg/m³)</i>
30/05/2023	14,86	16,60	15,88	37
31/05/2023	17,77	19,95	14,71	37
1/06/2023	16,52	20,43	18,69	37
2/06/2023	18,16	21,53	19,90	37
3/06/2023	13,20	19,33	23,21	37
4/06/2023	15,29	15,21	18,58	37
5/06/2023	12,64	17,45	15,86	37
6/06/2023	9,25	12,47	20,85	37
7/06/2023	14,14	18,83	15,19	37
8/06/2023	16,00	19,21	19,00	37
9/06/2023	18,42	15,77	17,35	37
10/06/2023	13,33	21,74	5,49	37
11/06/2023	2,33	17,18	7,31	37
12/06/2023	12,33	19,85	16,22	37
13/06/2023	15,85	16,93	15,76	37
14/06/2023	9,34	17,59	17,83	37
15/06/2023	10,85	15,65	13,82	37
16/06/2023	3,01	15,73	13,55	37
17/06/2023	14,41	17,67	20,23	37

<i>Fecha</i>	<i>Estación CA-1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Estación CA-2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Estación CA-3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>Resolución 2254/ 2017 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>
18/06/2023	6,82	4,41	15,71	37
19/06/2023	10,2	17,14	12,25	37
20/06/2023	12,08	12,79	17,66	37
21/06/2023	11,11	14,76	11,19	37
22/06/2023	14,24	9,47	9,12	37
23/06/2023	15,25	6,40	12,75	37
24/06/2023	12,52	18,05	16,19	37
25/06/2023	11,19	15,07	13,05	37
26/06/2023	13,48	10,88	15,90	37
27/06/2023	8,26	14,00	11,78	37
28/06/2023	13,39	11,23	8,21	37
29/06/2023	10,24	7,05	9,16	37
Promedio	12,47	15,50	14,92	37
Máximo	18,42	21,74	23,21	37
Mínimo	2,33	4,41	5,49	37

Figura 13. Concentración de $\text{PM}_{2.5}$ para 2023.



En la Figura 13, se presentan de manera grafica las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ para el año 2023 en comparación con el límite normativo. La concentración más alta se registró en la estación CA-3, con 23.21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 3 de junio, mientras que la concentración más baja se midió en la estación CA-1, con 2.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el 11 de junio. En comparación con 2022, los valores

máximos en todas las estaciones aumentaron significativamente. Asimismo, la estación CA-2 registró el valor promedio más alto ($15.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que la estación CA-1 presentó el más bajo ($12.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$), como se muestra en la Tabla 11.

En términos de distribución estadística, se identificó que en 2023 la variabilidad en los datos fue mayor en comparación con el año anterior. Se evidenció una mayor dispersión en la estación CA-3, seguida de CA-2 y CA-1, lo que indica fluctuaciones más significativas en las concentraciones de material particulado a lo largo del periodo de estudio.

Al comparar ambos años, se observa un incremento sustancial en las concentraciones de PM_{2.5} en 2023 en todas las estaciones de monitoreo. Este aumento puede estar relacionado con factores meteorológicos como la reducción en la velocidad del viento en 2023, cuyo promedio disminuyó de 0.86 m/s en 2022 a 0.50 m/s en 2023, lo que pudo haber limitado la dispersión de los contaminantes. Asimismo, la menor presión atmosférica promedio en 2023 (631.06 mmHg frente a 653.57 mmHg en 2022) pudo influir en una mayor estabilidad atmosférica y acumulación de partículas en superficie. Por otro lado, la precipitación acumulada en junio de 2023 fue menor que en 2022, lo que implica una menor deposición húmeda de partículas, favoreciendo su permanencia en el aire. Estos factores, combinados con posibles variaciones en las fuentes emisoras, explican el aumento generalizado en las concentraciones de PM_{2.5} en 2023.

4.4 Concentraciones de Dióxido de Nitrógeno (NO₂)

Las mediciones horarias de NO₂ se realizaron utilizando un equipo automático (Analizador por quimioluminiscencia), empleado durante dieciocho (18) días continuos en cada

una de las estaciones para comparar los resultados con la norma horaria de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para dióxido de nitrógeno, establecida por la Resolución 2254 de 2017.

En la Tabla 12 se registran las concentraciones máximas y mínimas horarias de NO_2 para el año 2022 obtenidas durante el periodo de medición en las tres estaciones evaluadas.

Tabla 11. Concentraciones máximas horarias - NO_2 para 2022

Concentración Horaria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Estación CA-1	Estación CA-2	Estación CA-3	Norma Horaria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Máxima	34.03	35.28	54.66	200
Mínima	2.89	1.59	1.62	200

Figura 14. Concentraciones promedio horarias de NO_2 CA-1 para 2022.

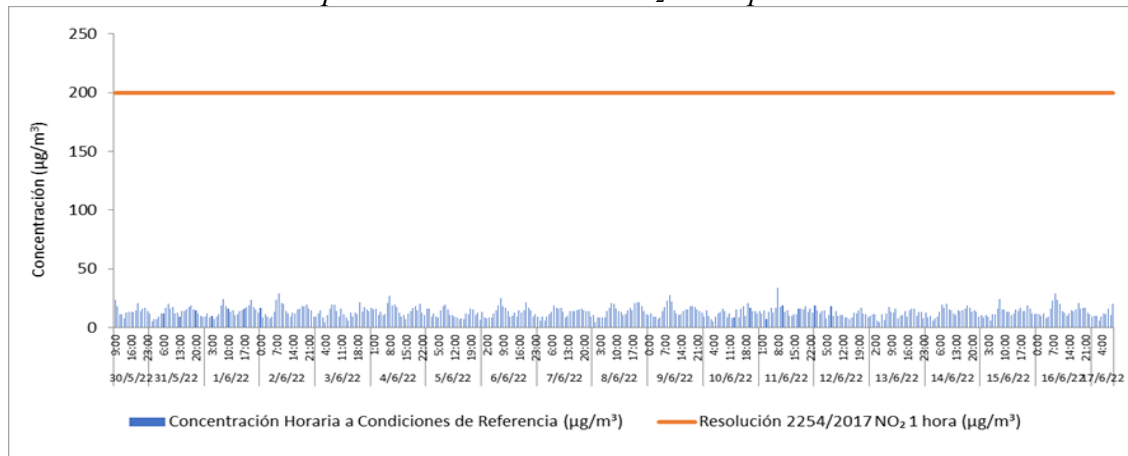


Figura 15. Concentraciones promedio horarias de NO_2 CA-2 para 2022.

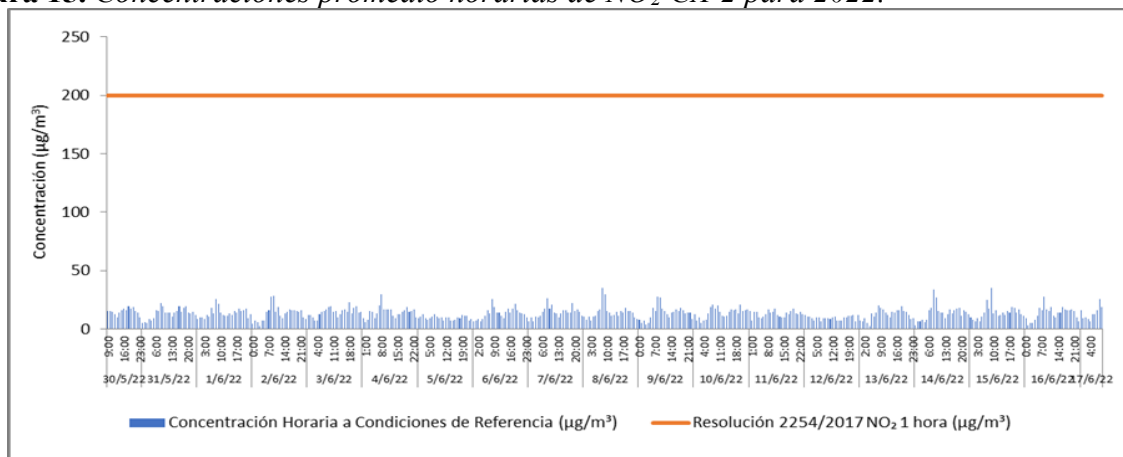
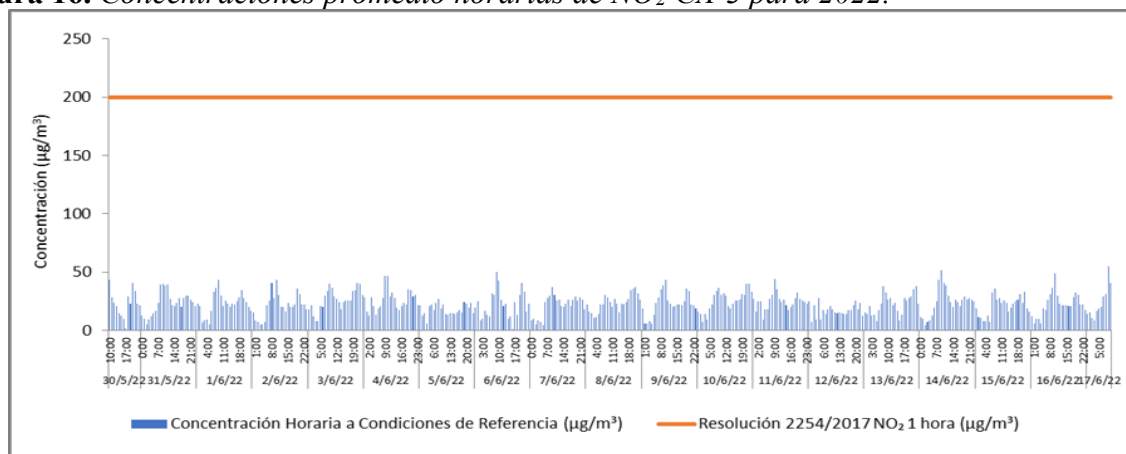


Figura 16. Concentraciones promedio horarias de NO_2 CA-3 para 2022.

De la Figura 14 a la Figura 16 se presentan de manera gráfica las concentraciones de NO_2 para el año 2022 en comparación con el límite normativo horario de $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Como se muestra en la Tabla 12, la concentración más alta se registró en la estación CA-3 con un valor de $54.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 17 de junio, mientras que la concentración más baja se midió en la estación CA-2 con $1.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 2 y 13 de junio. La estación CA-1 registró un valor máximo de $34.03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 11 de junio y un mínimo de $2.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 2 y 13 de junio. En el caso de CA-2, el máximo fue de $35.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 15 de junio. En general, las concentraciones de NO_2 en 2022 mostraron una variabilidad moderada con picos registrados principalmente en horas de la mañana (06:00-10:00) y en la tarde-noche (14:00-22:00), lo cual es característico de fuentes vehiculares. En contraste, los niveles más bajos se presentaron en la madrugada (00:00-04:00), cuando la actividad vehicular y otras fuentes de emisión son reducidas.

En la Tabla 13 se registran las concentraciones máximas y mínimas horarias de NO_2 para el año 2023 obtenidas durante el periodo de medición en las tres estaciones evaluadas.

Tabla 12. Concentraciones máximas horarias - NO_2 para 2023

Concentración Horaria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Estación CA-1	Estación CA-2	Estación CA-3	Norma Horaria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Máxima	75.45	34.78	66.74	200
Mínima	0.80	1.20	2.60	200

De la Figura 17 a la Figura 19 se presentan de manera gráfica las concentraciones de NO_2 para el año 2023 en comparación con el límite normativo horario. Como se muestra en la Tabla 13, la concentración más alta se registró en la estación CA-1 con un valor de $75.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 16 de junio, mientras que la concentración más baja se midió también en la estación CA-1 con $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 30 de mayo. En la estación CA-2, la concentración máxima alcanzó un valor de $34.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 11 de junio y el mínimo fue de $1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 2 de junio. En CA-3, el máximo fue de $66.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 13 de junio y el mínimo de $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 10 de junio.

Al igual que en 2022, las concentraciones más altas en 2023 se observaron en horas de la mañana y la tarde, mientras que los valores más bajos se registraron en la madrugada. Sin embargo, en comparación con 2022, los valores máximos aumentaron significativamente en las estaciones CA-1 y CA-3, mientras que en CA-2 los cambios fueron menos pronunciados.

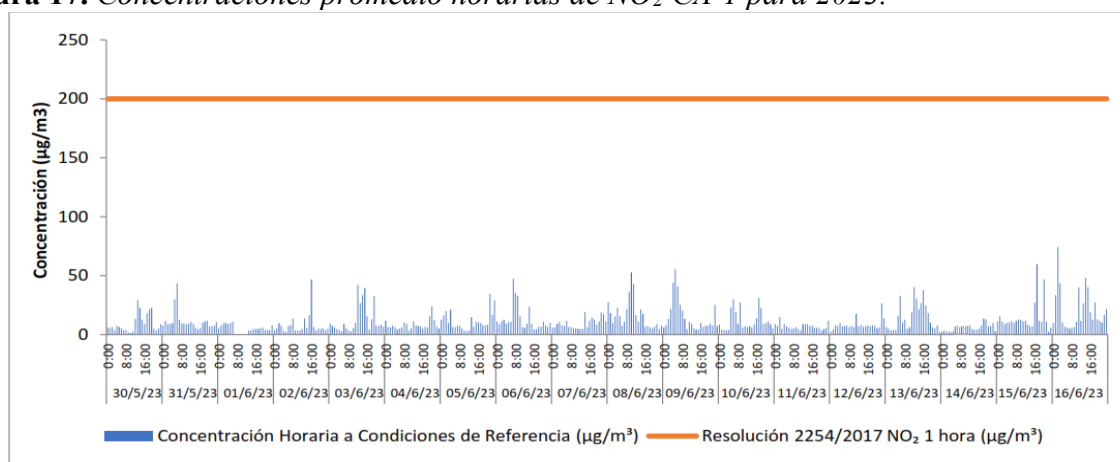
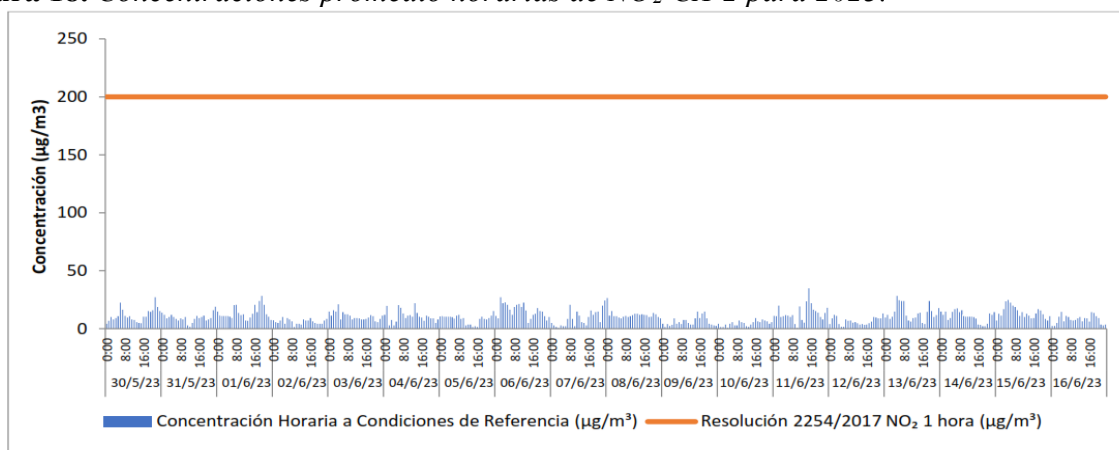
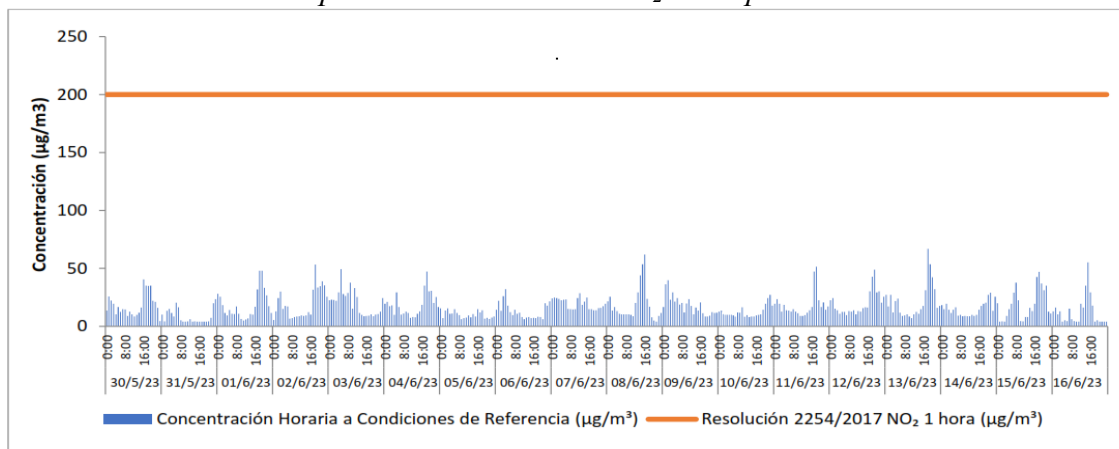
Figura 17. Concentraciones promedio horarias de NO_2 CA-1 para 2023.

Figura 18. Concentraciones promedio horarias de NO₂ CA-2 para 2023.**Figura 19.** Concentraciones promedio horarias de NO₂ CA-3 para 2023.

El análisis comparativo entre ambos años muestra un incremento en las concentraciones de NO₂ en 2023. En 2022, los valores máximos oscilaron entre 34.03 µg/m³ (CA-1) y 54.06 µg/m³ (CA-3), mientras que en 2023 estos aumentaron hasta 75.45 µg/m³ (CA-1) y 66.74 µg/m³ (CA-3). En CA-2, las concentraciones máximas se mantuvieron estables con valores cercanos a 35 µg/m³ en ambos años.

La mayor variabilidad en 2023 sugiere un incremento en los eventos de alta concentración, posiblemente debido a un aumento en las fuentes de emisión. En particular, la

velocidad del viento fue menor en 2023 (0.50 m/s) en comparación con 2022 (0.86 m/s), lo que pudo haber favorecido su acumulación. Asimismo, una mayor estabilidad atmosférica y una reducción en la precipitación pudieron contribuir a la menor dispersión del contaminante.

4.5 Concentraciones de Dióxido de Azufre (SO₂)

Las mediciones horarias de SO₂ se realizaron utilizando un equipo automático (Analizador fluorescencia), empleado durante dieciocho (18) días continuos en cada una de las estaciones para comparar las concentraciones obtenidas con la norma horaria de 100 µg/m³ para dióxido de azufre, establecida por la Resolución 2254 de 2017.

En la Tabla 14 se registran las concentraciones máximas y mínimas horarias de SO₂ para el año 2022 obtenidas durante el periodo de medición en las tres estaciones evaluadas.

Tabla 13. *Concentraciones máximas horarias - SO₂ para 2022*

<i>Concentración Horaria (µg/m³)</i>	<i>Estación CA-1</i>	<i>Estación CA-2</i>	<i>Estación CA-3</i>	<i>Norma Horaria (µg/m³)</i>
<i>Máxima</i>	15.20	19.15	17.62	100
<i>Mínima</i>	1.32	2.50	6.25	100

De la Figura 20 a la Figura 22 se presentan de manera gráfica las concentraciones de SO₂ para el año 2022 en comparación con el límite normativo horario. La concentración más alta se registró en la estación CA-2 con una concentración de 19.15 µg/m³ el 2 y 6 de junio, seguida por la estación CA-3 y CA-1 con un valor de 17.62 µg/m³ el 2 de junio y 15.20 µg/m³ el 17 de junio. Mientras que la concentración más baja se midió en la estación CA-1 con 1.32 µg/m³ el 6 de junio. En la estación CA-1, las concentraciones de SO₂ se mantuvieron en niveles bajos a lo largo del mes, con un promedio inferior al de las demás estaciones. Se observó una menor variabilidad diaria, lo que sugiere una influencia limitada de fuentes de emisión locales. En la

estación CA-3, se identificaron picos significativos, lo que sugiere la influencia de fuentes emisoras intermitentes y factores meteorológicos que favorecieron la acumulación del contaminante. El comportamiento horario de SO_2 en 2022 mostró fluctuaciones moderadas, con picos de concentración que ocurrieron principalmente en las horas de la mañana y la tarde-noche. Durante las horas del día, se observó una ligera reducción en las concentraciones, lo que podría indicar una mayor dispersión debido al incremento en la velocidad del viento y la mayor turbulencia atmosférica.

Figura 20. Concentraciones promedio horarias de SO_2 CA-1 para 2022.

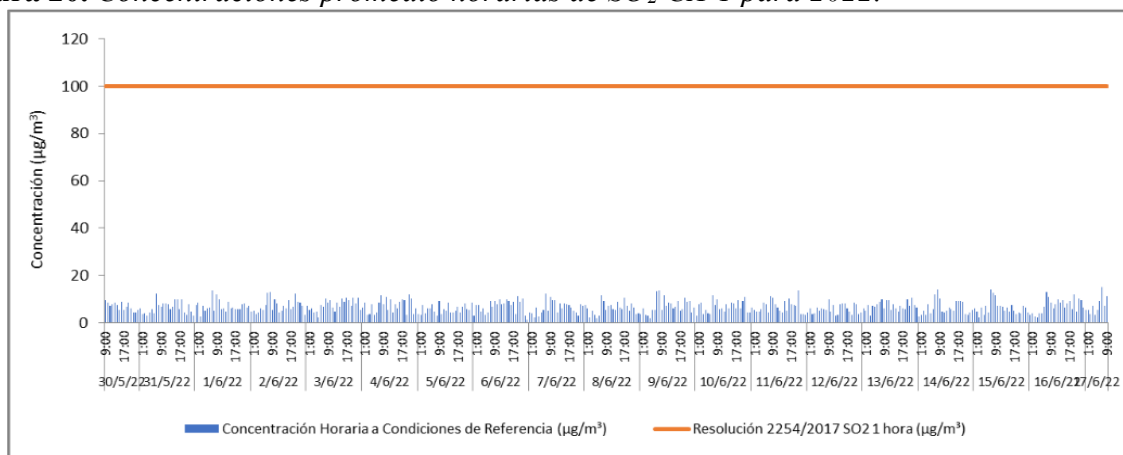


Figura 21. Concentraciones promedio horarias de SO_2 CA-2 para 2022.

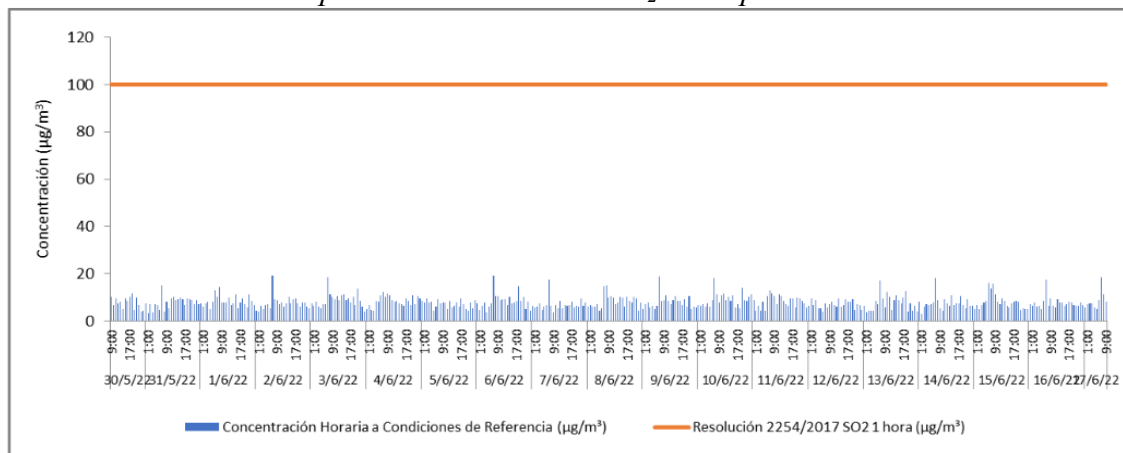
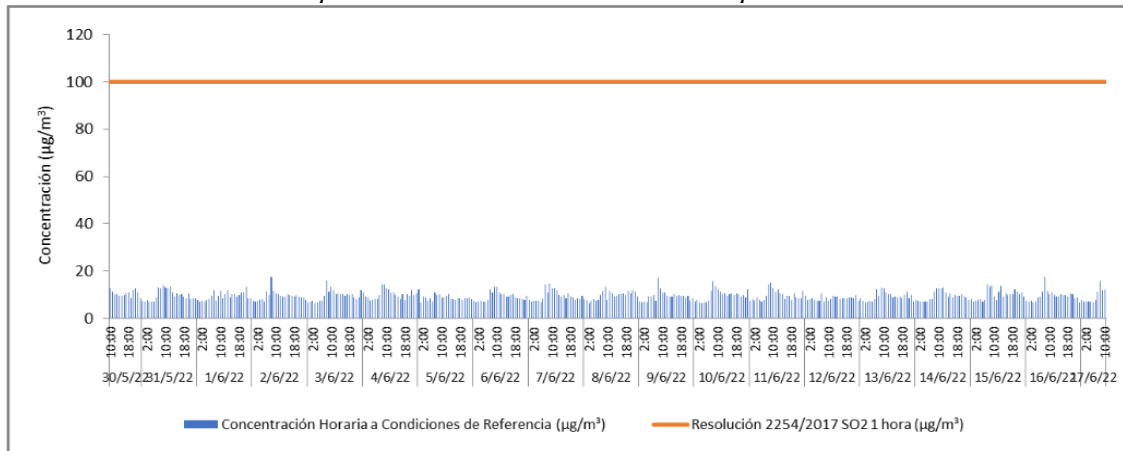


Figura 22. Concentraciones promedio horarias de SO_2 CA-3 para 2022.

En la Tabla 15 se registran las concentraciones máximas y mínimas horarias de SO_2 para el año 2023 obtenidas durante el periodo de medición en las tres estaciones evaluadas.

Tabla 14. Concentraciones máximas horarias - SO_2 para 2023

Concentración Horaria ($\mu g/m^3$)	Estación CA-1	Estación CA-2	Estación CA-3	Norma Horaria ($\mu g/m^3$)
Máxima	6.55	11.78	21.47	100
Mínima	2.22	0.61	2.44	100

De la Figura 23 a la Figura 25 se presentan de manera gráfica las concentraciones de SO_2 para el año 2023 en comparación con el límite normativo horario. La concentración más alta se registró en estación CA-3 con $21.47 \mu g/m^3$ el 5 de junio, mientras que la más baja se detectó en la estación CA-2 con $0.61 \mu g/m^3$ el 7 de junio. Se muestra una reducción general en la estación CA-1 y CA-2 en comparación con 2022, mientras que la estación CA-3 presentó un leve incremento en sus valores máximos.

En la estación CA-1, se observó una tendencia descendente en comparación con 2022, con concentraciones más homogéneas y sin picos significativos. Esto puede deberse a una reducción en las fuentes de emisión cercanas o a una mayor dispersión atmosférica. En la

estación CA-2, se presentó un comportamiento similar, con una menor variabilidad en los valores y reducciones en los máximos registrados. Sin embargo, en la estación CA-3, los picos de concentración fueron más pronunciados en comparación con el año anterior, lo que sugiere una posible influencia de nuevas fuentes de emisión o condiciones meteorológicas particulares que favorecieron la acumulación del contaminante en este sector.

Figura 23. Concentraciones promedio horarias de SO_2 CA-1 para 2023.

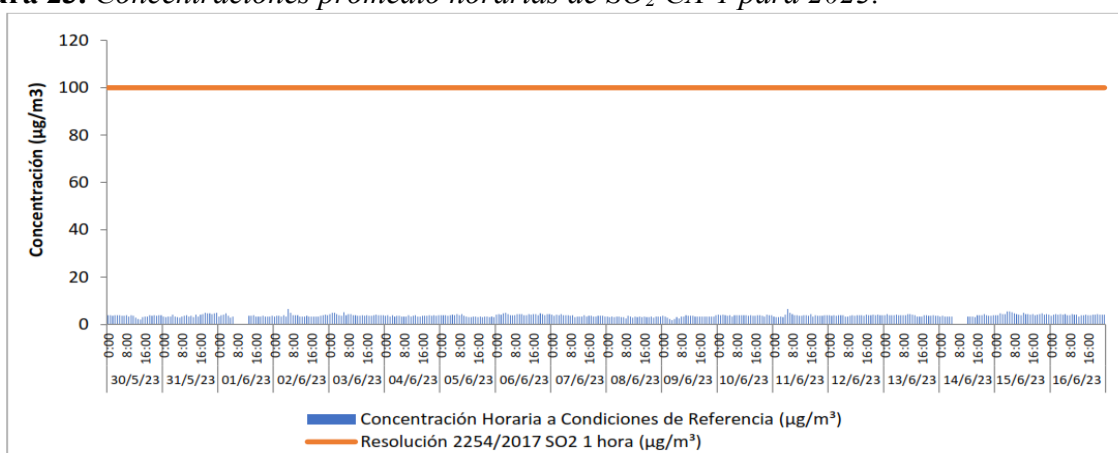


Figura 24. Concentraciones promedio horarias de SO_2 CA-2 para 2023.

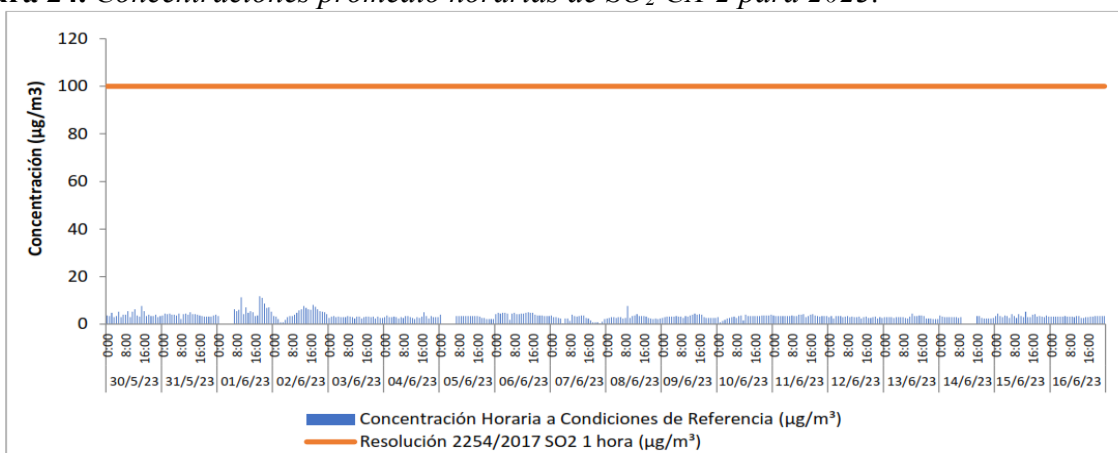
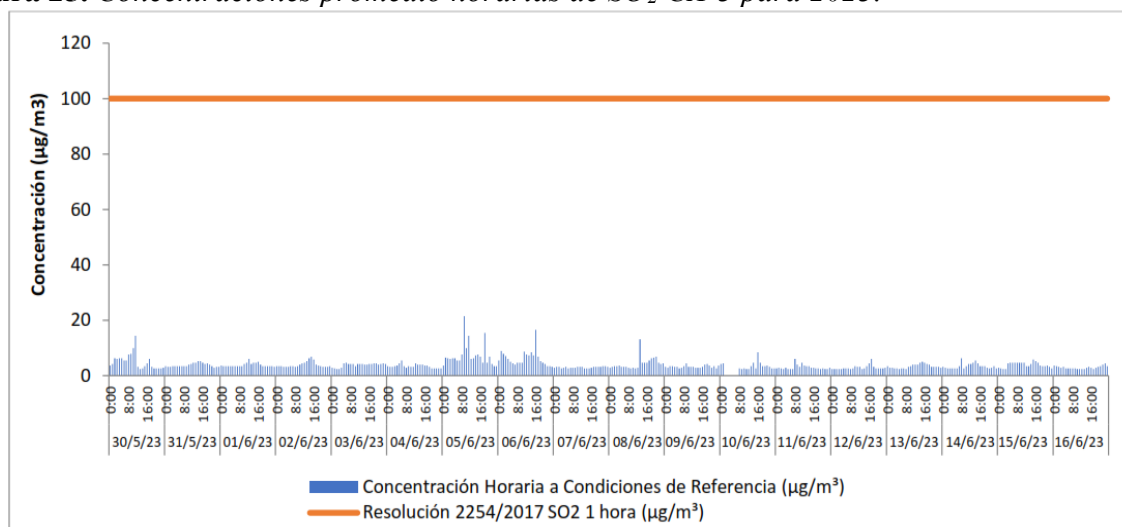


Figura 25. Concentraciones promedio horarias de SO_2 CA-3 para 2023.

El análisis comparativo de las concentraciones de SO_2 entre 2022 y 2023 revela una reducción significativa en CA-1 y CA-2, mientras que CA-3 muestra un aumento del 21.8 % en su concentración máxima respecto al año anterior. En ambas anualidades, las concentraciones se mantuvieron por debajo del umbral normativo, lo que indica la ausencia de episodios críticos de contaminación por SO_2 .

Similar a 2022 las concentraciones horarias más altas para 2023 se presentan en horas de la mañana y la noche, mientras que las más bajas se presentan a medianoche y en horas de la madrugada.

La reducción de concentraciones en CA-1 y CA-2 podría estar relacionada con mejoras en procesos de combustión de fuentes emisoras o con una disminución en la actividad de fuentes locales. Sin embargo, el aumento en CA-3 sugiere que en esta estación las condiciones locales favorecieron la acumulación del contaminante.

4.6 Concentraciones de Ozono (O₃)

El monitoreo de Ozono (O₃) se realizó utilizando un equipo automático de Ozono, empleado durante dieciocho (18) días continuos en cada una de las estaciones para comparar los resultados con el límite permisible para un periodo de exposición al contaminante de 8 horas (100 µg/m³), establecido en la Resolución 2254 de 2017.

En la Tabla 16 se registran las concentraciones octahorarias máximas y mínimas de ozono para el año 2022 obtenidas durante el periodo de medición en las tres estaciones evaluadas.

Tabla 15. Concentraciones máximas horarias – O₃ para 2022

<i>Concentración Horaria (µg/m³)</i>	<i>Estación CA-1</i>	<i>Estación CA-2</i>	<i>Estación CA-3</i>	<i>Norma Horaria (µg/m³)</i>
<i>Máxima</i>	49.84	54.50	53.25	100
<i>Mínima</i>	6.80	7.20	7.91	100

De la Figura 26 a la Figura 28 se presentan de manera gráfica las concentraciones de ozono en un promedio octahorario para el año 2022 en comparación con el límite normativo horario. La mayor concentración se observó en la estación CA-2, con un valor de 54.50 µg/m³, registrado el 4 de junio. En contraste, la menor concentración máxima se presentó en la estación CA-1, con 49.84 µg/m³, también medido el 4 de junio. Mientras que la concentración mínima osciló entre 6.8 µg/m³ en la estación CA-1 y 7.91 µg/m³ en la estación CA-3, registradas el 3 de junio. Los valores más altos de ozono se obtuvieron en horas de la tarde, con picos generalmente alrededor de las 16:00 horas, lo cual está asociado a la fotólisis de NO₂ y la formación de ozono en presencia de radiación solar intensa. Los niveles más bajos se observaron en la medianoche y en horas de la madrugada debido a la ausencia de radiación solar.

Se observó que las concentraciones fueron similares en las estaciones de monitoreo y que ninguno de los valores reportados superó el nivel máximo permisible de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido para el ozono en la Resolución 2254 de 2017.

Figura 26. Concentraciones promedio horarias de O_3 CA-1 para 2022.

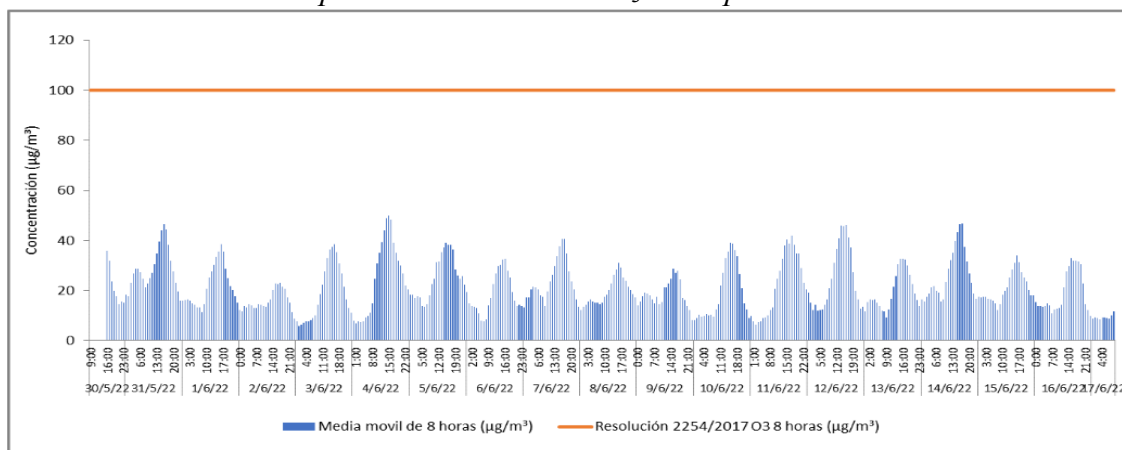


Figura 27. Concentraciones horarias de O_3 CA-2 para 2022.

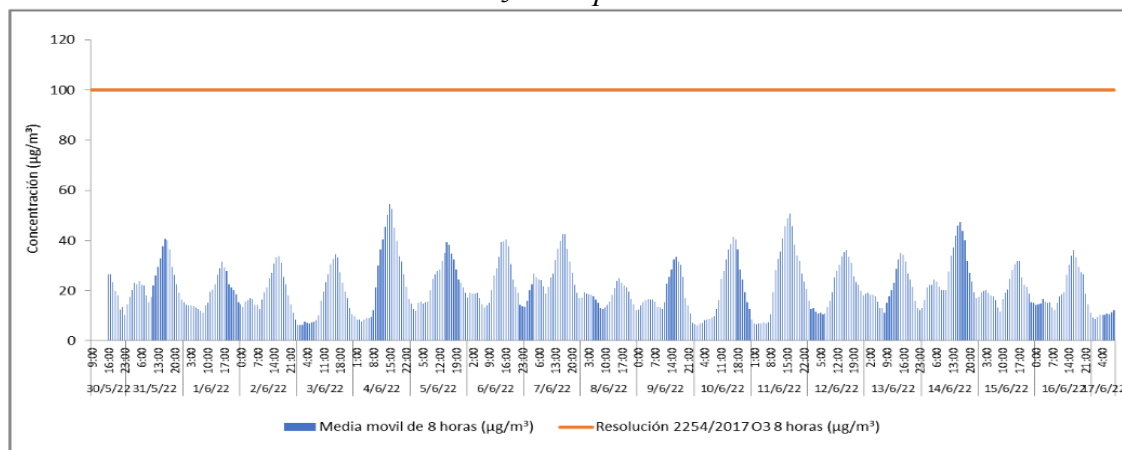
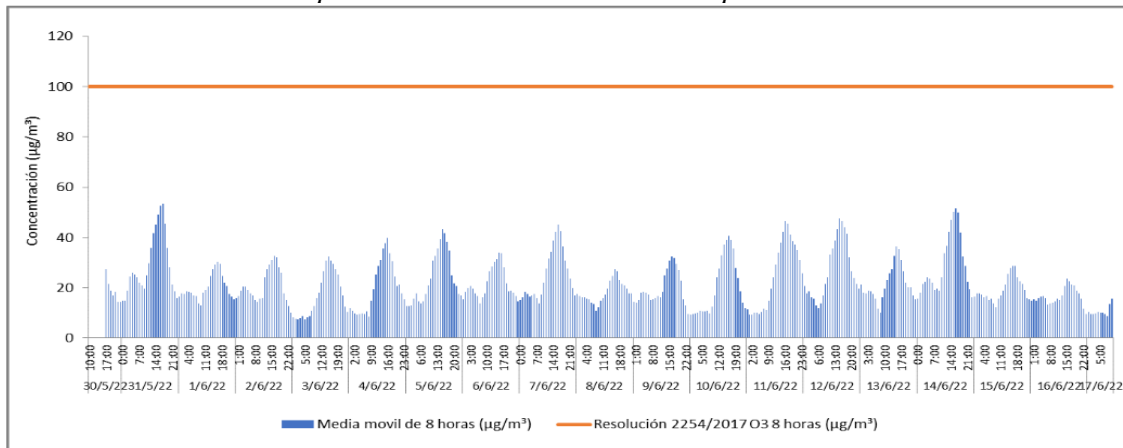


Figura 28. Concentraciones promedio horarias de O_3 CA-3 para 2022.

En la Tabla 17 se registran las concentraciones octahorarias máximas y mínimas de ozono para el año 2023 obtenidas durante el periodo de medición en las tres estaciones evaluadas.

Tabla 16. Concentraciones máximas horarias – O_3 para 2023

Concentración Horaria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Estación CA-1	Estación CA-2	Estación CA-3	Norma Horaria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Máxima	94.38	89.67	81.12	100
Mínima	12.30	2.50	2.55	100

De la Figura 29 a la Figura 31 se presentan de manera gráfica las concentraciones de ozono para el año 2023 en comparación con el límite normativo horario. Durante este año las concentraciones de O_3 presentaron un aumento significativo en comparación con 2022. La concentración más alta se registró en CA-1 con $94.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 31 de mayo, seguida de CA-2 con $89.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 11 de junio y CA-3 con $81.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 13 de junio. Los valores mínimos variaron entre $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CA-2 (15 de junio) y $12.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CA-1 (10 de junio). A pesar del incremento en las concentraciones de ozono en 2023, ninguna de las estaciones superó el límite normativo establecido en la Resolución 2254 de 2017. Al igual que en 2022, los valores

máximos de O_3 se presentaron en horas de la tarde, con picos hacia las 16:00 horas. Durante la noche y madrugada, las concentraciones disminuyeron considerablemente debido a la reducción en la formación de ozono y su eliminación por reacciones químicas con NO y otras especies reactivas.

Figura 29. Concentraciones promedio horarias de O_3 CA-1 para 2023.

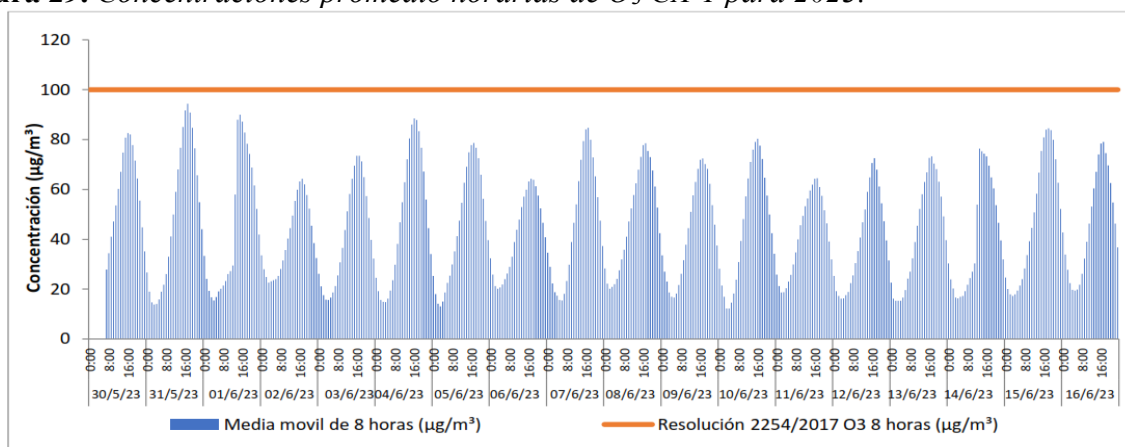


Figura 30. Concentraciones promedio horarias de O_3 CA-2 para 2023.

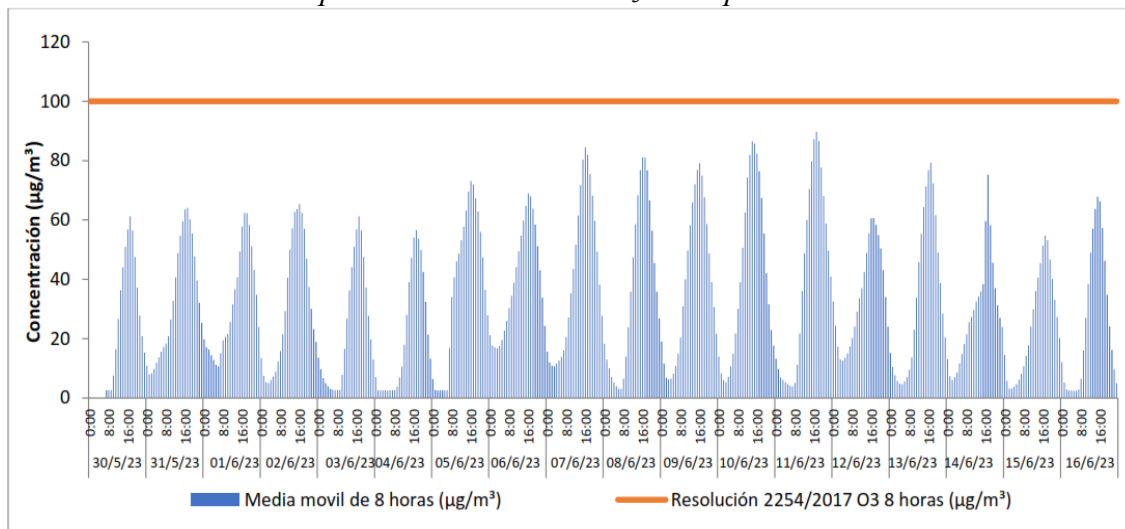
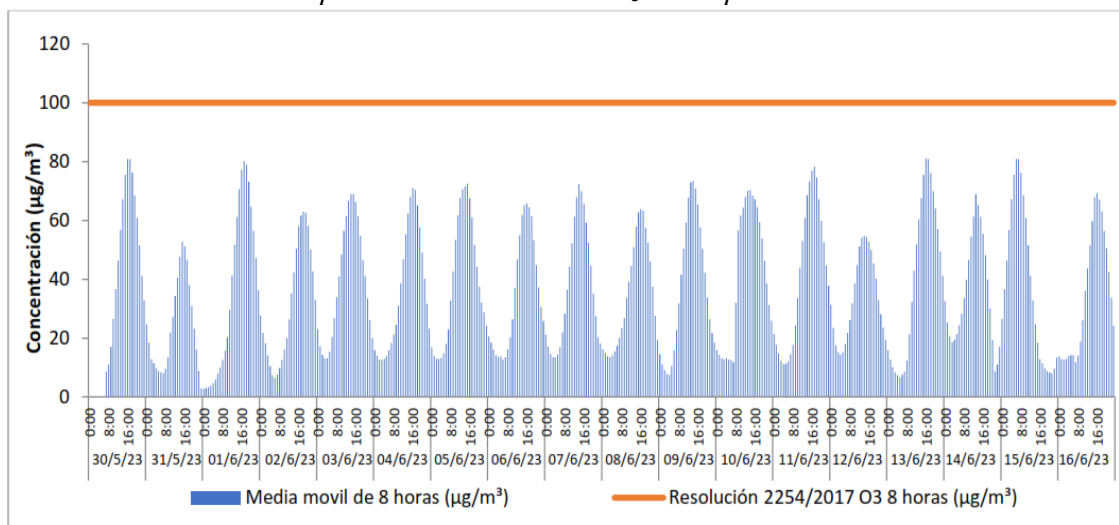


Figura 31. Concentraciones promedio horarias de O_3 CA-3 para 2023.

El análisis comparativo muestra un incremento en las concentraciones máximas de la media móvil octahoraria de ozono en 2023 en todas las estaciones, con la estación CA-1 ($94.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y la estación CA-2 ($89.6738 \mu\text{g}/\text{m}^3$) alcanzando valores cercanos al límite normativo de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El aumento en las concentraciones sugiere una posible mayor emisión de precursores como NO_2 y COV en 2023, lo que podría estar asociado con un incremento en la actividad vehicular, industrial y en las fuentes de emisión cercanas.

En ambos años, las concentraciones de ozono exhiben un patrón ondulatorio diario, con picos en las horas de mayor radiación solar, generalmente alrededor de las 16:00 horas. Las concentraciones más bajas se registraron en la madrugada, lo que es consistente con la dinámica fotoquímica del ozono. La reducción en la velocidad del viento en 2023 pudo haber limitado la dispersión del ozono, favoreciendo su acumulación en ciertas zonas. Asimismo, una mayor radiación solar puede haber intensificado las reacciones fotoquímicas responsables de su formación. La menor cantidad de precipitaciones en 2023 pudo haber limitado la eliminación de precursores del ozono favoreciendo su formación y acumulación en la atmósfera.

Aunque los valores no lo exceden, el incremento en 2023 podría ser una señal de alerta para evaluar posibles cambios en las fuentes de precursores o en las condiciones meteorológicas que favorecen su formación.

5. Rosas de Contaminación

En este apartado se presenta el análisis de las rosas de contaminación obtenidas a partir de los datos registrados por los equipos automáticos para los contaminantes atmosféricos NO_2 , SO_2 y O_3 en los distintos puntos de monitoreo durante el periodo de estudio entre el 30 de mayo y 29 de junio de los años 2022 y 2023. Para el procesamiento y representación de estos datos se empleó el software R Project for Statistical Computing, permitiendo generar gráficos avanzados de evolución temporal y diagramas de dispersión. Las rosas de contaminación obtenidas se presentan de manera georreferenciada con el fin de proporcionar una visión integral del patrón de dispersión de los contaminantes en cada punto de medición dentro del área de estudio.

Figura 32. Rosas de contaminación – NO_2 2022.

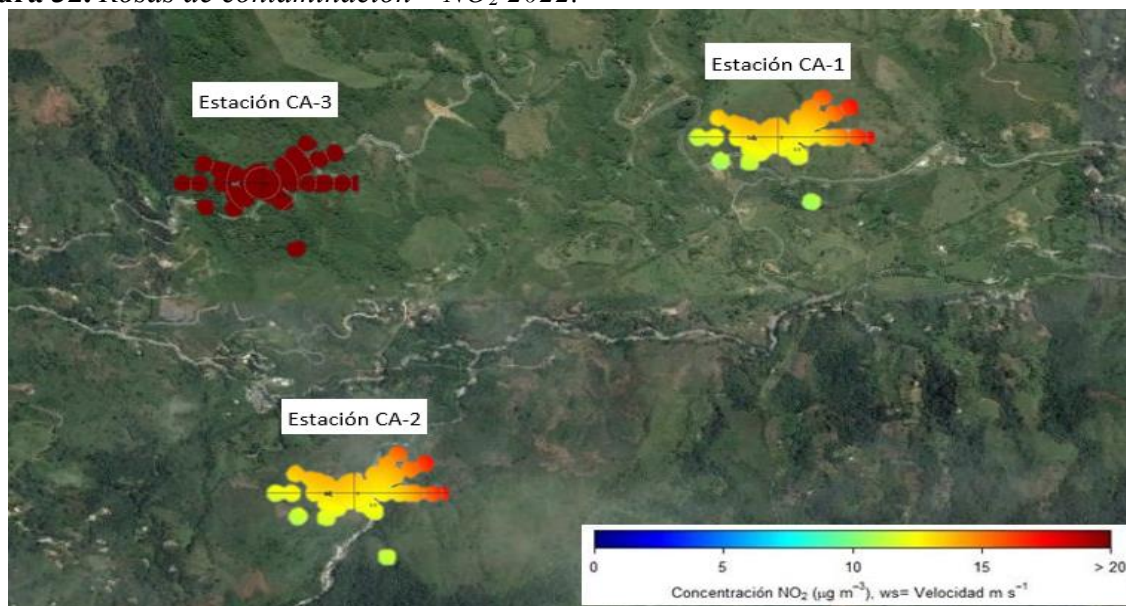
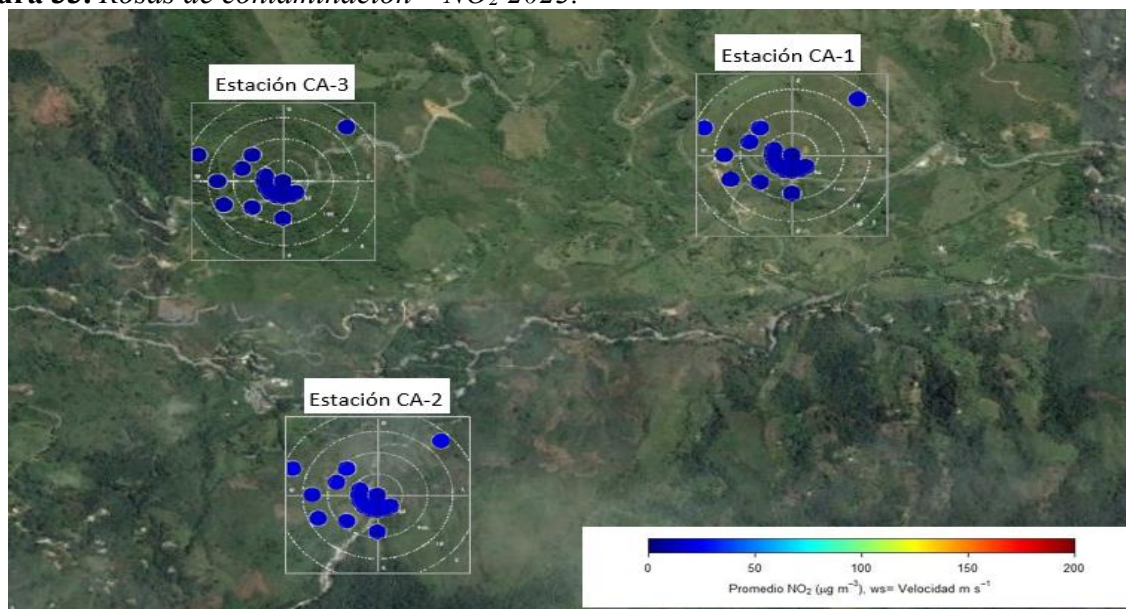
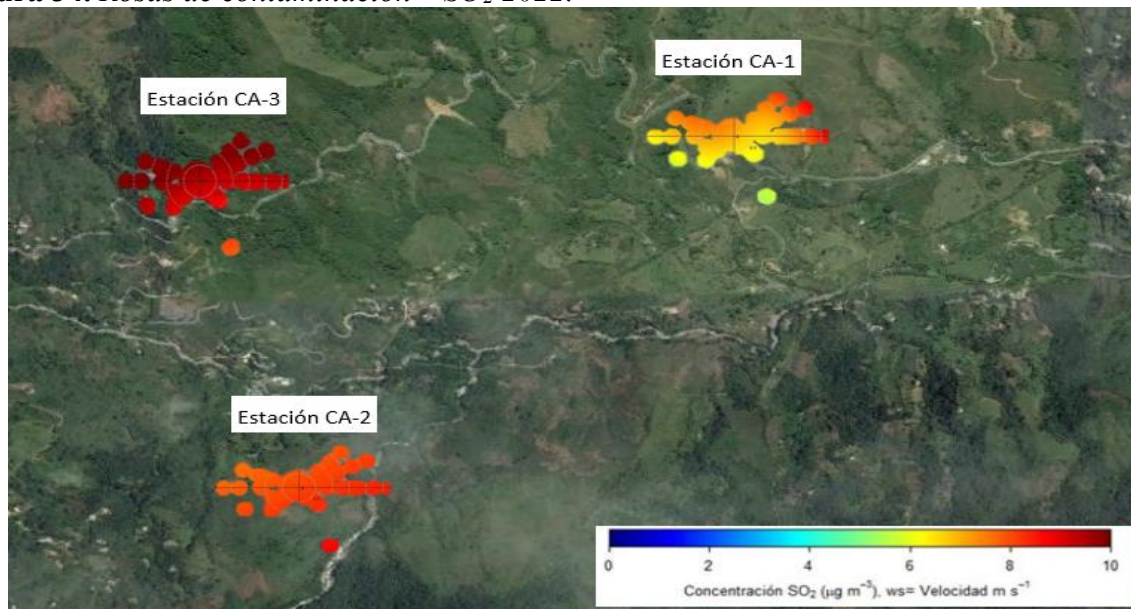
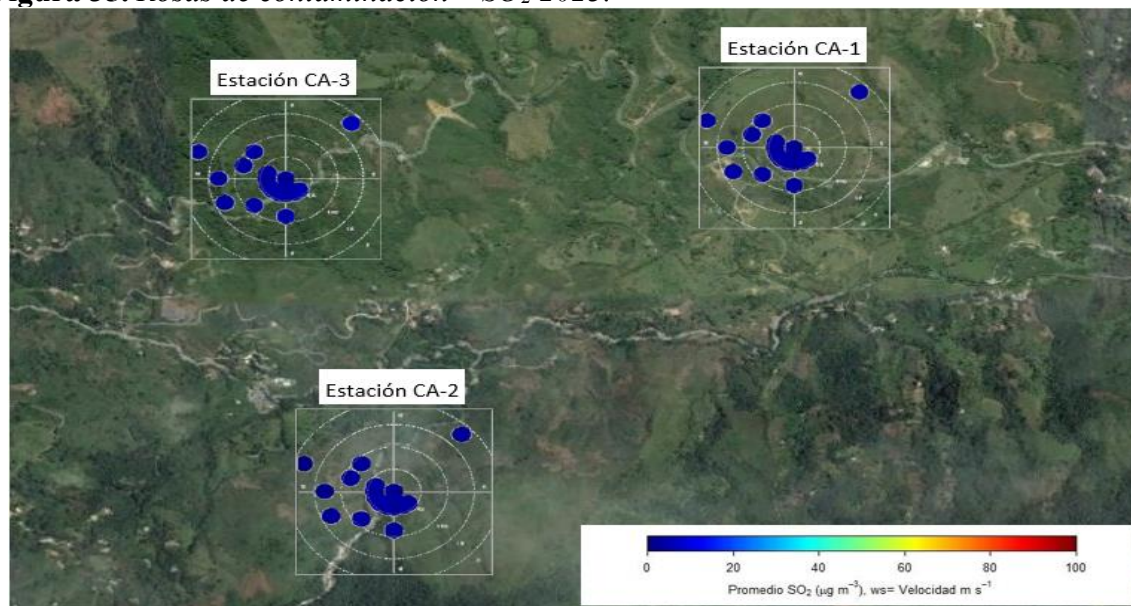


Figura 33. *Rosas de contaminación – NO₂ 2023.*

En la figura 32 y figura 33 se presentan las rosas de contaminación para NO₂ durante el año 2022 y 2023. Para 2022 se observa que las concentraciones generales registradas superan los 20 µg/m³ en la estación CA-3, la cual alcanzó un valor máximo de 54.66 µg/m³. Mientras que la concentración de la estación CA-2 y CA-3 se encuentran dentro del rango establecido, teniendo un comportamiento similar entre ellas. La distribución del contaminante en las estaciones estuvo influenciada por vientos provenientes principalmente del Noreste (NE), Este (E) y Oeste-Noroeste (WNW). Para 2023 se observan concentraciones inferiores a 50 µg/m³ en las estaciones, exceptuando las concentraciones máximas registradas en la estación CA-1 con 75.45 µg/m³ y CA-3 con 66.74 µg/m³. La distribución de este contaminante se vio influenciada principalmente por vientos provenientes del sur-suroeste (SSW), suroeste (SW) y sureste (SE).

Figura 34. Rosas de contaminación – SO_2 2022.**Figura 35.** Rosas de contaminación – SO_2 2023.

En la figura 34 y figura 35 se presentan las rosas de contaminación para SO_2 durante el año 2022 y 2023. Para 2022 se observa que las concentraciones generales de la estación CA-3 superan levemente los $10\ \mu g/m^3$, mientras que las concentraciones de la estación CA-2 y CA-3

se mantuvieron en niveles dentro de este rango, a excepción de los valores máximos de cada estación. La distribución del contaminante en las estaciones estuvo influenciada por vientos provenientes del noreste (NE), este (E) y oeste-noreste (WNW), principalmente en el primer y cuarto cuadrante. Para 2023 se observan concentraciones inferiores a $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las estaciones, siendo influenciadas principalmente por vientos provenientes del Sur-suroeste (SSW), Suroeste (SW) y Sureste (SE), principalmente entre el segundo y tercer cuadrante.

Figura 36. Rosas de contaminación – O_3 2022.

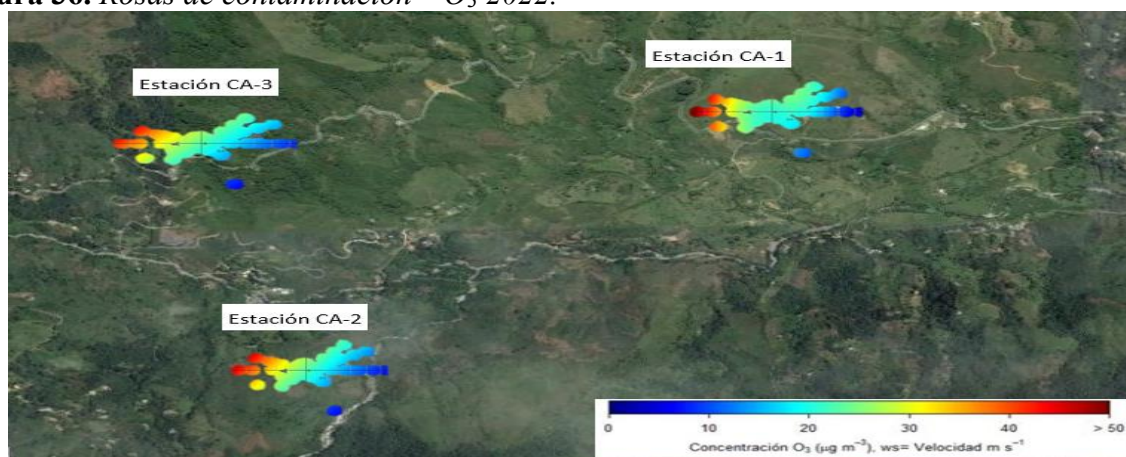
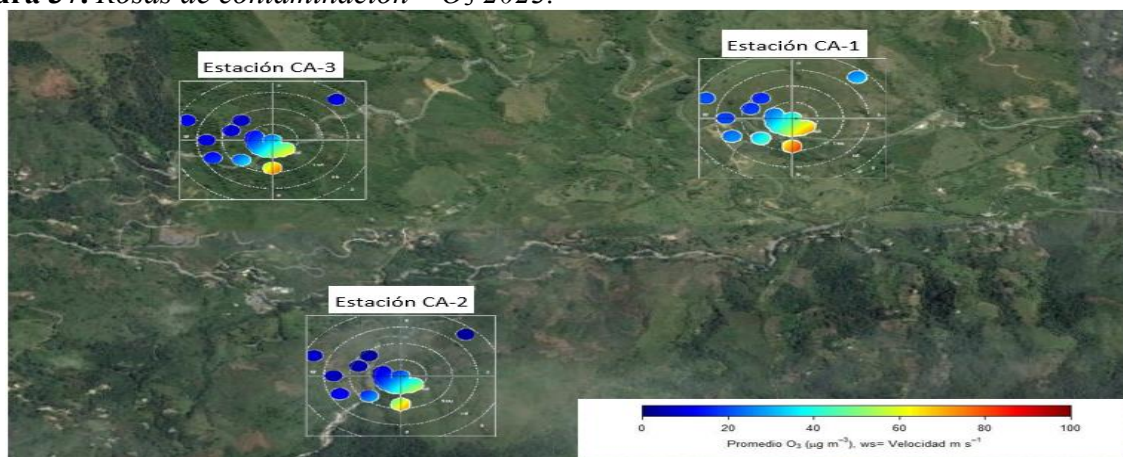


Figura 37. Rosas de contaminación – O_3 2023.



En la figura 36 y figura 37 se presentan las rosas de contaminación para ozono durante el año 2022 y 2023. Para 2022 se observa que las concentraciones generales de la estación CA-1 superan levemente los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que las concentraciones de la estación CA-2 y CA-3 se mantuvieron en niveles dentro de este rango, a excepción de los valores máximos de cada estación. La distribución del contaminante en las estaciones estuvo influenciada por vientos provenientes del oeste-noreste (WNW), oeste-suroeste (WSW) y oeste (W), principalmente en el tercer y cuarto cuadrante. Para 2023 se observan concentraciones inferiores a $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las estaciones, exceptuando los valores máximos de cada estación, siendo influenciadas principalmente por vientos provenientes del sur-suroeste (SSW), sur (S) y sureste (SE), principalmente entre el segundo y tercer cuadrante.

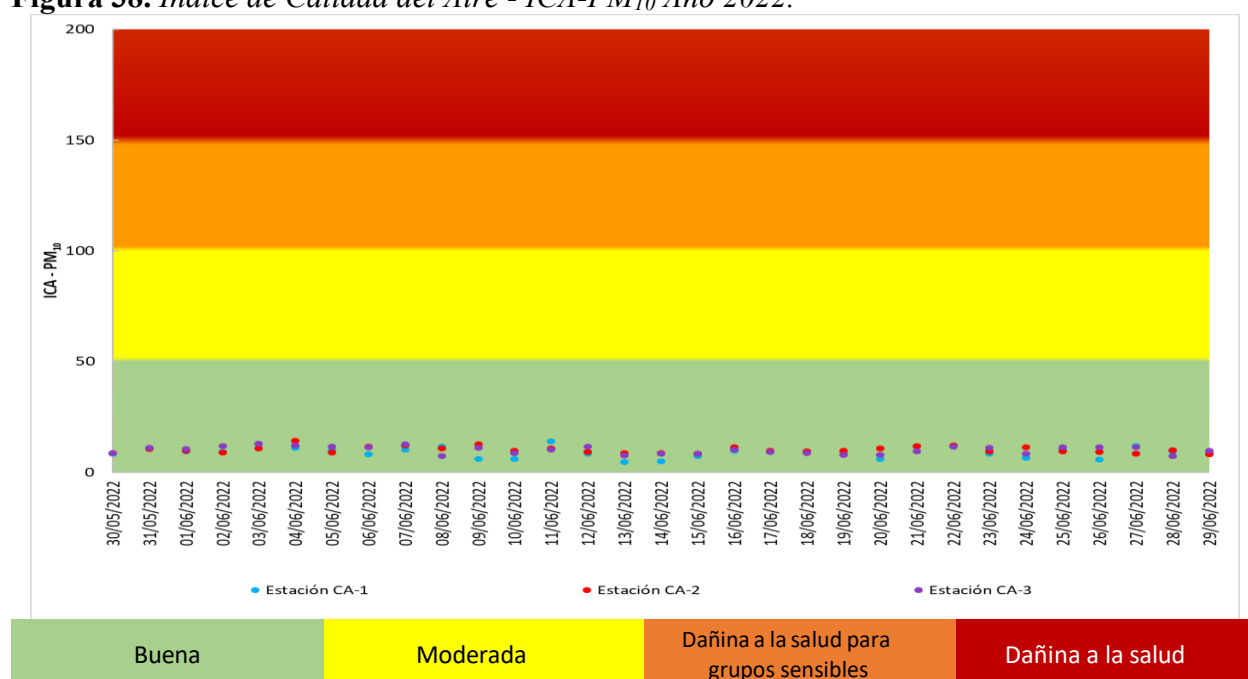
6. Índice de Calidad del Aire (ICA)

El Índice de Calidad del Aire (ICA) es una herramienta esencial para interpretar los niveles de concentración de contaminantes atmosféricos registrados, considerando además los tiempos de exposición. Este índice permite evaluar el riesgo potencial que la calidad del aire puede representar para la salud de la población y sirve como un instrumento de pronóstico para anticipar condiciones ambientales adversas. En Colombia, el uso del ICA está normatizado por el artículo 18 de la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). Este marco regulatorio vincula el ICA a los efectos generales sobre la salud, estableciendo parámetros y recomendaciones para disminuir la exposición a concentraciones elevadas de contaminantes.

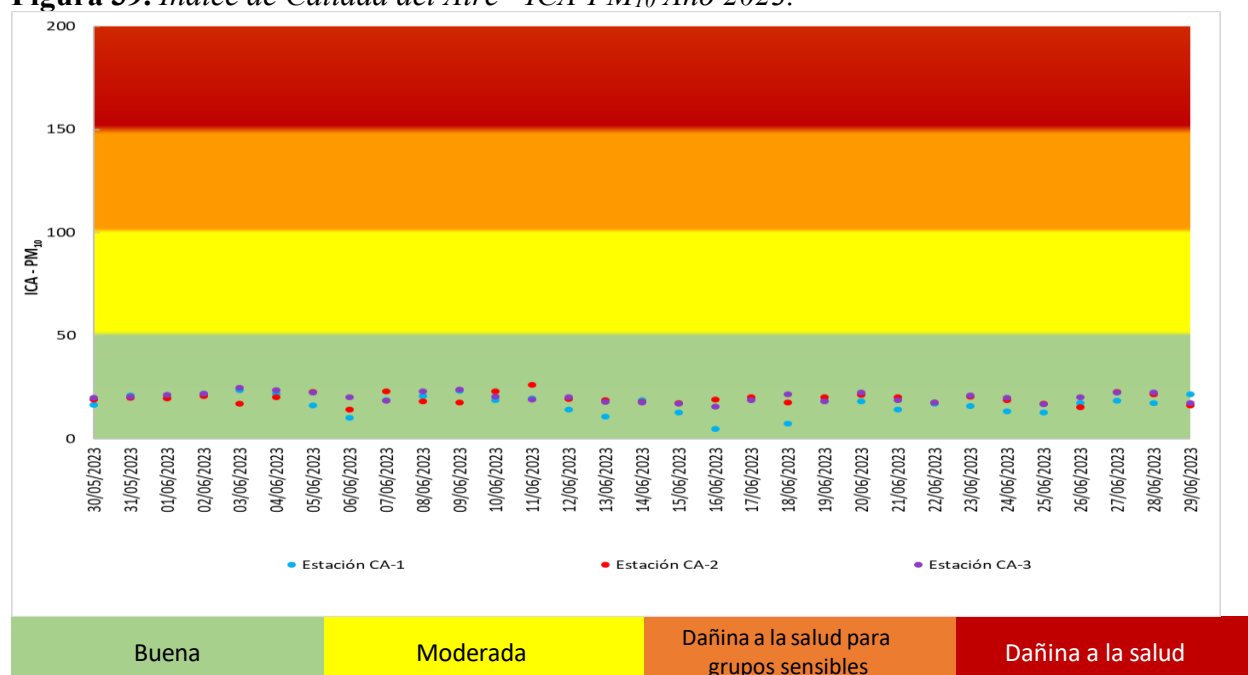
De la Figura 43 a la Figura 52 se muestran los valores del Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , SO_2 y O_3 registrados en las estaciones CA-1, CA-2 y CA-3 durante el período del 30 de mayo al 29 de junio en los años 2022 y 2023, respectivamente.

6.1 Índice de calidad del aire para PM_{10}

Figura 38. Índice de Calidad del Aire - ICA- PM_{10} Año 2022.



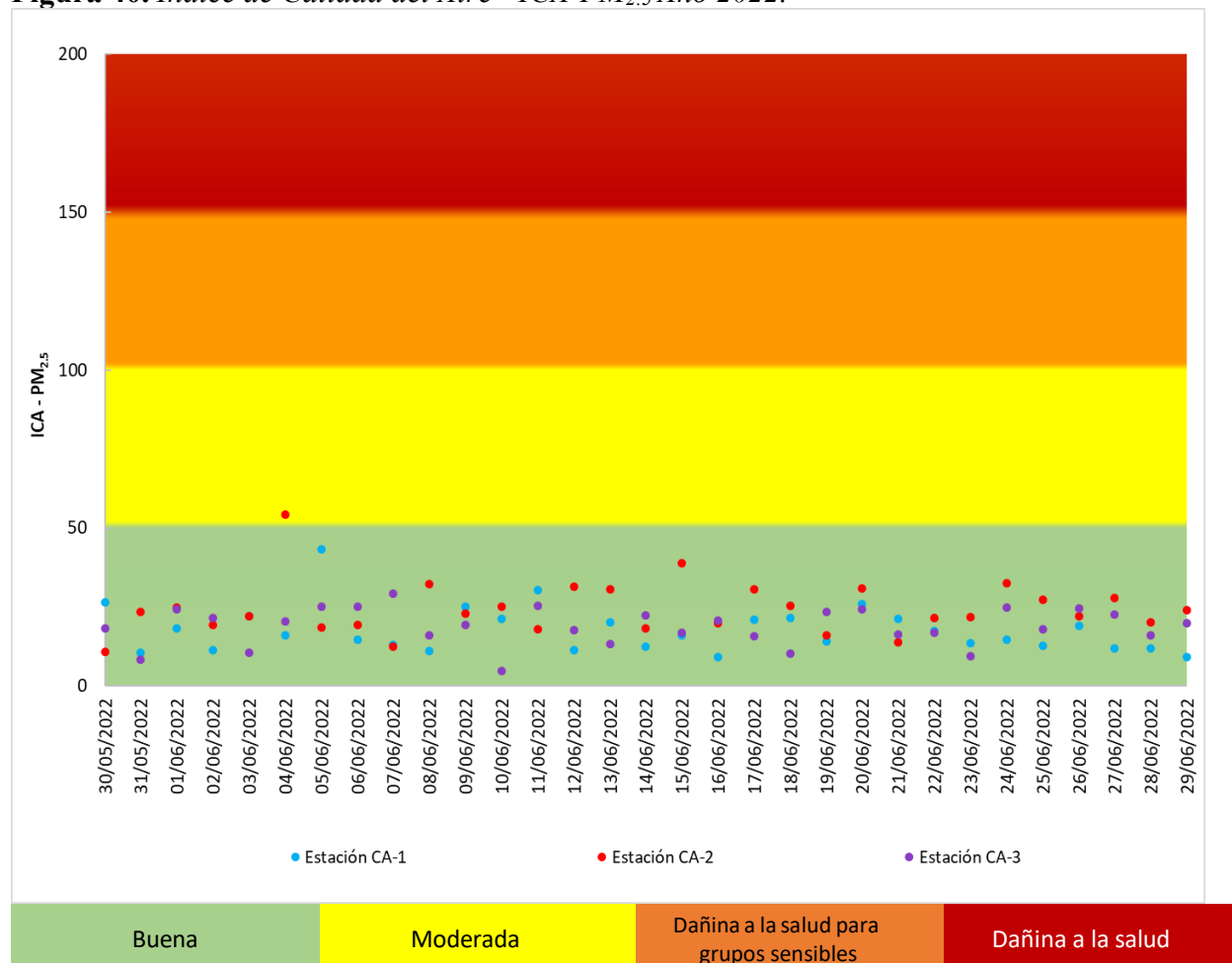
En 2022, según la Figura 38, las estaciones de monitoreo registraron diariamente valores del Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{10} dentro de la categoría "Buena" (color verde). Esto indica que la concentración de material particulado PM_{10} en la atmósfera se mantuvo en niveles bajos, sin representar un riesgo significativo para la salud de la población en la zona de estudio. La estabilidad de estos valores sugiere condiciones favorables en términos de calidad del aire, influenciadas por factores meteorológicos como la dispersión eficiente de contaminantes.

Figura 39. *Índice de Calidad del Aire - ICA-PM₁₀ Año 2023.*

En 2023, como se muestra en la Figura 39, se mantiene la tendencia observada en 2022, con valores del ICA para PM₁₀ dentro de la categoría "Buena" durante todo el período de estudio. Sin embargo, se evidencia un incremento generalizado en los valores del ICA en las tres estaciones, los valores registrados fueron notablemente más altos en comparación con 2022. Esta diferencia, puede estar relacionada con cambios en la meteorología, como variaciones en la velocidad del viento, la humedad y la frecuencia de precipitaciones, que influyen directamente en la dispersión y deposición del material particulado. Además, factores antropogénicos, como posibles incrementos en la actividad vehicular o en fuentes industriales cercanas, también podrían haber contribuido a estos ligeros aumentos. A pesar de estas diferencias, en ambos años los niveles de PM₁₀ permanecen dentro de rangos considerados seguros para la salud humana, lo que indica que la calidad del aire en la zona de estudio se mantiene estable y sin impactos adversos significativos en términos de material particulado.

6.2 Índice de calidad del aire para PM_{2.5}

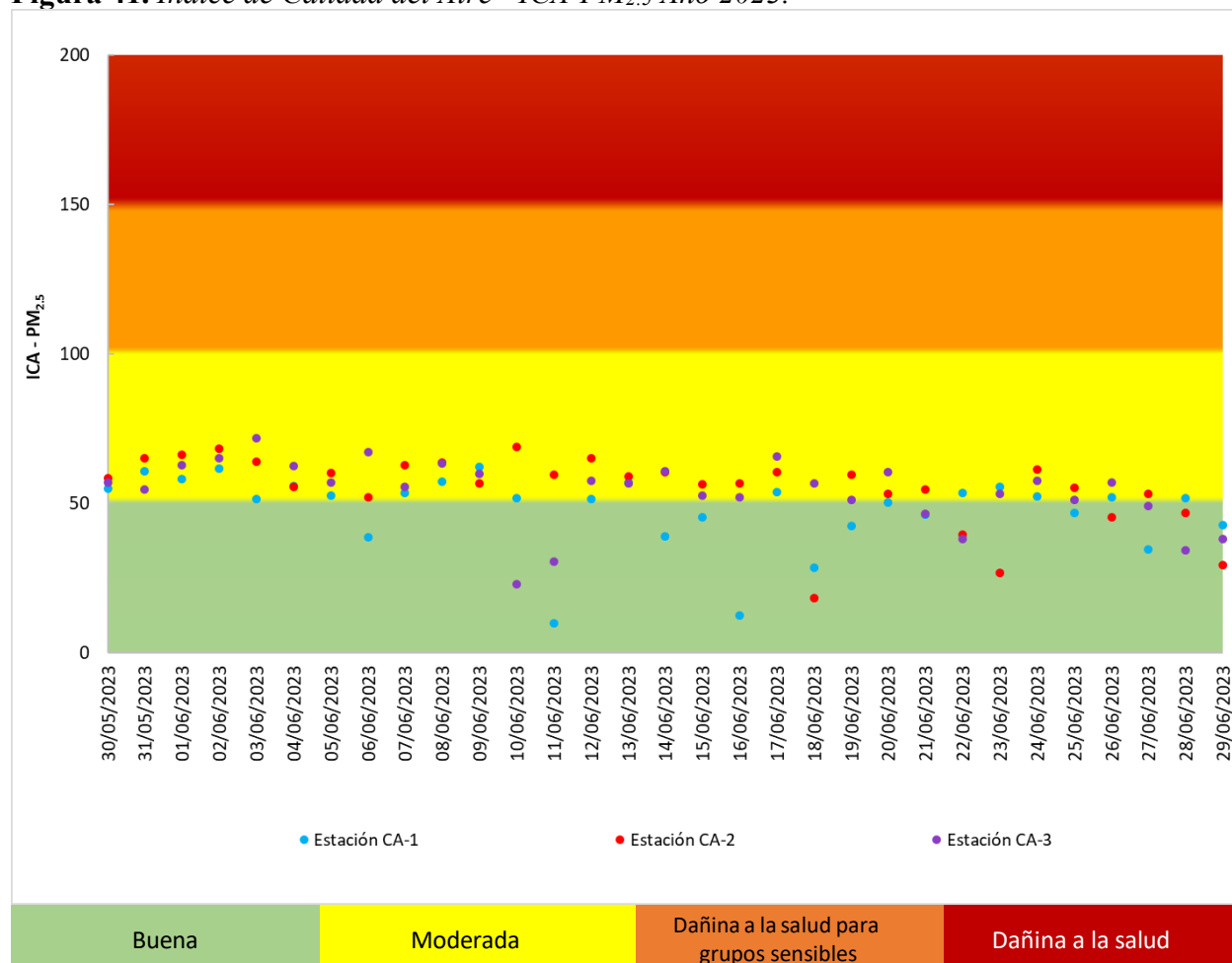
Figura 40. Índice de Calidad del Aire - ICA-PM_{2.5} Año 2022.



Según la Figura 40, en 2022 las estaciones de monitoreo registraron valores del Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM_{2.5} dentro de la categoría "Buena" (color verde) en la mayoría de los días del período analizado. Esto indica que la concentración de material particulado PM_{2.5} en la atmósfera se mantuvo en niveles bajos, sin representar un riesgo significativo para la salud de la población en la zona de estudio. No obstante, el 4 de junio de 2022, la estación CA-2 reportó un incremento en los niveles de PM_{2.5}, alcanzando la categoría "Moderada" (banda de color amarillo). Este comportamiento podría estar asociado a la influencia de diversas fuentes de

emisión, tales como suelos expuestos sin vegetación, tráfico vehicular en vías sin pavimentar y actividades industriales cercanas.

Figura 41. Índice de Calidad del Aire - ICA-PM_{2.5} Año 2023.

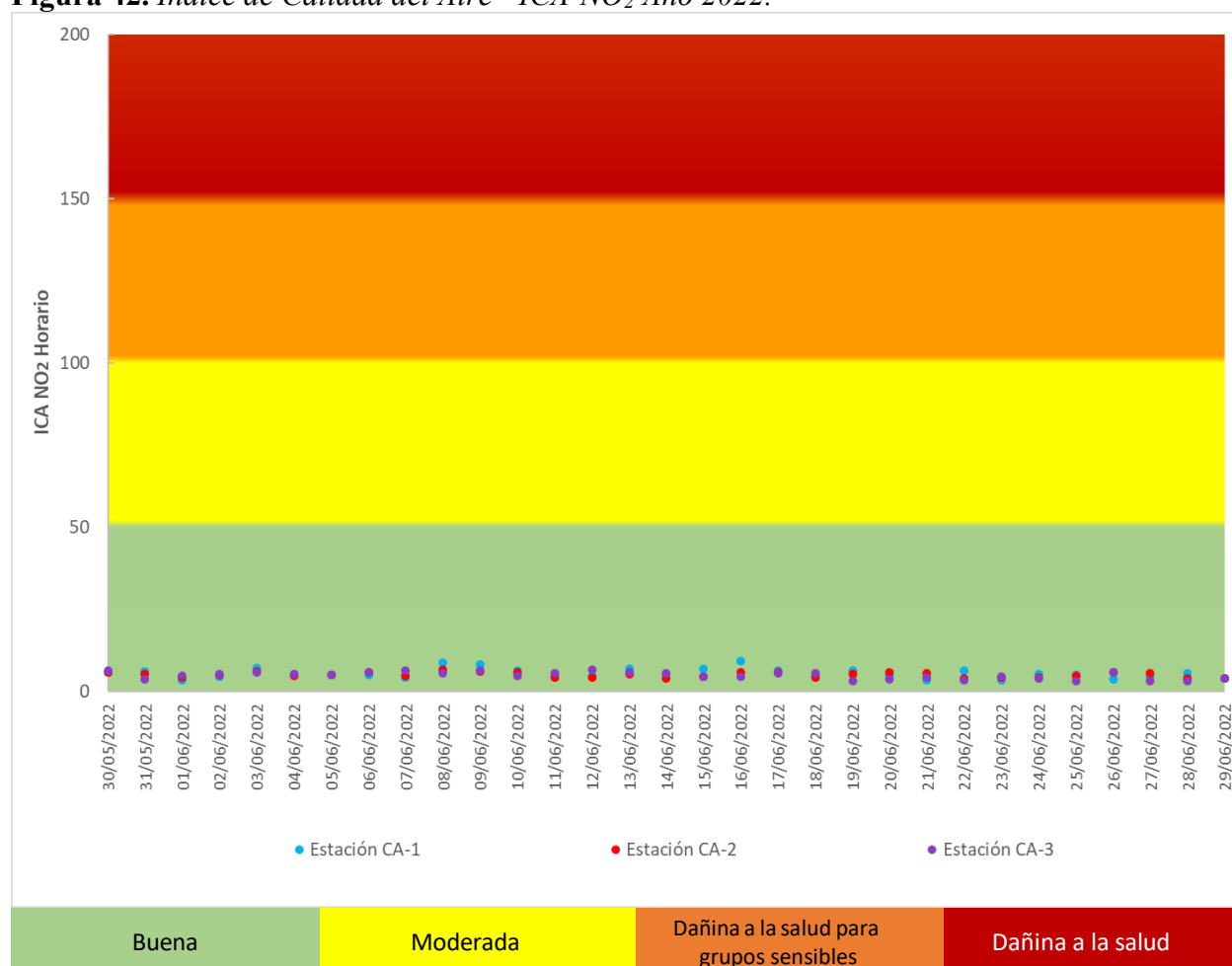


Por otro lado, en 2023 se observa un aumento generalizado en los valores de ICA para PM_{2.5} en comparación con 2022. De acuerdo con la Figura 41, en diecisiete días del período evaluado se registraron concentraciones dentro de la categoría “Buena” (banda de color verde). Sin embargo, en la mayoría de los días de medición, los valores se ubicaron en la categoría “Moderada” (banda de color amarillo), lo que sugiere un deterioro en la calidad del aire con respecto al año anterior. Este incremento en las concentraciones de PM_{2.5} podría estar

relacionado con factores como condiciones meteorológicas menos favorables para la dispersión de contaminantes, mayor actividad vehicular e industrial y la presencia de emisiones naturales o antropogénicas adicionales en la zona de estudio

6.3 Índice de calidad del aire para NO₂

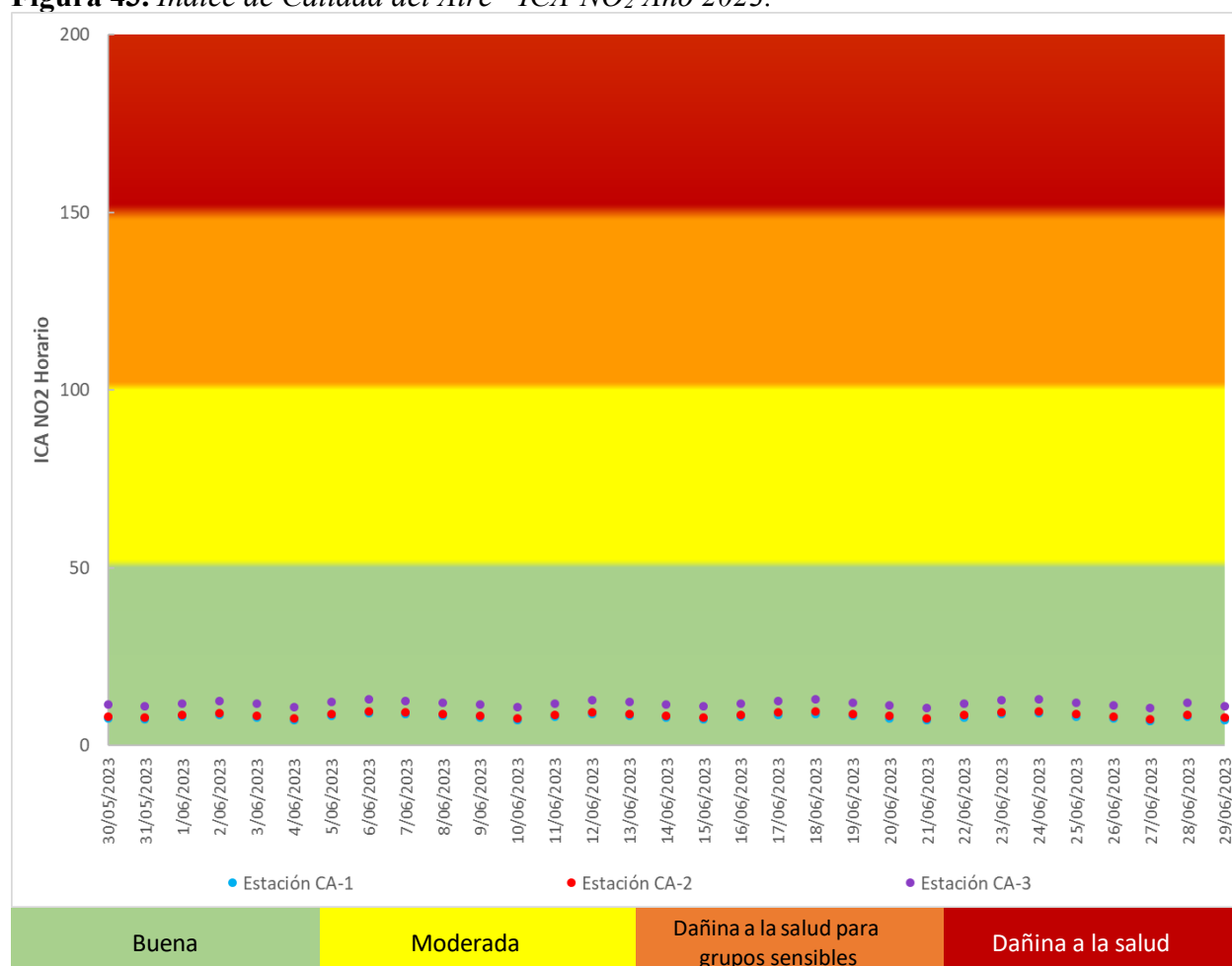
Figura 42. Índice de Calidad del Aire - ICA-NO₂ Año 2022.



Durante el período analizado en 2022, según la Figura 42, las estaciones de monitoreo registraron diariamente valores del Índice de Calidad del Aire (ICA) para NO₂ dentro de la categoría "Buena" (banda de color verde). Esto indica que la concentración de NO₂ en la

atmósfera se mantuvo en niveles bajos, sin representar un riesgo significativo para la salud de la población en la zona de estudio. Las fluctuaciones en las concentraciones de NO_2 fueron moderadas, sin cambios bruscos a lo largo del período. Se observó un ligero incremento en algunos días, pero sin superar el umbral de la categoría "Buena".

Figura 43. Índice de Calidad del Aire - ICA- NO_2 Año 2023.

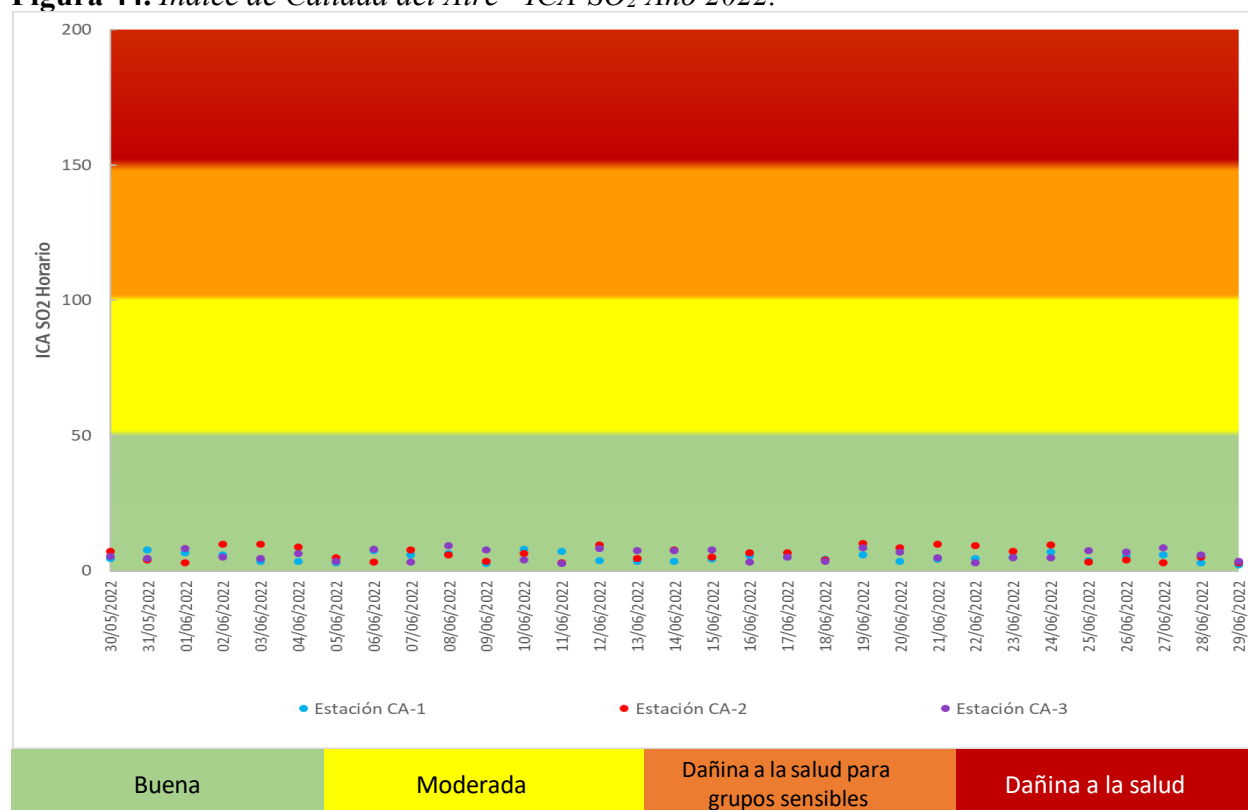


En 2023, como se muestra en la Figura 43, se mantiene la tendencia observada en 2022, con valores del ICA para NO_2 dentro de la categoría "Buena" (banda de color verde) durante todo el período de estudio. Sin embargo, se evidencia un incremento generalizado en los valores del ICA en las tres estaciones en comparación con 2022. Esta diferencia, puede estar relacionada

con cambios en la meteorología, como variaciones en la velocidad del viento, la humedad y la frecuencia de precipitaciones, que favorecieron la acumulación del contaminante y posibles cambios en las fuentes de emisión locales. En términos generales, la calidad del aire en ambas anualidades fue favorable respecto a NO_2 , sin representar un riesgo para la salud de la población durante el período analizado.

6.4 Índice de calidad del aire para SO_2

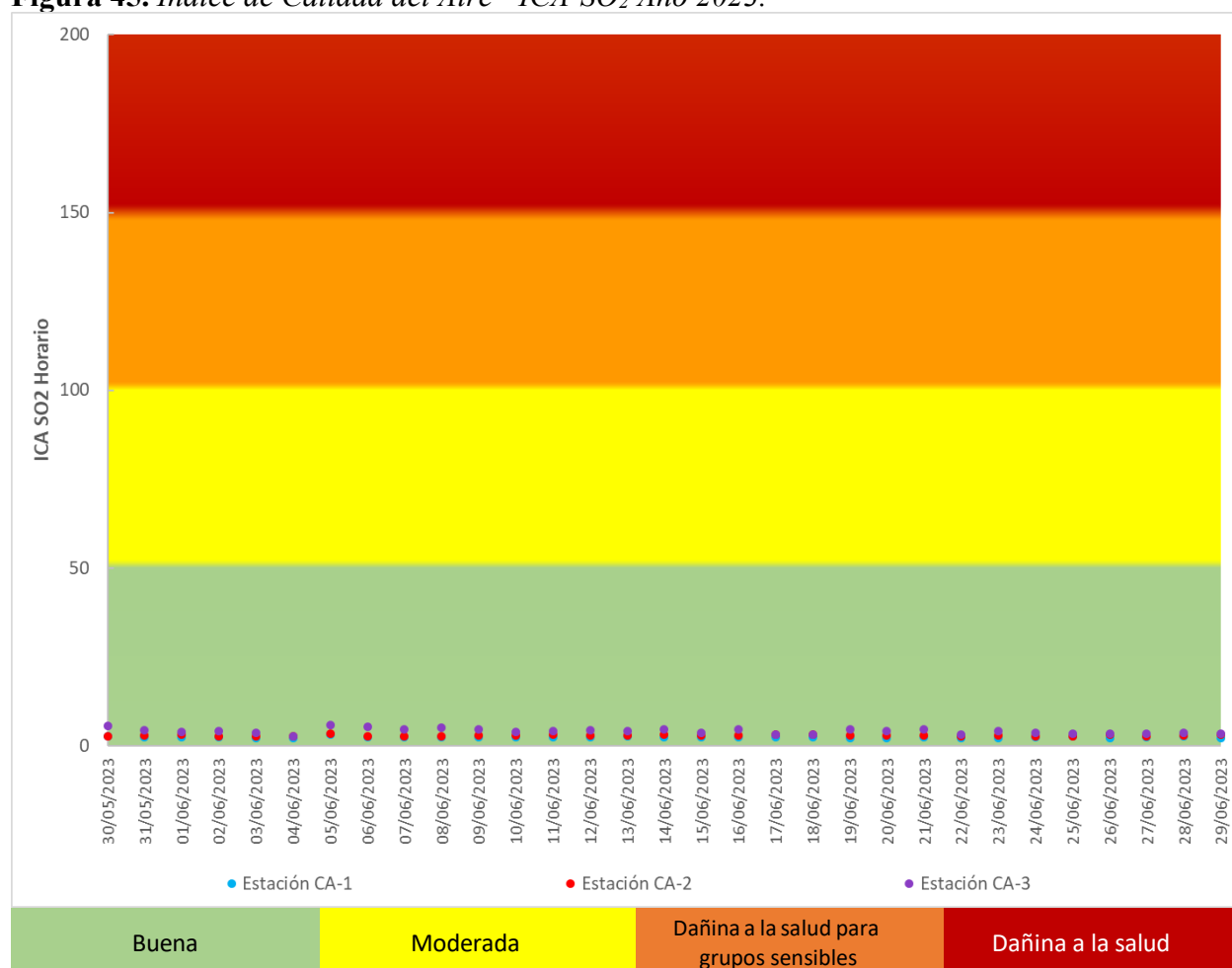
Figura 44. Índice de Calidad del Aire - ICA- SO_2 Año 2022.



Durante el 2022, según la Figura 44, las estaciones de monitoreo registraron diariamente valores del Índice de Calidad del Aire (ICA) para SO_2 dentro de la categoría "Buena" (banda de color verde). Esto indica que la concentración de SO_2 en la atmósfera se mantuvo en niveles

bajos, sin representar un riesgo significativo para la salud de la población en la zona de estudio. Las variaciones en las concentraciones de SO₂ presentaron cambios relativamente bruscos a lo largo del período. Se observó un ligero incremento en algunos días, pero sin superar el umbral de la categoría "Buena".

Figura 45. Índice de Calidad del Aire - ICA-SO₂ Año 2023.



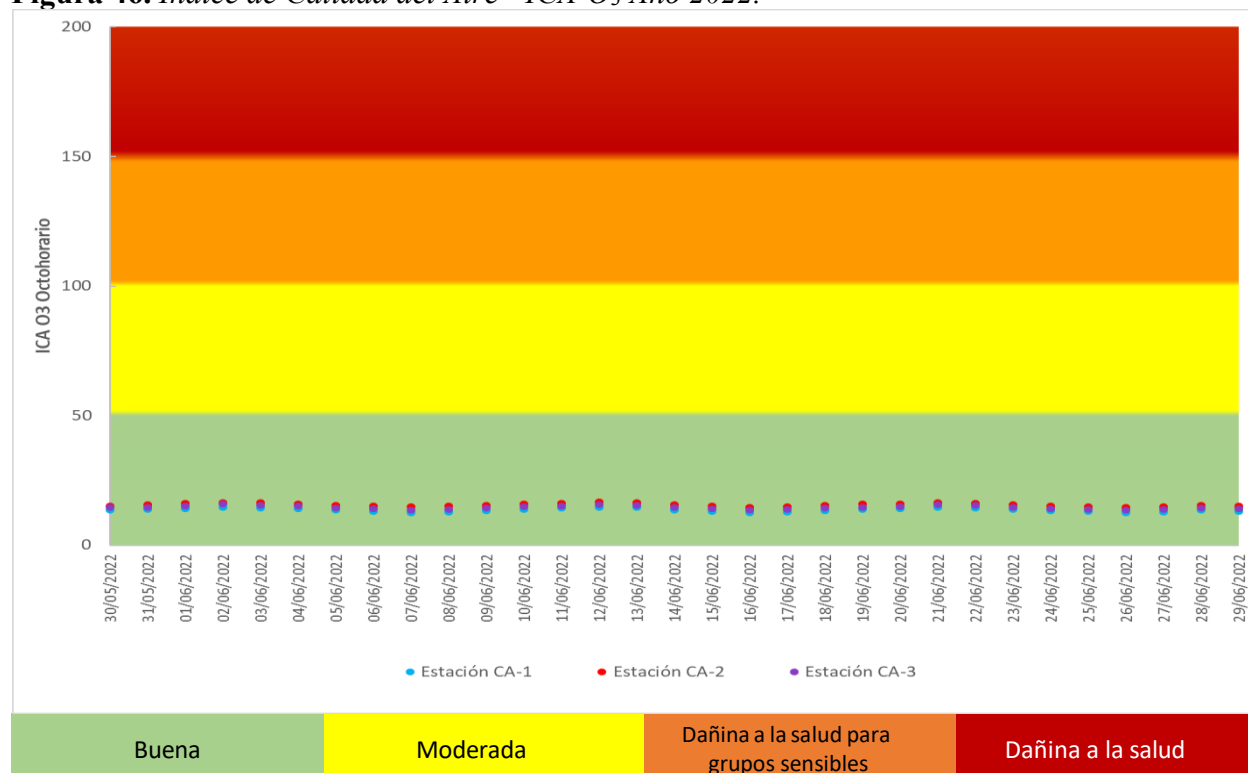
Como se presenta en la Figura 45 la tendencia general muestra una reducción en las concentraciones de SO₂ en 2023 en comparación con 2022. Mientras que en 2022 hubo picos elevados en la estación CA-2 y fluctuaciones importantes en las demás estaciones, en 2023 las

concentraciones se mantuvieron más homogéneas y dentro de valores considerablemente más bajos. Este comportamiento sugiere una posible mejora en la calidad del aire en términos de SO_2 .

Según los estándares de calidad del aire, todas las mediciones de SO_2 en ambos años se encuentran dentro de la categoría de "Buena" (banda de color verde), lo que indica que no representan un riesgo para la salud de la población.

6.5 Índice de calidad del aire para O_3

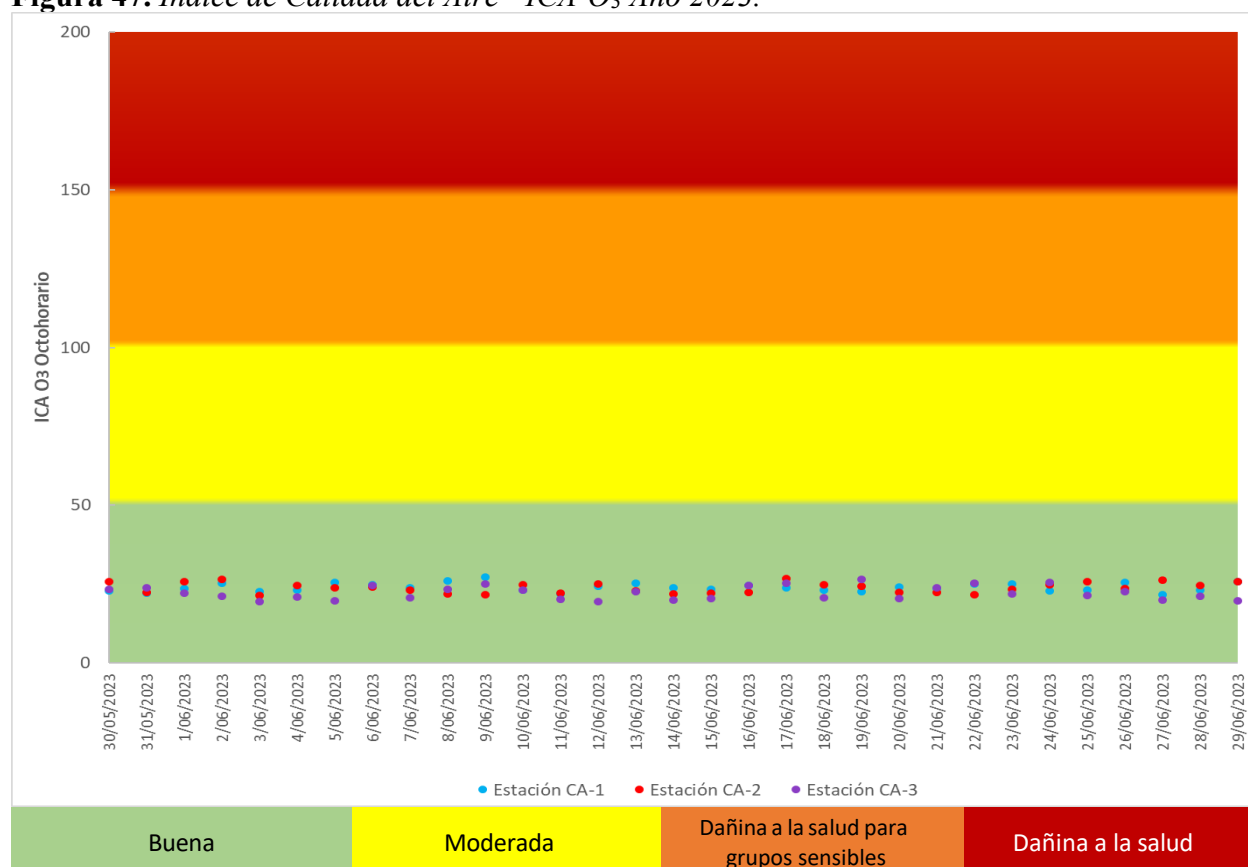
Figura 46. *Índice de Calidad del Aire - ICA- O_3 Año 2022.*



En 2022, según la Figura 46, las estaciones de monitoreo registraron diariamente valores del Índice de Calidad del Aire (ICA) para O_3 dentro de la categoría "Buena" (banda de color verde). Esto indica que la concentración de O_3 en la atmósfera se mantuvo en niveles bajos, sin representar un riesgo significativo para la salud de la población en la zona de estudio. La

variabilidad en las concentraciones fue mínima a lo largo del mes, sin presentar incrementos significativos. La estabilidad de los valores sugiere una influencia predominante de condiciones meteorológicas constantes en la región, como la radiación solar y la velocidad del viento, que regulan la formación y disipación del ozono.

Figura 47. Índice de Calidad del Aire - ICA-O₃ Año 2023.



En 2023, según la Figura 47, las concentraciones de O₃ presentaron una mayor variabilidad en comparación con el año anterior, con valores más altos en las tres estaciones de monitoreo. En este sentido se observó una tendencia general al incremento en los valores de O₃ en comparación con 2022, lo cual podría estar asociado a condiciones meteorológicas favorables para la formación de ozono, como temperaturas más altas y mayor radiación solar. Sin embargo,

a pesar del aumento registrado, todas las concentraciones medidas se mantuvieron dentro de la categoría "Buena" (banda de color verde), indicando que los niveles de ozono no representaron un riesgo significativo para la salud pública durante este periodo.

7. Conclusiones

Se identificó un aumento en las concentraciones de PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ y O₃ en 2023 en comparación con 2022, lo que sugiere un deterioro en la calidad del aire. Aunque ninguno de los contaminantes atmosféricos superó los límites normativos establecidos en la Resolución 2254 de 2017, se registraron episodios con concentraciones elevadas, especialmente en estaciones con alta influencia vehicular e industrial.

Las concentraciones de PM₁₀ se mantuvieron dentro de los valores permisibles en ambos años. Sin embargo, PM_{2.5} presentó valores más elevados en 2023, con más días en la categoría "Moderada" según el Índice de Calidad del Aire (ICA). Estos resultados sugieren que la reducción en la velocidad del viento y la menor precipitación en 2023 favorecieron la acumulación de partículas en la atmósfera.

Se observó un incremento en las concentraciones de NO₂ en 2023, con valores máximos más elevados en CA-1 y CA-3. Este aumento podría estar relacionado con mayores emisiones vehiculares e industriales, así como con condiciones meteorológicas menos favorables para la dispersión del contaminante.

En ambos años, las concentraciones de SO₂ se mantuvieron en niveles bajos, sin exceder los valores normativos. Sin embargo, en 2023 se evidenció un leve incremento en la estación CA-3, posiblemente debido a fuentes de emisión cercanas.

Se identificó un aumento en las concentraciones de O_3 en 2023, con máximos registrados en CA-1 y una clara relación con la radiación solar y la temperatura. La tendencia diurna del ozono confirmó que los valores más altos se presentaron en horas de la tarde, mientras que los más bajos ocurrieron en la madrugada. La aplicación de la media móvil octohoraria permitió evaluar con mayor precisión la exposición poblacional y el cumplimiento normativo.

Los factores meteorológicos jugaron un papel clave en la calidad del aire. En 2023, se registró una menor velocidad del viento, menor precipitación y mayor temperatura, lo que favoreció la acumulación de contaminantes y redujo su dispersión. El cambio en la dirección predominante del viento entre 2022 y 2023 pudo haber influido en la distribución de los contaminantes atmosféricos.

Los resultados obtenidos resaltan la importancia de un monitoreo continuo de la calidad del aire y de las variables meteorológicas para comprender mejor los procesos de acumulación y dispersión de contaminantes. Además, se sugiere la implementación de estrategias adicionales de control de emisiones y gestión ambiental, especialmente en zonas con alta densidad vehicular e industrial.

8. Recomendaciones

Es esencial expandir la red de monitoreo para incluir estaciones adicionales en áreas con alta actividad, ya que estas zonas presentan un mayor riesgo de concentraciones elevadas de contaminantes.

La disminución de la velocidad del viento y la baja precipitación observadas en 2023 contribuyen a la acumulación de partículas en el aire, lo que requiere una estrategia de gestión adaptada a estas condiciones. Durante eventos meteorológicos con poca dispersión, como los

días con temperaturas altas y vientos bajos, sería prudente aplicar restricciones temporales sobre las actividades de emisión industrial o vehicular.

Dado que la exposición a la contaminación atmosférica tiene efectos adversos sobre la salud pública, es fundamental realizar campañas de sensibilización que expliquen claramente la relación entre la calidad del aire y enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Estas campañas deben ser dirigidas a todos los sectores de la población, con especial énfasis en las comunidades que viven cerca de zonas de altas emisiones. Asimismo, se debe promover la participación ciudadana en la monitorización local, utilizando aplicaciones móviles y tecnologías de bajo costo para que los residentes puedan contribuir a la vigilancia de la calidad del aire y aplicar cambios en sus hábitos cotidianos para reducir la exposición a los contaminantes.

Referencias

- Applus. (2023). *AmbiensQ Suite*. Obtenido de [Plataforma de Software]:
<https://www.ambiensq.com>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (s.f.). Gov.co. Consultado el 26 de febrero de 2026, de
<https://www.metropol.gov.co/>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2019, 26 de marzo). *Red de Monitoreo de Calidad del Aire*. Metropol. https://www.metropol.gov.co/Paginas/Noticias/elmetropolitano-ambiental/red-de-monitoreo-de-calidad-del-aire.aspx?utm_source
- Climate & Clean Air Coalition. (2018, 2 de Mayo de). *9 de personas de 10 en todo el mundo respira aire contaminado, pero más países están tomando medidas*.
<https://www.ccacoalition.org/es/news/world-health-organization-releases-new-global-air-pollution-data>
- Corpocesar. (2019). *Corporación Autónoma Regional del Cesar*. Obtenido de Informe anual de operación del Sistema Especial de Vigilancia de la Calidad del Aire de la zona carbonífera del Cesar.
- García, S. M. (2023). *Análisis de los efectos de la calidad del aire en la percepción de la salud usando una metodología de participación comunitaria. Municipio de La Ceja - Antioquia*. Universidad de Antioquia:
<https://bibliotecadigital.udea.edu.co/server/api/core/bitstreams/60c4e700-5e03-40e3-a5f9-c7afa2630e23/content>
- Gómez, M. V., Molina Vásquez, E., Garcia Rivera, P., Quiceno Rendón, D., Londoño Largo, A., Acevedo Cardona, L. (2013). *Informe Final de Calidad del Aire en el Valle de Aburrá*.

<https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Estudios-calidad-del-aire/Informe-final-calidad-aire.pdf?>

Infolocal. (2024). Cisneros [Infolocal te conecta con la ciudad].

<https://infolocal.comfenalcoantioquia.com/index.php/cisneros#:~:text=Cisneros%20est%C3%A1%20ubicado%20a%201.050,el%20comercio%20y%20la%20ganader%C3%ADa.>

Lakes Software. (2023). *WRPLOT*[Lakes Software]. Consultado el 27 de febrero de 2024.

<https://www.weblakes.com/software/freeware/wrplot-view/>

M. Stafoggia, J. S. (2008). Does Temperature Modify the Association between Air Pollution and Mortality? A Multicity Case-Crossover Analysis in Italy. *American Journal of Epidemiology*, Volume 167, 1476–1485. doi:<https://doi.org/10.1093/aje/kwn074>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible. (2015, 26 de mayo). Decreto 1076 de 2015.

Versión integrada con sus modificaciones esta versión incorpora las modificaciones introducidas al decreto único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible a partir de la fecha de su expedición. Función pública de Colombia. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible. (2017, 01 de noviembre). Resolución No. 2254 de 2017. *Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones.* Función pública de Colombia, Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-2254-de-2017.pdf>

Ministerio de Ambiente (MAVT). (2010, octubre). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire.*

Miniambiente.

[https://www.minambiente.gov.co/wp-](https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Disenio.pdf)

[content/uploads/2021/06/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Disenio.pdf](https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Disenio.pdf)

Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible. (2019). *Estrategia Nacional de Calidad del Aire*

– ENCA. Asuntos Ambientales, Sectorial y Urbana. Miniambiente.

<https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/estrategia-nacional-de-calidad-del-aire-enca/>

Ministerio de Salud. (2021, 23 de agosto). *Minsalud comprometido con la calidad del aire.*

Ministerio de Salud y Protección Social. Minisalud. [https://](https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Minsalud-comprometido-con-la-calidad-del-aire-.aspx#:~:text=%E2%80%93%20La%20contaminaci%C3%B3n%20del%20aire%20representa%20un,ambiental%2C%20siendo%2015.681%20muertes%20asociadas%20a%20la)

[https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Minsalud-comprometido-con-la-calidad-del-aire-](https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Minsalud-comprometido-con-la-calidad-del-aire-.aspx#:~:text=%E2%80%93%20La%20contaminaci%C3%B3n%20del%20aire%20representa%20un,ambiental%2C%20siendo%2015.681%20muertes%20asociadas%20a%20la)

[.aspx#:~:text=%E2%80%93%20La%20contaminaci%C3%B3n%20del%20aire%20representa%20un,ambiental%2C%20siendo%2015.681%20muertes%20asociadas%20a%20la](https://www.minsalud.gov.co/Paginas/Minsalud-comprometido-con-la-calidad-del-aire-.aspx#:~:text=%E2%80%93%20La%20contaminaci%C3%B3n%20del%20aire%20representa%20un,ambiental%2C%20siendo%2015.681%20muertes%20asociadas%20a%20la)

Montes, R. E., Morales, J. A., Lesmes, N. M., Guerrero, O. J. (2024). *Análisis del estado de la*

calidad del aire de los svca fijos en el área de la estrategia de la zona minera del centro

del cesar (2018 – 2023). *Aplicación de la Fase IV de la estrategia de monitoreo: análisis*

de información. ANLA.

[https://www.anla.gov.co/images/entidad/sipta/ANLISIS%20DEL%20ESTADO%20DE%](https://www.anla.gov.co/images/entidad/sipta/ANLISIS%20DEL%20ESTADO%20DE%20LA%20CALIDAD%20DEL%20AIRE%20DE%20LOS%20SVCA%20FIJOS%20EN%20EL%20REA%20DE%20LA%20ESTRATEGIA%20DE%20LA%20ZONA%20MINERA%20DEL%20CENTRO%20DEL%20CESAR.pdf)

[20LA%20CALIDAD%20DEL%20AIRE%20DE%20LOS%20SVCA%20FIJOS%20EN](https://www.anla.gov.co/images/entidad/sipta/ANLISIS%20DEL%20ESTADO%20DE%20LA%20CALIDAD%20DEL%20AIRE%20DE%20LOS%20SVCA%20FIJOS%20EN%20EL%20REA%20DE%20LA%20ESTRATEGIA%20DE%20LA%20ZONA%20MINERA%20DEL%20CENTRO%20DEL%20CESAR.pdf)

[%20EL%20REA%20DE%20LA%20ESTRATEGIA%20DE%20LA%20ZONA%20MIN](https://www.anla.gov.co/images/entidad/sipta/ANLISIS%20DEL%20ESTADO%20DE%20LA%20CALIDAD%20DEL%20AIRE%20DE%20LOS%20SVCA%20FIJOS%20EN%20EL%20REA%20DE%20LA%20ESTRATEGIA%20DE%20LA%20ZONA%20MINERA%20DEL%20CENTRO%20DEL%20CESAR.pdf)

[ERA%20DEL%20CENTRO%20DEL%20CESAR.pdf](https://www.anla.gov.co/images/entidad/sipta/ANLISIS%20DEL%20ESTADO%20DE%20LA%20CALIDAD%20DEL%20AIRE%20DE%20LOS%20SVCA%20FIJOS%20EN%20EL%20REA%20DE%20LA%20ESTRATEGIA%20DE%20LA%20ZONA%20MINERA%20DEL%20CENTRO%20DEL%20CESAR.pdf)

NASA. (2023). *Fire Information for Resource Management System (FIRMS)*. NASA Earthdata.

<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#d:24hrs;@17.1,0.0,2.1z>

Ochoa, A. F. (2021). *Monitoreo de SO₂, NO₂ Y CO para estimar la calidad del aire en la ciudad*

de montería [Trabajo de grado, ingeniería ambiental]. Universidad de córdoba.

<https://repositorio.unicordoba.edu.co/entities/publication/4a7a0100-f732-4c9e-bc83-c9c59324a4fc>

Secretaría Distrital de Ambiente, Dirección de Control Ambiental, Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá D.C. 2009 (2010). *Informe anual de calidad del aire de Bogotá*. http://rmcab.ambientebogota.gov.co/Pagesfiles/Informe_Anual_2009_RMCAB.pdf

Team, R. C. (2023). *The R Project for Statistical Computing*. <https://www.r-project.org/>