



**IX INFORME DE CALIDAD DEL AIRE
GRAN ÁREA METROPOLITANA DE COSTA RICA
2023 – 2024**



MINISTERIO
DE SALUD

GOBIERNO
DE COSTA RICA

UNA
UNIVERSIDAD
NACIONAL
COSTA RICA



RECOPE



Dra. Mary Denisse Munive Angermüller

Ministra de Salud

PhD. Jorge Herrera Murillo

Rector de la Universidad Nacional

Máster Karla Montero Víquez

Presidente ejecutivo, Refinadora Costarricense de petróleo

Ing. Zeneida Chaves Fernández

Alcaldesa, Municipalidad de Belén



MINISTERIO
DE SALUD

GOBIERNO
DE COSTA RICA

UNA
UNIVERSIDAD
NACIONAL
COSTA RICA



RECOPE



Grupo Técnico Encargado de la Elaboración del Informe

M.Sc. José Felix Rojas Marín

Ing. Ricardo Morales Vargas

Coordinador del Laboratorio de Análisis
Ambiental

Unidad de Salud Ambiental

Universidad Nacional

Ministerio de Salud

Dra. María Martínez Cruz

M.Sc. Alejandra Gamboa Jiménez

OVSICORI

Laboratorio de Análisis Ambiental

Universidad Nacional

Universidad Nacional

Ing. Luis Diego Ramos Castro

Lic. David Antonio Carvajal Arroyo

Unidad de Salud Ambiental

Laboratorio de Análisis Ambiental

Ministerio de Salud

Universidad Nacional

Colaboradores en la operación de la red de monitoreo para el periodo 2023-2024



**MINISTERIO
DE SALUD**

**GOBIERNO
DE COSTA RICA**

UNA
UNIVERSIDAD
NACIONAL
COSTA RICA



RECOPE



**Dirección de Protección Radiológica y
Salud Ambiental**

Ministerio de Salud

Laboratorio de Análisis Ambiental

Escuela de Ciencias Ambientales

Universidad Nacional

Departamento de Gestión Ambiental

Municipalidad de Belén

Dirección de Aseguramiento de la Calidad

Refinadora Costarricense de Petróleo

Índice de Contenido

1. Resumen ejecutivo	1
2. Marco Teórico.....	2
2.1 Contaminación atmosférica.....	3
2.1.1 Dióxido de Nitrógeno.....	4
2.1.2 Dióxido de Azufre.....	5
2.1.3 Ozono.....	6
2.1.4 Partículas en suspensión.....	6
2.2 Calidad del aire	7
2.3 Métodos de Muestreo de Contaminantes Atmosféricos.....	8
2.3.1 Método Pasivo	9
2.3.2 Método Activo	10
2.3.3 Método Automático	10
3. Metodología	11
3.1 Red Manual.....	12
3.2 Red Pasiva.....	15
3.3 Red Automática	17
3.4 Aseguramiento de la Calidad	19
4. Resultados	21
4.1 Monitoreo Manual	21
4.1.1 Concentración de PM ₁₀	24
4.1.2 Concentración de PM _{2.5}	29
4.1.3 Concentración de NO ₂	34
4.1.4 Concentración de SO ₂	38
4.1.5 Concentración de O ₃	42
4.2 Monitoreo automático.....	46
4.2.1 Red automática de RECOPE, Ochomogo, Cartago	46
4.2.2 Red automática de Coronado	61
4.2.3 Campaña de monitoreo Volcán Poás	69
5. Conclusiones.....	74
6. Recomendaciones	76
7. Referencias Bibliográficas	77
8. Anexos	80

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Sitios de monitoreo de la red manual ubicadas dentro del Gran Área Metropolitana de Costa Rica.	14
Cuadro 2. Sitios de monitoreo en la red pasiva en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica.	16
Cuadro 3. Criterios de frecuencia y aceptación para los controles de calidad de los analizadores de gases.	20
Cuadro 4. Evolución de los promedios anuales de concentración de partículas PM ₁₀ y PM _{2.5} medidas en los sitios de muestreo correspondientes.	23
Cuadro 5. Concentración de promedio en µg/m ³ de NO ₂ por campaña para el cantón de Belén durante los años 2021, 2022, 2023 y 2024.	35
Cuadro 6. Concentración promedio de SO ₂ en µg/m ³ registradas para el cantón de Belén durante el año 2023 y 2024.	39
Cuadro 7. Concentración promedio de O ₃ en µg/m ³ registradas para el cantón de Belén durante el año 2023 y 2024.	43
Cuadro 8. Cantidad de datos relativa según años para los contaminantes criterio de la estación automática en RECOPE, Cartago, 2023-2024.	47
Cuadro 9. Concentración de PM _{2.5} y PM ₁₀ (en unidades de µg/m ³) en el Volcán Poas, 2024.	70
Cuadro 10. Concentración de dióxido de azufre (en unidades de ppb) en el Volcán Poas, 2024.	72

Índice de Figuras

Figura 1. Dispersión y difusión química de contaminantes primarios y secundarios.	4
Figura 2. Relación de tamaños del material particulado con respecto a un cabello humano (USEPA).	7
Figura 3. Puntos de monitoreo de calidad de aire en las provincias de San José, Heredia y Alajuela, 2023-2024.	11
Figura 4. Esquema de un muestreador de alto volumen para PM ₁₀	13
Figura 5. Filtro colector de material particulado (a) antes del muestreo y (b) después de 24 horas.	13
Figura 6. Distribución espacial de la red de monitoreo manual del material particulado. Fuente: Elaboración propia.	15
Figura 7. Distribución de puntos de la Red Pasiva en el Cantón de Belén. Fuente: Elaboración propia.	17
Figura 8. Concentración material particulado PM ₁₀ en el punto PI-003 en Hatillo, San José, 2023.	25
Figura 9. Concentración material particulado PM ₁₀ en el punto PI-004 en Uruca, San José, 2023.	25
Figura 10. Concentración material particulado PM ₁₀ en el punto PI-004 en Uruca, San José, 2024.	27
Figura 11. Concentración material particulado PM ₁₀ en el punto PI-018 en Belén, San José, 2023.	27
Figura 12. Concentración material particulado PM ₁₀ en el punto PI-018 en Belén, San José, 2024.	28
Figura 13. Concentración material particulado PM ₁₀ en el punto PI-025 en Heredia, Heredia, 2023.	28
Figura 14. Concentración material particulado PM ₁₀ en el punto PI-025 en Heredia, Heredia, 2024.	29
Figura 15. Concentración material particulado PM _{2.5} en el punto PI-007 en Ministerio de Salud, San José, 2023.	30
Figura 16. Concentración material particulado PM _{2.5} en el punto PI-007 en Ministerio de Salud, San José, 2024.	30
Figura 17. Concentración material particulado PM _{2.5} en el punto de EPA, Belén, 2023.	31
Figura 18. Concentración material particulado PM _{2.5} en el punto de EPA, Belén, 2024.	32
Figura 19. Concentración material particulado PM _{2.5} en el punto Rectoría UNA, Heredia, 2023.	33
Figura 20. Concentración material particulado PM _{2.5} en el punto Rectoría UNA, Heredia, 2024.	34
Figura 21. Variación de la concentración de dióxido de nitrógeno por punto de monitoreo durante el 2023 en el cantón de Belén.	36

Figura 22. Variación de la concentración de dióxido de nitrógeno por punto de monitoreo durante el 2024 en el cantón de Belén.	36
Figura 23. Concentración promedio de NO ₂ por sitio de muestreo 2023 en el cantón de Belén.	37
Figura 24. Concentración promedio de NO ₂ por sitio de muestreo 2024 en el cantón de Belén.	38
Figura 25. Variación de la concentración de dióxido de azufre por punto de monitoreo durante el 2023 en el cantón de Belén.	40
Figura 26. Variación de la concentración de dióxido de azufre por punto de monitoreo durante el 2024 en el cantón de Belén.	40
Figura 27. Concentración promedio de SO ₂ por sitio de muestreo el 2023 en el cantón de Belén.	41
Figura 28. Concentración promedio de SO ₂ por sitio de muestreo el 2024 en el cantón de Belén.	42
Figura 29. Variación de la concentración de ozono por punto de monitoreo durante el 2023 en el cantón de Belén.	44
Figura 30. Variación de la concentración de ozono por punto de monitoreo durante el 2024 en el cantón de Belén.	44
Figura 31. Concentración promedio de ozono (en unidades de µg/m ³) por punto de muestreo para el 2023.	45
Figura 32. Concentración promedio de ozono (en unidades de µg/m ³) por punto de muestreo para el 2024.	46
Figura 33. Concentración diaria de PM _{2.5} (en unidades de µg/m ³) en RECOPE, Cartago, 2023.	48
Figura 34. Concentración diaria de PM _{2.5} (en unidades de µg/m ³) en RECOPE, Cartago, 2024.	49
Figura 35. Concentración horaria de PM _{2.5} (en unidades de µg/m ³) en RECOPE, Cartago, 2024.	50
Figura 36. Concentración promedio diaria de dióxido de azufre (en unidades de ppb) en RECOPE, Cartago, 2023.	51
Figura 37. Concentración promedio diaria de dióxido de azufre (en unidades de ppb) en RECOPE, Cartago, 2024.	51
Figura 38. Concentración horaria de dióxido de azufre (en unidades de ppb) en plantel de RECOPE, Cartago, 2023 y 2024.	52
Figura 39. Concentración promedio diaria de dióxido de nitrógeno (en unidades de ppb) en RECOPE, Cartago, 2023.	53
Figura 40. Concentración promedio diaria de dióxido de nitrógeno (en unidades de ppb) en RECOPE, Cartago, 2024.	53
Figura 41. Concentración horaria de dióxido de nitrógeno (en unidades de ppb) en plantel de RECOPE, Cartago, 2023 y 2024.	54
Figura 42. Concentración de carbono negro (en unidades de ng/m ³) en plantel de RECOPE, Cartago, 2023.	56
Figura 43. Concentración de carbono negro (en unidades de ng/m ³) en plantel de RECOPE, Cartago, 2024.	56
Figura 44. Concentración horaria de carbono negro (en unidades de ng/m ³) en plantel de RECOPE, Cartago, 2023 y 2024.	57
Figura 45. Concentración horaria de monóxido de carbono (en unidades de ppm) en plantel de RECOPE, Cartago, 2024.	58
Figura 46. Concentración ozono (en unidades de ppb) en plantel de RECOPE, Cartago, 2023.	59
Figura 47. Concentración ozono (en unidades de ppb) en plantel de RECOPE, Cartago, 2024.	60
Figura 48. Concentración horaria ozono (en unidades de ppb) en plantel de RECOPE, Cartago, 2023 y 2024.	61
Figura 49. Concentración de PM _{1.0} (en unidades de µg/m ³) en Coronado, 2023.	62
Figura 50. Concentración de PM _{1.0} (en unidades de µg/m ³) en Coronado, 2024.	63

Figura 51. Concentración de PM _{2.5} (en unidades de µg/m ³) en Coronado, 2023.....	64
Figura 52. Concentración de PM _{2.5} (en unidades de µg/m ³) en Coronado, 2024.....	64
Figura 53. Concentración de PM ₁₀ (en unidades de µg/m ³) en Coronado, 2023.....	65
Figura 54. Concentración de PM ₁₀ (en unidades de µg/m ³) en Coronado, 2024.....	66
Figura 55. Concentración horaria de PM _{1.0} , PM _{2.5} y PM ₁₀ (en unidades de ppb) en Coronado, 2023 y 2024.....	67
Figura 56. Concentración media diaria de dióxido de azufre (en unidades de ppb) en Coronado, 2023... 68	68
Figura 57. Concentración media diaria de dióxido de azufre (en unidades de ppb) en Coronado, 2024... 68	68
Figura 58. Concentración horaria dióxido de azufre (en unidades de ppb) en Coronado, 2023 y 2024... 69	69
Figura 59. Comportamiento de la concentración de partículas fina (PM _{2.5}) en función de la dirección del viento Volcán Poás, del 05 al 10 de abril 2024.....	71
Figura 60. Comportamiento de la meteorología en el sitio de medición y su relación con el dióxido de azufre, Volcán Poás, 2024.....	73

Índice de Anexos

Anexo 1. Concentración diaria de PM _{2.5} y PM ₁₀ (en unidades de mg/m ³), Volcán Poás, del viernes 05 de abril al domingo 07 de abril 2024.....	80
Anexo 2. Concentración diaria de PM _{2.5} y PM ₁₀ (en unidades de mg/m ³), Volcán Poás, del viernes 05 de abril al miércoles 10 de abril 2024.....	80
Anexo 3. Concentración diaria de PM _{2.5} y PM ₁₀ (en unidades de mg/m ³), Volcán Poás, del jueves 11 de abril al martes 16 de abril 2024.....	81
Anexo 4. Concentración diaria de SO ₂ (en unidades de ppb), Volcán Poás, del jueves 11 de abril al martes 16 de abril 2024.....	81
Anexo 5. Concentración diaria de PM _{2.5} y PM ₁₀ (en unidades de mg/m ³), Volcán Poás, del martes 16 de abril al viernes 19 de abril del 2024.....	82
Anexo 6. Concentración diaria de SO ₂ (en unidades de ppb), Volcán Poás, del martes 16 de abril al viernes 19 de abril del 2024.....	82
Anexo 7. Concentración diaria de PM _{2.5} y PM ₁₀ (en unidades de mg/m ³), Volcán Poás, del viernes 19 de abril al miércoles 24 de abril 2024.....	83
Anexo 8. Concentración diaria de SO ₂ (en unidades de ppb), Volcán Poás, del viernes 19 de abril al miércoles 24 de abril 2024.....	83
Anexo 9. Concentración diaria de PM _{2.5} y PM ₁₀ (en unidades de mg/m ³), Volcán Poás, del miércoles 24 de abril al jueves 02 de mayo 2024.....	84
Anexo 10. Concentración diaria de SO ₂ (en unidades de ppb), Volcán Poás, del miércoles 24 de abril al jueves 02 de mayo 2024.....	84
Anexo 11. Concentración con promedios horarios móviles de PM _{2.5} y SO ₂ (en unidades de mg/m ³ y ppb), Volcán Poás, del miércoles 24 de abril al jueves 02 de mayo 2024.....	84
Anexo 12. Concentración con promedios horarios móviles de PM _{2.5} y SO ₂ (en unidades de mg/m ³ y ppb), Volcán Poás, del jueves 02 de mayo al sábado 04 de mayo 2024.....	85
Anexo 13. Concentración diaria de PM _{2.5} y PM ₁₀ (en unidades de mg/m ³), Volcán Poás, del sábado 04 de mayo del 2024 al jueves 09 de mayo 2024.....	85
Anexo 14. Concentración con promedio de 24 horas de PM _{2.5} y PM ₁₀ (en unidades de mg/m ³), Volcán Poás, del sábado 04 de mayo del 2024 al jueves 09 de mayo 2024.....	86
Anexo 15. Concentración diaria de SO ₂ (en unidades de ppb), Volcán Poás, del sábado 04 de mayo del 2024 al jueves 09 de mayo 2024.....	86
Anexo 16. Concentración diaria de PM _{2.5} y PM ₁₀ (en unidades de mg/m ³), Volcán Poás, del jueves 09 de mayo del 2024 al 24 de mayo 2024.....	87
Anexo 17. Concentración diaria de SO ₂ (en unidades de ppb), Volcán Poás, del sábado 04 de mayo del 2024 al jueves 09 de mayo 2024.....	87

1. Resumen ejecutivo

La contaminación del aire representa una de las principales problemáticas ambientales a nivel global, asociada a más de siete millones de muertes anuales, según estimaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS). En 2021, la OMS actualizó sus guías de calidad del aire, que habían permanecido sin cambios desde 2005, en respuesta a la creciente evidencia científica sobre los efectos adversos de la mala calidad del aire en la salud humana. Esta actualización pone especial énfasis en la protección de grupos vulnerables, como niños, personas adultas mayores y quienes padecen enfermedades respiratorias o cardiovasculares. Como resultado, los valores guía para la mayoría de los contaminantes criterio se han reducido de manera significativa, lo que plantea un desafío mayor para los países en su esfuerzo por proteger la salud pública y reducir los costos asociados a enfermedades relacionadas con la contaminación atmosférica.

En Costa Rica, la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire constituye un esfuerzo interinstitucional liderado por el Ministerio de Salud, con el respaldo técnico de la Universidad Nacional y la colaboración de entidades como RECOPE y algunos gobiernos locales, como la Municipalidad de Belén. Esta red tiene como objetivo evaluar las concentraciones de diversos contaminantes criterio, entre ellos el monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂) y material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}). El monitoreo se lleva a cabo mediante muestreos manuales y automáticos en puntos estratégicos de la Gran Área Metropolitana, y los resultados obtenidos se contrastan tanto con los límites establecidos en el Reglamento sobre Contaminantes Criterio (Decreto Ejecutivo N.º 39951-S), como con las recomendaciones actualizadas de la OMS.

La concentración promedio de PM₁₀ en la Gran Área Metropolitana (GAM) de Costa Rica fue de 21 µg/m³ en 2023 y 23 µg/m³ en 2024. Ambos valores se encuentran por debajo del límite anual permitido por el Decreto Ejecutivo N.º 39951-S (30 µg/m³), aunque superan el valor de referencia recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), que establece un límite más estricto de 15 µg/m³. En el caso del material particulado fino (PM_{2.5}), los promedios registrados fueron de 12 µg/m³ para 2023 y 12,6 µg/m³ para 2024. Aunque se mantienen por debajo del límite nacional, estos niveles duplican con creces el valor guía anual propuesto por la OMS (5 µg/m³), lo que sugiere una exposición considerable a este contaminante.

En cuanto al dióxido de nitrógeno (NO₂), el cantón de Belén registró concentraciones promedio de 29,9 µg/m³ en 2023 y 33,1 µg/m³ en 2024. Aunque estos valores se mantienen por debajo del límite nacional de 100 µg/m³, superan las metas intermedias definidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Las concentraciones más elevadas se observaron en los puntos de monitoreo ubicados en el Palacio Municipal y el Centro Comercial Plaza Belén, donde se excedió la primera meta intermedia de la OMS (40 µg/m³). Además, estaciones como Firestone, Plaza de la Asunción y Hotel Herradura reportaron niveles superiores a 30 µg/m³, sobrepasando la segunda meta intermedia, lo que refleja una exposición relevante al NO₂ en estas zonas específicas.

Para los años 2023 y 2024 se evidenció una reducción significativa en las concentraciones de dióxido de azufre (SO₂), con una disminución del 64 %, lo que representa una mejora importante en la calidad del aire. No obstante, el punto de monitoreo ubicado en las cercanías de la Firestone continúa registrando niveles más altos en comparación al resto. En cuanto al ozono (O₃), si bien las concentraciones registradas en el cantón de Belén se mantuvieron por debajo del valor de referencia establecido por la OMS (60 µg/m³), se detectó un incremento entre 2023 y 2024. Este aumento sugiere que se debe prestar más atención y realizar un análisis más profundo del comportamiento de este contaminante.

Para finalizar, hay que destacar la importancia de fortalecer las acciones orientadas a la reducción y necesidad de aplicar medidas más rigurosas para el control de emisiones, enfocándose en fuentes como el transporte, la actividad industrial y las quemas no controladas, así como reforzar la vigilancia durante la estación seca, cuando suelen presentarse mayores niveles de contaminación. Asimismo, identificar y señalar los principales focos de contaminación por material particulado, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre, con el objetivo de alertar a la población sobre las zonas de mayor riesgo y promover la adopción de medidas preventivas por parte de los ciudadanos.

2. Marco Teórico

El deterioro de la calidad del aire es cada día mayor debido a los modelos de desarrollo urbano adoptados a nivel global; por lo que, la contaminación del aire es una amenaza latente que se incrementa constantemente, afectando incluso a nivel climático. Según datos más recientes de la Organización Mundial de la Salud (OMS), en 2019, el 99% de la población mundial residía en áreas donde la calidad del aire no cumplía con las directrices establecidas por la organización

(OMS, 2024). Además, en 2021, la exposición a la contaminación del aire se asoció con 8,1 millones de muertes a nivel mundial, incluyendo más de 700.000 en niños menores de cinco años (UNICEF, 2024). Estos datos reflejan un incremento significativo en la proporción de la población expuesta a niveles peligrosos de contaminación atmosférica en comparación con años anteriores.

2.1 Contaminación atmosférica

En Costa Rica, la Ley General de Salud define la contaminación atmosférica como “el deterioro de la pureza de la atmósfera por la presencia de agentes de contaminación, tales como partículas sólidas, polvo, humo, vapor, gases, materias radioactivas y otros que el Ministerio de Salud defina como tales, en concentraciones superiores a las permitidas por las normas de pureza del aire aceptadas internacionalmente y declaradas oficiales por el Ministerio” (Ley N° 5395, 1974).

Los contaminantes atmosféricos, se pueden clasificar según su forma de ser emitidos al ambiente en dos categorías: primarios y secundarios (**Figura 1**). Los contaminantes primarios son los que se emiten directamente a la atmósfera desde una fuente natural o antropogénica, dentro de los cuales se encuentran: los óxidos de nitrógeno (NO_x), el dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂) y las partículas en suspensión (PM). Los contaminantes secundarios son los que se forman en la atmósfera como resultado de reacciones químicas en las que intervienen los contaminantes primarios. Entre estos se destacan el ozono (O₃), producto de reacciones fotoquímicas, y las partículas finas, entre otros (Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, s.f.). Los contaminantes generados son dispersados y transportados por el viento hasta llegar a un área receptora en donde ocurre la exposición hacia la población.

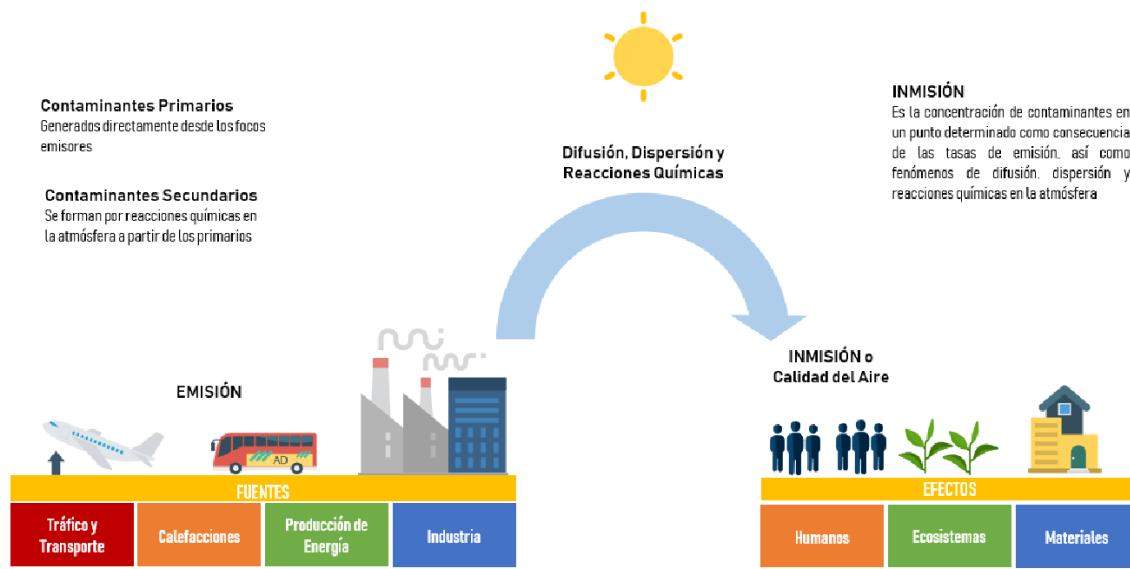


Figura 1. Dispersión y difusión química de contaminantes primarios y secundarios.

Los contaminantes atmosféricos también se pueden clasificar desde el punto de vista epidemiológico, en donde los contaminantes criterio son aquellos normados a los que se les ha establecido un límite máximo permisible de concentración debido a los efectos negativos para la salud humana y dentro de los que se encuentran el ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2), material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) y plomo (Pb) (Comisión federal para la protección contra riesgos sanitarios, 2017). Estos contaminantes son utilizados como criterio para valorar el estado de la calidad del aire. Esto no quiere decir que no puedan existir otros contaminantes de naturaleza tóxica para el ser humano, que aparecen según las circunstancias, provocando otro tipo de afectaciones en la salud. Por ejemplo, metales pesados, compuestos orgánicos volátiles, compuestos orgánicos persistentes, en entre otros. A continuación, se describen algunos de los principales contaminantes criterio.

2.1.1 Dióxido de Nitrógeno

El dióxido de nitrógeno (NO_2) es un gas tóxico e irritante producto en mayor medida de la quema de combustibles derivados del petróleo y en menor medida de la industria química y agropecuaria (Environmental Protection Agency, 2016). En Costa Rica, la principal contribución del NO_2 proviene de fuentes móviles (Herrera, 2015).

Cuando este contaminante se presenta en concentraciones mayores a las recomendadas por la OMS, puede causar daños en el sistema respiratorio y ocasionar irritación, asma, tos y dificultad para respirar. Aunque no se conocen del todo los efectos toxicológicos y epidemiológicos del NO₂ en el ser humano, se conoce que los efectos del dióxido de nitrógeno se producen en los bronquiolos terminales y alvéolos ([Environmental Protection Agency, 2016](#); [Wark & Warner, 2017](#)).

En el ecosistema, el NO₂ reacciona con el agua presente en la atmósfera formando ácido nítrico y nitroso que genera la lluvia ácida, ocasionando un efecto negativo sobre los ecosistemas, alterando el pH de cuerpos de agua y nutrientes del suelo. Además, es un precursor para la formación de ozono troposférico y partículas finas ([Environmental Protection Agency, 2017](#)).

2.1.2 Dióxido de Azufre

El dióxido de azufre (SO₂) es un gas incoloro, no flamable y no explosivo, que se emite al ambiente mediante la combustión de cualquier sustancia que contenga azufre ([Wark & Warner, 2017](#)). Proviene de fuentes antropogénicas como la quema de combustibles en plantas eléctricas e industriales y en menor medida de fuentes naturales como erupciones volcánicas u oxidación de gases sulfurosos, originados por la descomposición de las plantas. La emisión de esta fuente se da principalmente a gran altura o lejos de centros densamente poblados, por lo que su impacto en general es bajo ([Environmental Protection Agency, 2019](#); [Skiba & Parra-Guevara, 2011](#)).

Los efectos a la exposición del SO₂ varían según su duración y concentración, sin embargo; a elevadas concentraciones durante periodos cortos de tiempo, reduce la capacidad pulmonar, causa irritación del tracto respiratorio, bronquitis y congestión de los conductos bronquiales, siendo más sensibles las personas asmáticas o con enfermedades pulmonares obstructivas crónicas (EPOC) y también con problemas cardiacos ([Sbarato & Sbarato, 2015](#)).

Además, el SO₂ reacciona con el agua de la atmósfera, formando ácido sulfúrico, el cual produce lluvia ácida, con los respectivos impactos que ésta tiene sobre la biodiversidad, los suelos, los ecosistemas acuáticos y forestales. Al igual que el dióxido de nitrógeno, el material particulado que se forma producto de las reacciones del SO₂ con agentes atmosféricos producen nieblas que obstaculizan la visibilidad ([Environmental Protection Agency, 2019](#)).

2.1.3 Ozono

El ozono es una molécula compuesta por tres átomos de oxígeno (O_3). Es un gas incoloro con un olor característico y se encuentra de forma natural en la atmósfera de la Tierra, en la capa de ozono estratosférico, donde desempeña un papel crucial al absorber la radiación ultravioleta del sol. Sin embargo, a nivel del suelo (troposférico), el ozono es un contaminante del aire. Se forma a través de reacciones químicas entre compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NO) en presencia de la luz solar (Borsese & Esteban, 2005). Este tipo de ozono, conocido como ozono troposférico, puede ser perjudicial para la salud humana y el medio ambiente. La exposición prolongada al ozono troposférico puede causar problemas respiratorios y que los pulmones sean más susceptibles a las infecciones.

Las altas concentraciones de ozono también pueden ocasionar desde la pérdida de producción y calidad de cultivos, la reducción del crecimiento de los bosques y la vegetación herbácea, alteraciones en la estructura y diversidad de los ecosistemas naturales (Borsese & Esteban, 2005). En ciudades latinoamericanas se ha estudiado el efecto de este reconocido contaminante atmosférico sobre la salud humana, los ecosistemas y el clima (Gálvez-Serna, 2020).

2.1.4 Partículas en suspensión

Las partículas consisten en una mezcla de entidades sólidas y pequeñas gotas de líquidos que se mantienen suspendidos en el aire. Se pueden clasificar de acuerdo con su diámetro aerodinámico aparente en el aire. De esta manera, se tiene el PM_{10} que representa todas aquellas partículas con diámetro aerodinámico igual o menor que 10 micrómetros (μm), mientras que el $PM_{2.5}$ representa todas aquellas con diámetro aerodinámico igual o menor a 2,5 μm (Environmental Protection Agency, 2018).

El material particulado puede ser de origen natural o antropogénico y ser emitido directamente como un contaminante primario o bien como secundario. Puede transportarse grandes distancias por el viento y luego depositarse ya sea en el suelo o el agua, y según su composición química, al depositarse puede generar impactos negativos en el ambiente (Arciniégas, 2012 & European Environment Agency, 2017). Los tamaños de las partículas que generan impactos negativos a la salud son muy pequeños e imperceptibles, siendo PM_{10} y $PM_{2.5}$ los más estudiados (Figura 2).

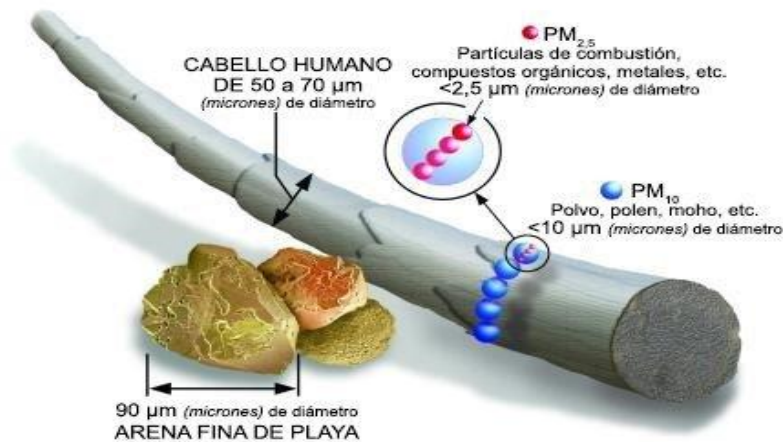


Figura 2. Relación de tamaños del material particulado con respecto a un cabello humano (USEPA).

Se seleccionan estos diámetros, porque a partir de las 10 μm pueden penetrar en las vías respiratorias e incluso en el torrente sanguíneo, por lo que se relaciona con gran cantidad de afectaciones a la salud como enfermedades pulmonares y cardíacas, asma y tos, entre otros (Environmental Protection Agency, 2018 & Environmental Protection Agency, 2018b).

2.2 Calidad del aire

Esta se define por la combinación de las concentraciones ambientales de los contaminantes mayoritarios con respecto a valores límite recomendados. Para medir y reportar la calidad del aire, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés) utiliza el índice de calidad del aire, el cual muestra el riesgo que dicho nivel de contaminación representa para la salud, este índice utiliza categorías codificadas por colores y proporciona declaraciones para cada categoría que le informan al ciudadano sobre la calidad del aire en su área, qué grupos de personas pueden verse afectados y los pasos a seguir para reducir su exposición a la contaminación del aire (AirNow, 2016).

La calidad del aire se ve afectada por otros factores como las condiciones meteorológicas y la topografía, que juegan un papel importante (Molina, 2016). La primera influye en el transporte y concentración de contaminantes en un lugar determinado debido por ejemplo a los patrones atmosféricos de vientos (García-Reynoso, 2009), mientras que, en el segundo, los accidentes

geográficos que constituyen la topografía de un sitio alteran los movimientos atmosféricos, con consecuencias en la distribución de los contaminantes (Centro Europeo de Posgrados, 2018).

La calidad del aire juega un papel importante en diferentes ámbitos. En el económico, una mala calidad del aire afecta la salud de las personas, lo que ocasiona mayores incapacidades y un aumento en el presupuesto destinado a salud (Secretaría del Medio Ambiente, 2017). En el ámbito ambiental, la mala calidad del aire se asocia con mayor contaminación atmosférica que altera la composición de esta con sus respectivas consecuencias tales como lluvias ácidas (Centro Europeo de Posgrados, 2018b). Finalmente, en el ámbito de la salud, la mala calidad del aire es responsable del desarrollo de múltiples enfermedades no transmisibles como cáncer de pulmón, cardiopatías, infecciones de las vías respiratorias y afectaciones crónicas como asma (Organización Panamericana de la Salud, s.f.).

En Costa Rica el estudio de la calidad del aire tiene aproximadamente 40 años, y de manera sistemática, se estudia desde hace 27 años (Murillo & Herrera, 2020), en el 2016 mediante decreto ejecutivo se estableció el Reglamento de Calidad del Aire para Contaminantes Criterio, el cual tiene como objetivo establecer la organización y funcionamiento de la Red Nacional de Monitoreo de la Calidad del Aire; así como los valores máximos de concentración de contaminantes criterio presentes en el aire (Decreto Ejecutivo N° 39951-S, 2016). En este reglamento se establece el Índice Costarricense de Calidad del Aire como medio para facilitar los procesos de información a la ciudadanía sobre el estado de la calidad del aire del país con respecto a los contaminantes criterio, a diferencia del índice estadounidense, este comprende valores de 0 a 100 y se divide en cinco categorías (buena, desfavorable para grupos sensibles, desfavorable, muy desfavorable y peligrosa), así mismo, se establecen las recomendaciones para evitar la afectación por la contaminación del aire. Sin embargo, su aplicación no se ha podido implementar por falta de recursos para la red de monitoreo, por lo tanto, aún es desconocido para la población.

2.3 Métodos de Muestreo de Contaminantes Atmosféricos

Para cuantificar la calidad del aire es necesario realizar mediciones confiables para poder determinar las concentraciones en el ambiente de los diferentes agentes contaminantes. Para realizar estas mediciones, se utilizan distintos métodos que van desde el monitoreo manual tanto activo como pasivo, donde los filtros o tubos de difusión se colocan por un tiempo determinado de

muestreo y luego son retirados manualmente y reemplazados por unos nuevos para la siguiente medición; hasta métodos automáticos que han llegado con el avance tecnológico y que utilizan diversos sensores para medir y almacenar la concentración de los contaminantes en tiempo real (Sbarato & Sbarato, 2015).

A continuación, se describen las tres principales metodologías utilizadas para cuantificar las concentraciones de los contaminantes en cada sitio de muestreo.

2.3.1 Método Pasivo

Es un procedimiento que no utiliza alguna fuente mecánica externa para forzar el aire a través de un medio de captura. La captación de muestras se basa en la difusión de los contaminantes hacia un punto remoción, y tiene su fundamento en los fenómenos de absorción o adsorción en un sustrato químico, usualmente una membrada impregnada con una solución selectiva, la cual se expone por un tiempo definido al aire ambiente del sitio que se desea muestrear y en la cual se captura el contaminante de interés cuya concentración en el aire es proporcional cantidad absorbida o adsorbida. Así, una vez recolectada la muestra, se puede realizar el análisis de contaminante en el laboratorio químico y estimar su concentración (Carrales & Chairez, 2019). Los equipos utilizados se conocen como muestreadores pasivos que se presentan en diversas formas y tamaños, principalmente en forma de tubos (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2010)

Las ventajas de este método son la simplicidad operativa del sistema, lo que reduce la probabilidad errores en el muestreo, además de no ser necesarias actividades de mantenimiento y calibración de bombas de aire, lo que hacen de este método uno de bajo costo. También se caracterizan por ser muestreos acumulados que emplean tiempos de muestreo relativamente prolongados que pueden variar de semanas a meses. Por otro lado, entre sus limitaciones, se cuenta que este método no está desarrollado para todos los contaminantes, proporciona promedios con resoluciones temporales altas y no tiene gran exactitud arrojando usualmente valores referenciales (Canciano-Fernández, Reinos-Valladares, Ordoñez-Sánchez, & Hernández-Garcés, 2017).

2.3.2 Método Activo

El método activo se diferencia del pasivo en que el aire se fuerza a través del medio colector por lo que se requiere de energía eléctrica para bombear el aire. El volumen adicional de aire muestreado que se obtiene con este método incrementa la sensibilidad, lo que permite obtener mediciones diarias promedio, incluso horarias en algunos casos (Carrales & Chairez, 2019).

Existen diferentes tipos de muestreadores activos: los que captan volúmenes pequeños o grandes, y se emplean para la toma de muestras de partículas en suspensión y muestras de gases, ya sea de manera separada o simultánea. Los captadores de partículas de alto volumen suelen usarse para la determinación gravimétrica de partículas en suspensión de distintos tamaños, donde se contabiliza el tiempo y volumen de muestreo, así como la masa de partículas depositadas en el filtro para poder determinar la concentración de material particulado. Estas partículas también pueden ser sometidas a otros análisis químicos para determinar su composición o la presencia de compuestos químicos específicos como metales o iones. Y los captadores de compuestos orgánicos volátiles, los cuales suelen operarse con flujos pequeños para no saturar el medio adsorbente, los cuales operan de manera similar a los otros muestreadores activos, variando el medio colector para captar uno o varios compuestos orgánicos (Carrales & Chairez, 2019).

Las ventajas de este sistema es que son fáciles de operar, confiables y ampliamente utilizados, sin embargo, entre sus desventajas figura el precio, ya que son más caros y complejos que los muestreadores pasivos tanto en operación como en mantenimiento. Además, no se pueden determinar los valores mínimos y máximos durante el tiempo de muestreo, sólo promedios, generalmente de varias horas (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2010).

2.3.3 Método Automático

Una de las ventajas que presentan estos sistemas es que pueden medir una gran variedad de contaminantes de manera simultánea en tiempo real (minuto a minuto). Usualmente se componen de dos sistemas, un analizador automático que determina la concentración de gases contaminantes con base en sus propiedades físicas o químicas y un monitor de partículas que permite determinar la concentración de partículas suspendidas (PM_{10} y $PM_{2.5}$). Otra ventaja que presentan estos sistemas es que, al medir de manera continua, permiten la detección de concentraciones máximas,

lo que permite identificar condiciones de alerta con mayor facilidad. Pese a sus múltiples beneficios, estos sistemas suelen tener un costo elevado tanto de adquisición como de mantenimiento y calibración y suelen requerir de personal capacitado para su manejo (Carrales & Chairez, 2019).

3. Metodología

El monitoreo de la calidad del aire para los años 2023-2024 en la gran área metropolitana se ejecutó mediante distintos métodos, entre los cuales están el muestreo manual de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, el uso de estaciones automáticas y la utilización de sistemas de difusión pasiva para el monitoreo de la concentración de dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3) y dióxido de azufre (SO_2). Los puntos de monitoreo se ubican dentro de la provincia de Heredia, Alajuela y San José con variaciones según el tipo de contaminante atmosférico monitoreado (**Figura 3**).

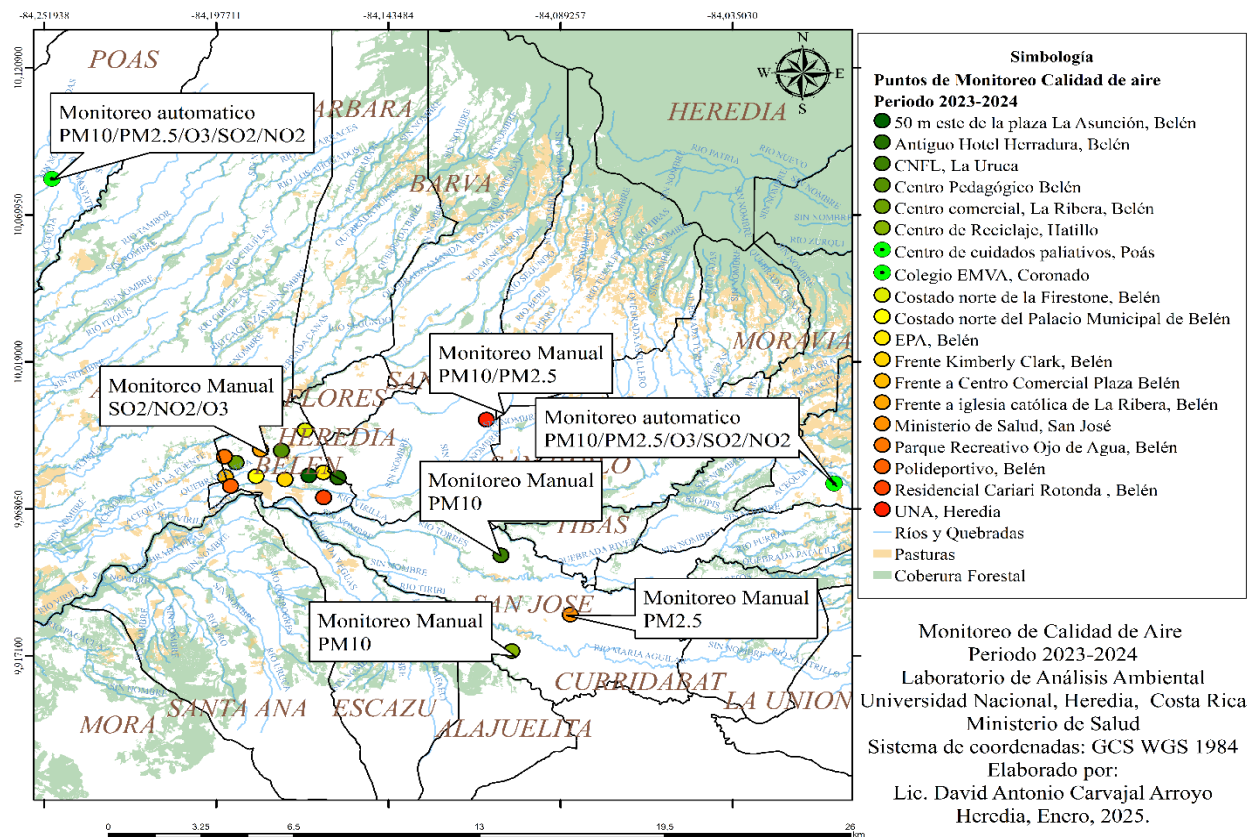


Figura 3. Puntos de monitoreo de calidad de aire en las provincias de San José, Heredia y Alajuela, 2023-2024

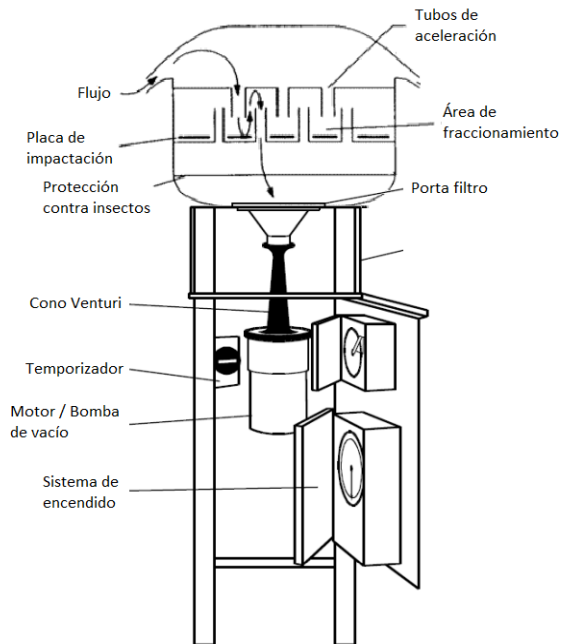
La frecuencia de los muestreos varía dependiendo de la metodología de trabajo en cada una de las redes de monitoreo. La red manual para el monitoreo de PM₁₀ y PM_{2.5} mantiene una frecuencia de muestreo de 3 veces por semana en períodos de (24 ± 1) horas, mientras que la red pasiva posee una frecuencia de aproximada de 21 días entre una muestra y otra; por otra parte, la red automática, por su forma de funcionamiento, opera de manera continua con almacenamiento de datos en tiempo real.

3.1 Red Manual

La determinación de la concentración de PM₁₀ y PM_{2.5} se lleva a cabo empleando un método gravimétrico en el cual las partículas se hacen pasar a través de un filtro de fibra de vidrio o cuarzo de 8 x10 pulgadas, donde son retenidas para su posterior traslado al laboratorio y cuantificación. La concentración se determina a partir de la relación entre la diferencia de masa producto de la acumulación de las partículas recolectadas sobre la superficie del filtro y el volumen de aire que se hizo pasar a través de este en un período de (24 ± 1) horas.

La toma de la muestra se realiza utilizando un muestreador de alto volumen que cuenta con un controlador de flujo tipo Venturi y un motor de alta capacidad que permite succionar el aire ambiente a un flujo de (1,13 ± 10 %) m³ min⁻¹, brindándole al sistema una configuración de flujo volumétrico (**Figura 4**). Una vez que las partículas entran por la parte superior del cabezal son dirigidas a los tubos de aceleración donde adquieren la velocidad necesaria para alcanzar la placa de impactación donde se lleva a cabo la separación de las partículas gruesas (> 10 μm o > 2.5 μm según sea el caso), mientras que las partículas finas continúan su trayectoria hasta ser retenidas sobre el filtro.

La determinación de la masa de los filtros se realiza en el laboratorio en donde son previamente acondicionados antes y después de la toma de muestra, posteriormente se mide la masa por medio de una balanza analítica cuya resolución debe ser mayor o igual a 0,1 mg. El volumen de aire que se hace pasar por el filtro es determinado de forma indirecta al calcular el flujo de muestreo y un medidor de tiempo calibrado, y este es corregido por las condiciones de presión y temperatura de campo para finalmente expresar el resultado bajo condiciones estándar (25 °C y 1 atm) de acuerdo con lo estipulado en el reglamento.



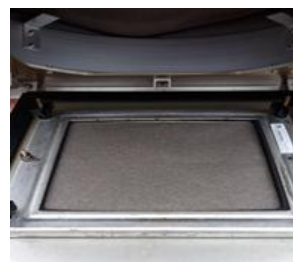
Fuente: Adaptado de www.tisch-env.com

Figura 4. Esquema de un muestreador de alto volumen para PM₁₀.

En la **Figura 5** se puede observar el proceso de instalación y recolección del filtro en el muestreador de alto volumen.



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Filtro colector de material particulado (a) antes del muestreo y (b) después de 24 horas.

Para los años 2023-2024, la red manual de monitoreo de material particulado contó con alrededor de cinco sitios ubicados en los cantones de San José (2), Heredia (1) y Belén (2).

En el **Cuadro 1** se muestra la ubicación de los equipos y el tipo de partícula monitoreado mientras que la **Figura 6** muestra la distribución espacial de los puntos que actualmente se encuentran activos.

Las labores de muestreo se hacen en conjunto entre el Ministerio de Salud y el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional (LAA-UNA), y con el apoyo de RECOPE y algunos municipios.

Cuadro 1. Sitios de monitoreo de la red manual ubicadas dentro del Gran Área Metropolitana de Costa Rica.

Red de monitoreo manual		
Localización	Código	Contaminante
Catedral Metropolitana ¹	SJ-01	PM ₁₀
Sección de Parques, Municipalidad de San José (MSJ) ¹	SJ-02	PM ₁₀
Centro de Reciclaje MSJ, Hatillo ¹	SJ-03	PM ₁₀
CNFL, La Uruca	SJ-04	PM ₁₀
Sede UTN, Alajuela ¹	AL-01	PM ₁₀
La Ribera, Belén	BE-01	PM ₁₀
Estación del Ferrocarril, Cartago ¹	CA-01	PM ₁₀
Municipalidad de Escazú ¹	ES-01	PM ₁₀
Policía Municipal San Antonio de Escazú ¹	ES-02	PM ₁₀
Plantel Municipal de San José ¹	SJ-05	PM _{2.5}
Ministerio de Salud, San José	SJ-06	PM _{2.5}
EPA, Belén	BE-02	PM _{2.5}
UNA, Heredia	HE-01	PM ₁₀ / PM _{2.5}

¹ Sitio salió de actividad por falta de recursos y apoyo logístico para mantenerlo en funcionamiento.

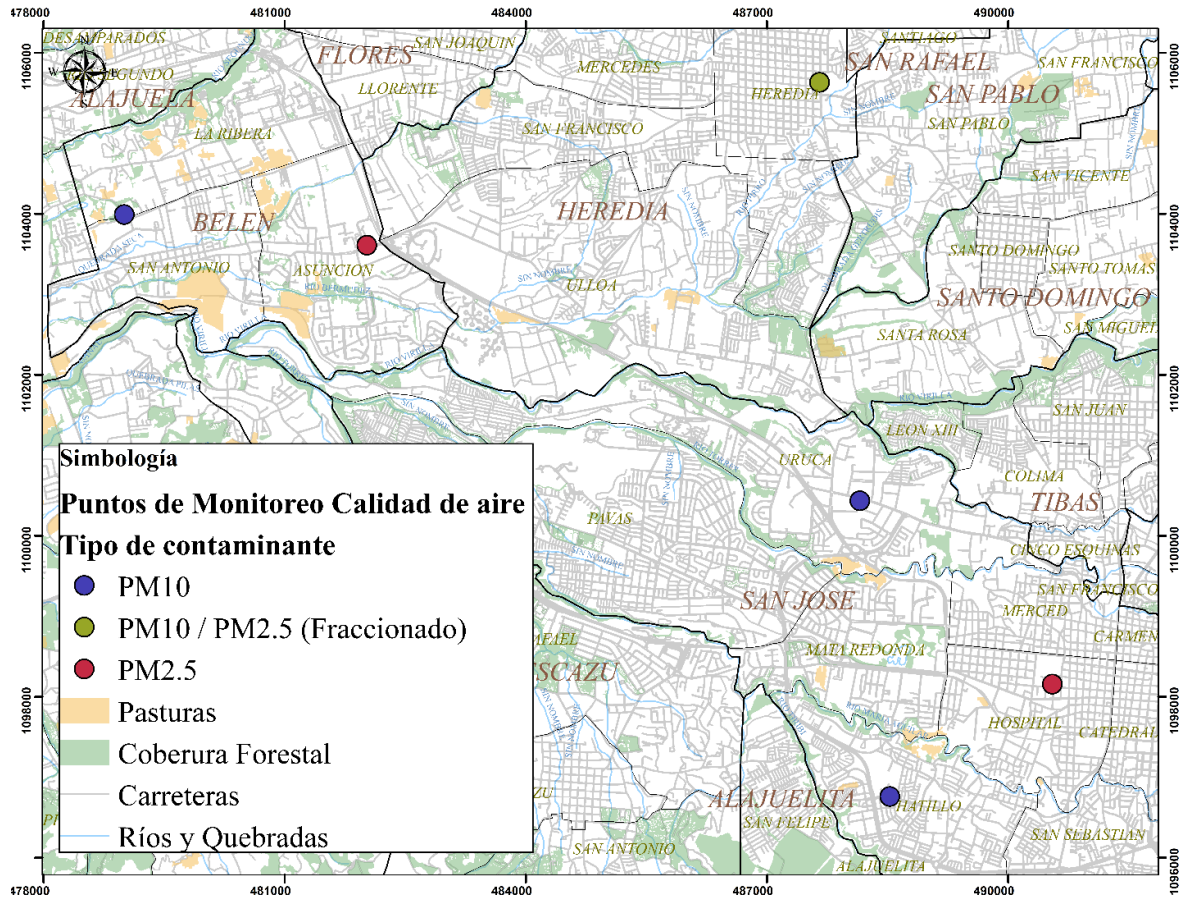


Figura 6. Distribución espacial de la red de monitoreo manual del material particulado. Fuente: Elaboración propia.

3.2 Red Pasiva

El muestreo pasivo de dióxido de nitrógeno (NO₂) consistió en colocar en cada uno de los sitios de monitoreo, 4 tubos de difusión provistos con mallas previamente tratadas con una mezcla absorbente de trietanolamina/acetona; en el caso del muestreo de dióxido de azufre (SO₂), en cada uno de los sitios son colocados dos sistemas de captura provistos de filtros de membrana tratados previamente con una disolución absorbente de carbonato de sodio. En ambos casos, los sistemas son colocados en campo a una altura de entre 2 y 3 metros con respecto al suelo, y por un período de (21 ± 1) días, permitiendo que los contaminantes de interés difundan de manera natural por cada uno de los sistemas de captura donde son absorbidos y convertidos a una especie químicamente estable, para su posterior análisis en el laboratorio.

Una vez en el laboratorio, las muestras de NO₂ son tratadas con el reactivo de Griess-Saltzman para analizar su concentración por la técnica de espectrofotometría visible a una longitud de onda de 543 nm. Una vez conocidas las concentraciones de las muestras analizadas se utiliza el volumen de extracción, el tiempo de muestreo y el coeficiente de difusión del gas para estimar su concentración en el aire y expresarla finalmente en microgramos por metro cúbico (µg/m³).

Para la determinación de la concentración de SO₂, los filtros absorbentes se tratan con una disolución extractora de peróxido de hidrógeno (H₂O₂) capaz de oxidar la muestra completamente hasta el ion sulfato el cual posteriormente es analizado mediante la técnica de cromatografía de iones. Una vez conocida la concentración de sulfato en las muestras es posible calcular la cantidad de SO₂ presente en la muestra original para posteriormente determinar la concentración en aire a partir del volumen de extracción, el tiempo de muestreo y el coeficiente de difusión del gas.

En el cuadro 2 se detallan los sitios de muestreo de la red pasiva.

Cuadro 2. Sitios de monitoreo en la red pasiva en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica.

Monitoreo pasivo en el cantón de Belén

Localización	Código	Localización	Código
Frente a Centro Comercial Plaza Belén	BEN-01	Centro Pedagógico Belén	BEN-02
Costado norte del Palacio Municipal de Belén	BEN-03	Costado norte de la Firestone	BEN-04
Parque Recreativo Ojo de Agua	BEN-05	Antiguo Hotel Herradura	BEN-06
Frente a iglesia católica de La Ribera	BEN-07	Frente Kimberly Clark	BEN-08
50 m este de la plaza La Asunción	BEN-09	Polideportivo Belén	BEN-10
Residencial Cariari Rotonda	BEN-11		

Para la medición de NO₂ y SO₂ mediante los sistemas de difusión pasiva, el Laboratorio de Análisis Ambiental coordina con la Municipalidad de Belén para la colocación y retiro de los sistemas de muestreo.

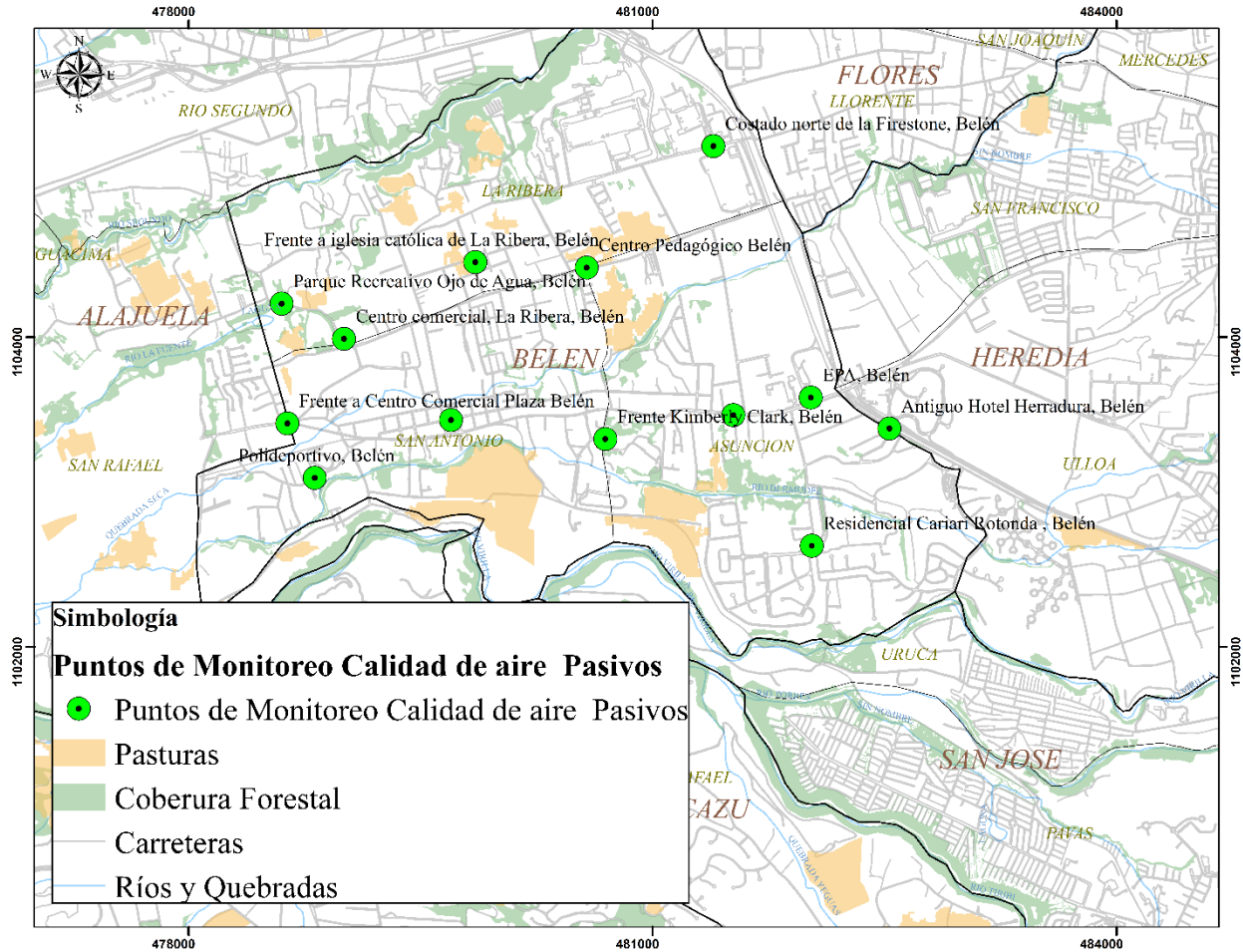


Figura 7. Distribución de puntos de la Red Pasiva en el Cantón de Belén. Fuente: Elaboración propia.

3.3 Red Automática

De manera complementaria a las redes manual y pasiva, existe una red automática que cuenta con estaciones de monitoreo en tiempo real para la medición de diferentes contaminantes. Como parte del esquema de monitoreo se destaca la medición de material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), monóxido de carbono (CO), compuestos nitrogenados (NO , NO_2 , NO_x) y óxidos de azufre (SO_2). Para la cuantificación de estos contaminantes se utilizan equipos altamente especializados provistos de sistemas de detección específicos según el tipo de contaminante, destacando el sistema de detección del tipo infrarrojo no dispersivo para la determinación del monóxido de carbono, quimioluminiscencia para la

determinación de compuestos nitrogenados y fluorescencia para la determinación de compuestos azufrados.

La red automática cuenta con 4 estaciones de monitoreo: dos del Ministerio de Salud, una de OVSICORI-UNA y una de RECOPE. Sin embargo, para el período 2023-2024, las estaciones del Ministerio de Salud estuvieron fuera servicio por fallos de los equipos y la falta de recursos para la compra de insumos. Esto último debido a los ajustes presupuestarios que se dieron posteriores a la pandemia del COVID19. En el caso de RECOPE, la estación se encontraba en un proceso de mantenimiento de la instalación eléctrica y de los mismos equipos. Solo se cuentan con datos de algunos contaminantes medidos en el plantel de Ochomogo. La estación OVSICORI-UNA es la que estuvo funcionando de forma más continua, razón por lo cual se incluyeron los datos que esta recolectó para: $PM_{2.5}$, PM_{10} y SO_2 . Esta estación está ubicada en las instalaciones del Colegio EMVA en San Isidro de Coronado y representa las condiciones de calidad del aire en una zona mayoritariamente de tipo residencial con baja-media actividad vehicular.

Los datos recopilados de las estaciones deben ser validados mediante la identificación de datos extremos y comportamientos temporales o estacionales anómalos, por lo que inicialmente se ejecuta una depuración de los datos que no son válidos de acuerdo con las banderas asignadas en los sistemas de recopilación de datos de cada analizador y dentro de las cuales se incluyen comúnmente fallas eléctricas o de comunicación en los sistemas, fallas en los equipos de medición o fallas en las calibraciones o por mantenimientos.

Una vez realizada la depuración por banderas, se utilizan gráficas de series de tiempo para identificar saltos abruptos en la magnitud del parámetro que se mide o comportamientos atípicos de los contaminantes. Esto puede deberse a cambios en el funcionamiento del sensor o analizador. También con las series de tiempo se conoce la existencia de valores extremos de corta o larga duración, así como corrimientos en la línea base y valores constantes por periodos extensos de tiempo.

Una vez tratados los datos, las gráficas temporales permiten observar perfiles de los contaminantes, los cuales pueden ser diarios, horarios o con una escala temporal mayor. Posteriormente con ayuda de lo estipulado en el Reglamento de Calidad del Aire para

Contaminantes Criterio DE-39951-S (2016), se analizan los valores medidos y se contrastan los resultados con los límites reglamentarios para establecer su validez y admisibilidad, así como verificar el cumplimiento con la norma.

3.4 Aseguramiento de la Calidad

Para el caso de la red de monitoreo manual, se realiza una calibración del flujo de muestreo en cada uno de los muestreadores de alto volumen de PM₁₀ y PM_{2.5}. El equipo se calibra cada seis días de muestreo por medio de un calibrador de flujo capaz de simular la carga (caída de presión) en al menos tres puntos dentro del ámbito de trabajo del equipo, de manera que se pueda construir una curva de calibración cuyo coeficiente de correlación debe ser mayor o igual a 0,995. Adicionalmente, se llevan controles sobre la medición de masa del filtro que se hace en el laboratorio, y otros instrumentos que sea emplean.

Los análisis de NO₂ y SO₂ de la red pasiva se realizan empleando las técnicas instrumentales ya mencionadas (espectrofotometría visible y cromatografía de iones respectivamente), las cuales implican la construcción de curvas de calibración a partir de materiales de referencia certificados y cuyo coeficiente de correlación deberá ser mayor o igual a 0,9950. A partir de dicha curva se realiza la cuantificación de las muestras por medio de interpolación para posteriormente calcular la concentración en aire.

Algunos de estos ensayos se encuentran acreditados bajo la Norma ISO/IEC 17025:2017 por parte del Ente Costarricense de Acreditación (ECA). En la página www.eca.or.cr se puede consultar el alcance de acreditación vigente del Laboratorio de Análisis Ambiental.

En cuanto a la red automática, las estaciones de monitoreo automático de calidad del aire cuentan con criterios que consideran diferentes tipos de controles tales como críticos, operacionales y sistemáticos. Como parte del control crítico, se realiza una comprobación con gases de concentración certificada (Protocolo EPA), para lo cual se revisa de forma rutinaria la respuesta del equipo en dos puntos: aire cero (aire purificado libre de contaminantes) y “span” (mezcla del contaminante y aire entre un 70-90 % del rango de medición del equipo). A nivel operacional, se realiza la calibración multipunto con la finalidad de comprobar la veracidad y linealidad de los analizadores en el rango de trabajo, para lo cual se utiliza el mismo gas patrón de concentración

conocido, pero realizando distintas diluciones. Si ambos controles no son satisfactorios, se deben realizar los ajustes de la respuesta del equipo y comprobar nuevamente el cumplimiento de los criterios establecidos. La frecuencia de los controles críticos y operacionales corresponde a diaria y cada 3 meses respectivamente; en el **Cuadro 3** se resumen además los criterios de aceptación y acciones requeridas en cada caso.

Cuadro 3. Criterios de frecuencia y aceptación para los controles de calidad de los analizadores de gases.

Actividad	Frecuencia	Criterio de Aceptación	Acción requerida
Comprobación de 2 puntos (cero y span)	Diaria	< 5 %	No se requiere calibrar
		5 – 10 %	Calibración opcional
		> 10 %	Debe calibrarse
Calibración multi-punto	Cada 3 meses o cuando se requiera	< 2 % en cada punto	Revisión general y ajuste del equipo

El incumplimiento de alguno de estos criterios podría invalidar la información recolectada en un periodo determinado, previa valoración de la causa e impacto del problema.

Sobre los controles de tipo sistemático, estos son importantes para la correcta interpretación de los datos pero que normalmente no impactan la validez de los resultados en un periodo de tiempo, pero sí podrían afectar su incertidumbre. Entre estos controles están la evaluación de la precisión y el error a largo plazo, así como el tratamiento de los datos recolectados.

Es importante mencionar que, de forma paralela a las acciones de control de calidad, se llevan a cabo otras actividades relacionadas al mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos. Algunas de las acciones incluyen la revisión de daños externos e internos, reemplazo por desgaste de partes, sustitución de filtros de protección, limpieza de los colectores de las muestras gaseosas (“manifold” y tuberías), mantenimiento de las bombas de vacío y problemas de comunicación de los equipos, entre otros.

4. Resultados

4.1 Monitoreo Manual

Con respecto a las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ interanuales y su comparativa con respecto a los límites máximos permitidos en Costa Rica según (Decreto Ejecutivo N° 39951-S, 2016) se observa que en algunos años se superaron los límites mientras que en otros años se mantiene por debajo. En general la tendencia de estos contaminantes en los últimos años ha sido de disminución en la mayoría de los puntos de muestreo (**Cuadro 4**).

El monitoreo en Heredia (Heredia, UNA) se distingue por registrar el promedio más alto de PM_{10} durante el periodo analizado (2010-2024), con una media de $32,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En varios años, superó el límite de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, destacando 2010 ($56 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 2011 ($45 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 2012 ($42 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 2013 ($46 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 2014 ($45 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 2016 ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2019 ($36 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Por su parte, la estación de San José (Uruca) también presenta niveles elevados, con un promedio de $27,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Superó el umbral de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2010 ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 2013 ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 2014 ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 2015 ($33 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 2016 ($31 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2020 ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

En Belén (La Ribera), el promedio general es de $27,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, situándose cerca del límite establecido. Esta estación superó los $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2010 ($34 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 2012 ($32 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 2013 ($36 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 2016 ($34 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2020 ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Las estaciones de San José (Catedral Metropolitana) y San José (Hatillo) presentan promedios ligeramente inferiores, con $20,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $25,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Catedral Metropolitana no superó el límite en ningún año de monitoreo mientras que en Hatillo se superó en 2010 ($37 \mu\text{g}/\text{m}^3$). La estación de Alajuela (AL-01) registró un promedio de $22,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, superando el límite solo en 2015 con $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En Cartago (CA-01), el promedio fue de $23,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sin registros que indiquen valores por encima del límite en los años disponibles. Las estaciones de Escazú (ES-01 y ES-02) mostraron los valores más bajos, con $21,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $16,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. ES-01 no superó el límite en los años analizados, mientras que ES-02 cuenta solo con datos de 2020.

En general, se observa una tendencia a la baja en los niveles de PM_{10} en la mayoría de las estaciones durante los años recientes (2021-2023), con valores por debajo del límite en muchos casos. Ejemplo de ello son HE-01 (2021: $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2022: $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2023: $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$), SJ-01 (2021: $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2022: $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$), SJ-03 (2021: $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2022: $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2023: $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$), SJ-04 (2021: $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2022: $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2023: $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$), AL-01 (2021: $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2022: $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$), BE-01 (2021: $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2022: $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2023: $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$), CA-01 (2021: $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2022: $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y ES-01 (2021: $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2022: $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$). No obstante, es importante considerar la falta de datos completos en algunas estaciones para los años más recientes.

El monitoreo de los niveles de PM_{10} es fundamental, ya que la exposición prolongada a concentraciones superiores al límite recomendado puede afectar la salud de la población. Partículas finas como el PM_{10} pueden provocar enfermedades respiratorias, agravar condiciones preexistentes como el asma y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) y aumentar el riesgo de enfermedades cardiovasculares. Por ello, la reducción sostenida de estos niveles es un indicador positivo para la calidad del aire y la salud pública en general.

Con respecto al material particulado de $PM_{2.5}$ y considerando el límite máximo anual permitido de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se observa que la mayoría de los puntos de muestreo con datos disponibles han superado este umbral en múltiples años.

Cuadro 4. Evolución de los promedios anuales de concentración de partículas PM₁₀ y PM_{2.5} medidas en los sitios de muestreo correspondientes.

Sitios de muestreo	Promedio anual (µg/m ³)														
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
PM₁₀															
SJ-01	28	24	27	23	21	23	23	24	21	19	18	14	9	-	-
SJ-02	28	26	29	27	27	24	24	23	22	24	22	20	18	-	-
SJ-03	37	32	27	29	25	26	26	25	20	19	20	18	15	21 ^a	-
SJ-04	35	32	29	30	30	33	31	30	24	28	30	27	24	21 ^b	23
AL-01	25	26	22	27	21	30	25	23	18	21	24	16	16	-	-
BE-01	34	33	32	36	29	30	34	32	25	24	30	20	18	22	23
CA-01	28	28	25	26	24	26	27	22	23	24	21	18	12	-	-
ES-01	22	23	23	22	24	26	24	24	-	-	-	13	7	-	-
ES-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16	-	-	-	-
HE-01	56	45	42	46	45	35	50	36	30	36	29	17	23	21 ^c	20 ^d
PM_{2.5}															
SJ-05	-	-	-	22	25	24	33	-	-	-	-	-	-	-	-
SJ-06	-	-	-	-	-	-	-	26	22	22	29	14	17	10	10
BE-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18	10	12	10	11
HE-01	-	-	-	-	-	-	21	20	23	27	22	13	18	16 ^c	17 ^d

^a Representa el promedio del 16 de enero al 21 de junio de 2023, ^b Representa el promedio del 21 de agosto al 6 de diciembre de 2023,

^c Representa el promedio del 16 de enero al 30 de agosto, ^d Representa el promedio del 14 de octubre al 10 de diciembre.

En Catedral Metropolitana, las concentraciones excedieron el límite en 2013 (22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2014 (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2015 (24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2016 (33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). En punto ubicado cerca del Ministerio de Salud en San José, los valores superaron los 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2017 (26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2018 (22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2019 (22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2020 (29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2022 (17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). En La Ribera de Belén, con datos a partir de 2020, también rebasó el límite ese año con 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Nuevamente destaca la estación HE-01 (Heredia), donde se registraron valores superiores al umbral en casi todos los años con datos disponibles, incluyendo 2016 (21 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2017 (20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2018 (23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2019 (27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2020 (22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 2022 (18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y un valor alarmante de 163 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2023, seguido de 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2024 (**Cuadro 4**).

Estos resultados sugieren una calidad del aire preocupante en términos de $\text{PM}_{2.5}$, especialmente en Heredia, lo que representa un riesgo significativo para la salud de la población. No obstante, los valores anuales se basan en el promedio de exposición durante todo el año para prevenir efectos crónicos, mientras que el límite de 24 horas se enfoca en evitar episodios breves de alta concentración. Por ende, el análisis de valores diarios también es importante para la determinación de efectos agudos en la población

4.1.1 Concentración de PM_{10}

Contrario a lo registrado en años anteriores durante el monitoreo del 2023-2024 la concentración de PM_{10} mantuvo un promedio anual inferior al límite de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ cumpliendo con (Decreto Ejecutivo N° 39951-S, 2016). No obstante, al comparar los promedios anuales con respecto a los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud todos los puntos de monitoreo superan el límite sugerido de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En cuanto a los valores máximos de exposición de 24 horas establecidos para Costa Rica en 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y para la OMS en 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, los resultados de los puntos de monitoreo fueron inferiores a estos umbrales en el 98% de los datos del 2023 y el 99 % del 2024 (**Figuras 8-14**). Este límite está diseñado para proteger frente a picos agudos de contaminación que pueden provocar efectos inmediatos o exacerbaciones en personas sensibles, como crisis respiratorias o irritaciones agudas.

Que el promedio anual supere los 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pero los valores diarios de 24 horas se mantengan por debajo de 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ significa que, aunque no se registran picos agudos de contaminación en días

individuales, la exposición a lo largo del año es de manera continua y moderadamente elevada. Esto implica que la ciudad no enfrenta episodios extremos en cortos periodos, pero la persistencia de niveles superiores al umbral anual recomendado puede aumentar el riesgo de efectos crónicos en la salud, como problemas respiratorios y cardiovasculares, debido a la exposición acumulativa.

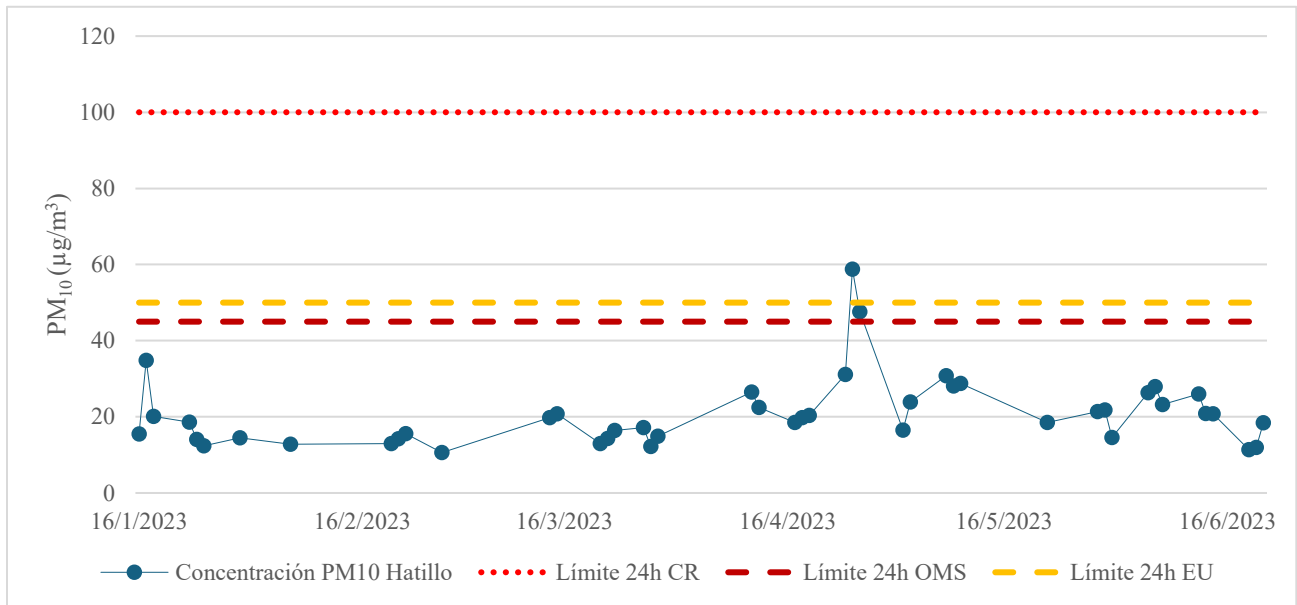


Figura 8. Concentración material particulado PM₁₀ en el punto PI-003 en Hatillo, San José, 2023.

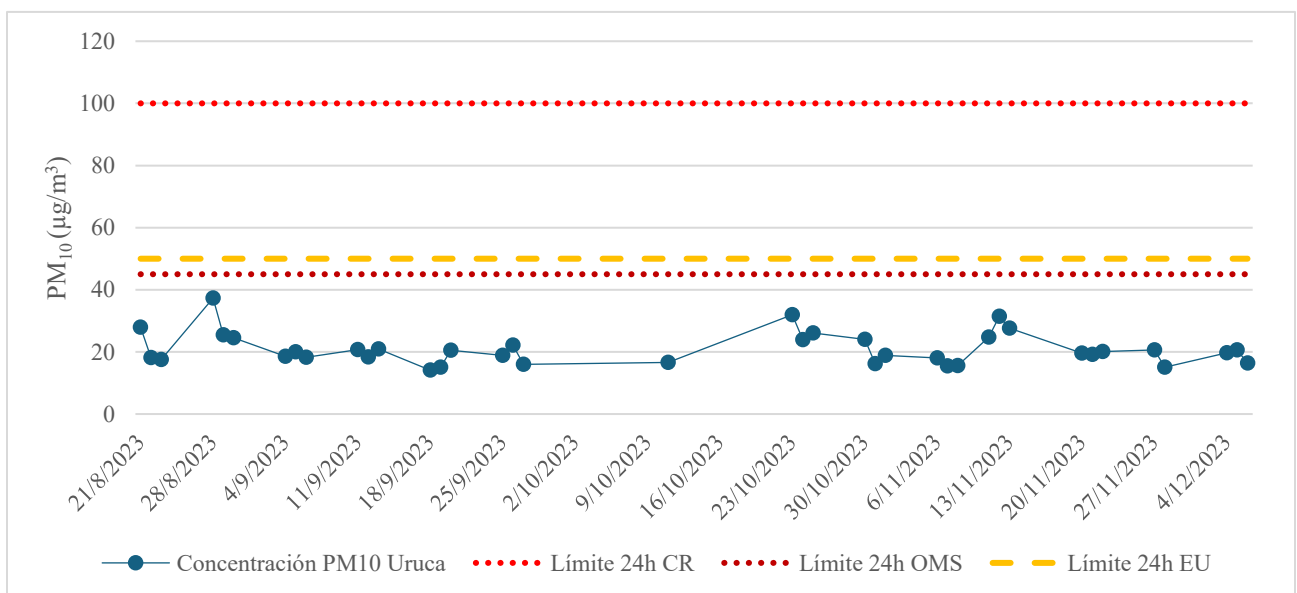


Figura 9. Concentración material particulado PM₁₀ en el punto PI-004 en Uruca, San José, 2023.

En los puntos de Hatillo en San José (**Figura 8**), La Ribera en Belén (**Figura 11**) y el de Heredia (**Figura 13**) los valores que sobrepasaron el límite de 24 horas se registraron en el mes de abril durante la época seca. Durante la época seca, el límite diario de exposición al PM₁₀ suele superarse con mayor frecuencia debido a una combinación de factores meteorológicos y fuentes de emisión. La ausencia de lluvia impide que las partículas en suspensión se depositen en el suelo, lo que facilita su acumulación en el aire (Ministerio Demográfico para la Transición Ecológica y el Reto, 2023). Además, el suelo seco y suelto favorece la resuspensión del polvo debido al viento y al tráfico vehicular, incrementando la concentración de material particulado.

A esto se suman los incendios y la quema de biomasa, actividades más frecuentes en la temporada seca, que generan grandes cantidades de partículas en el aire (Agencia SINC, 2024). Asimismo, las condiciones atmosféricas, como la estabilidad térmica y la menor velocidad del viento, reducen la dispersión de contaminantes, favoreciendo su permanencia en la atmósfera (AirNow, 2016). En algunas regiones, eventos climáticos específicos, como tormentas de polvo o inversiones térmicas, agravan aún más la situación (Universidad Técnica de Oruro, 2022). Finalmente, el aumento del tráfico vehicular y la actividad industrial en ciertos periodos de la estación seca contribuyen adicionalmente a la emisión de partículas. En contraste, durante la época lluviosa, la precipitación ayuda a limpiar el aire, reduciendo la concentración de PM₁₀ y disminuyendo la probabilidad de superar los límites diarios de exposición recomendados (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023).

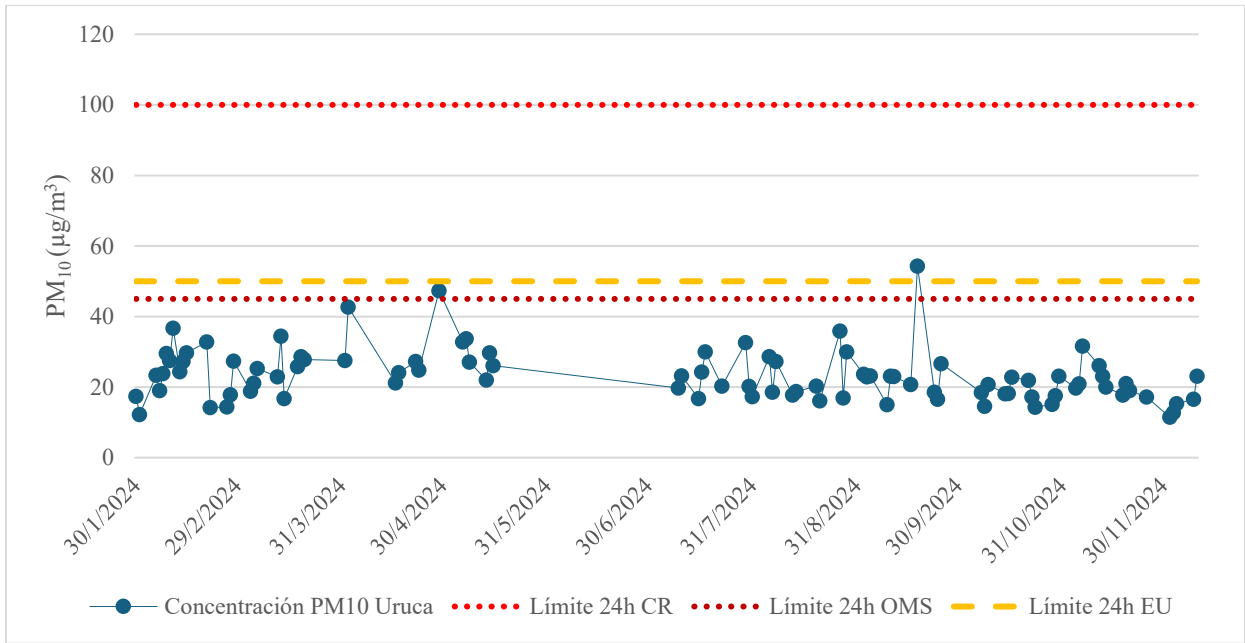


Figura 10. Concentración material particulado PM_{10} en el punto PI-004 en Uruca, San José, 2024.

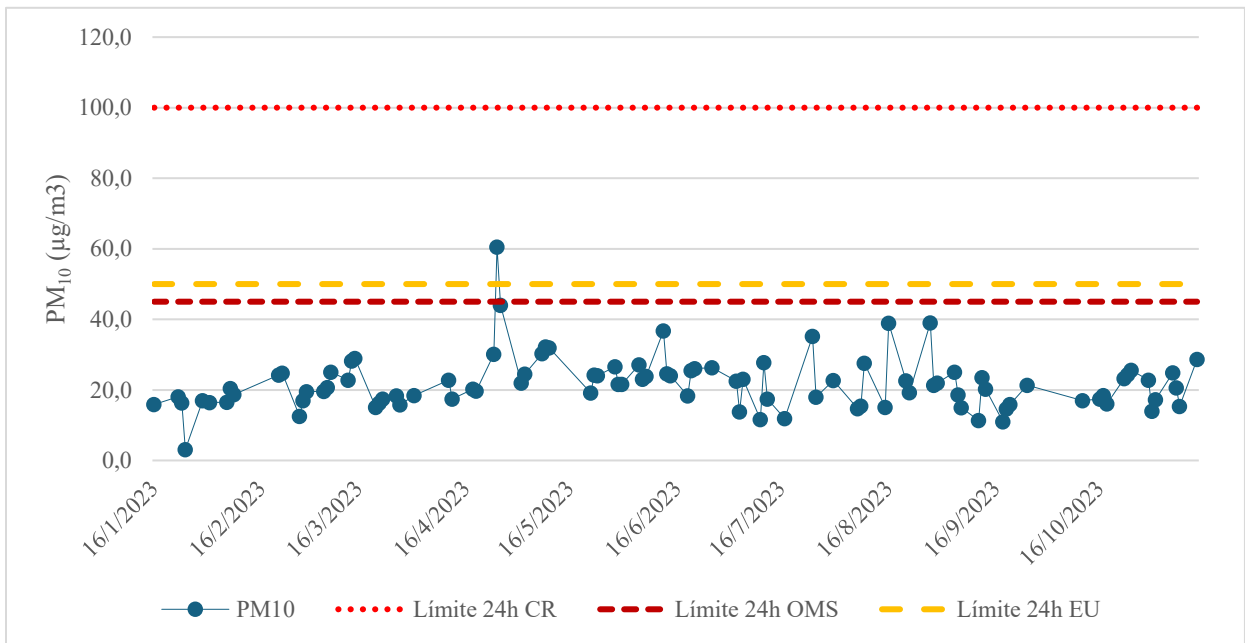


Figura 11. Concentración material particulado PM_{10} en el punto PI-018 en Belén, San José, 2023.

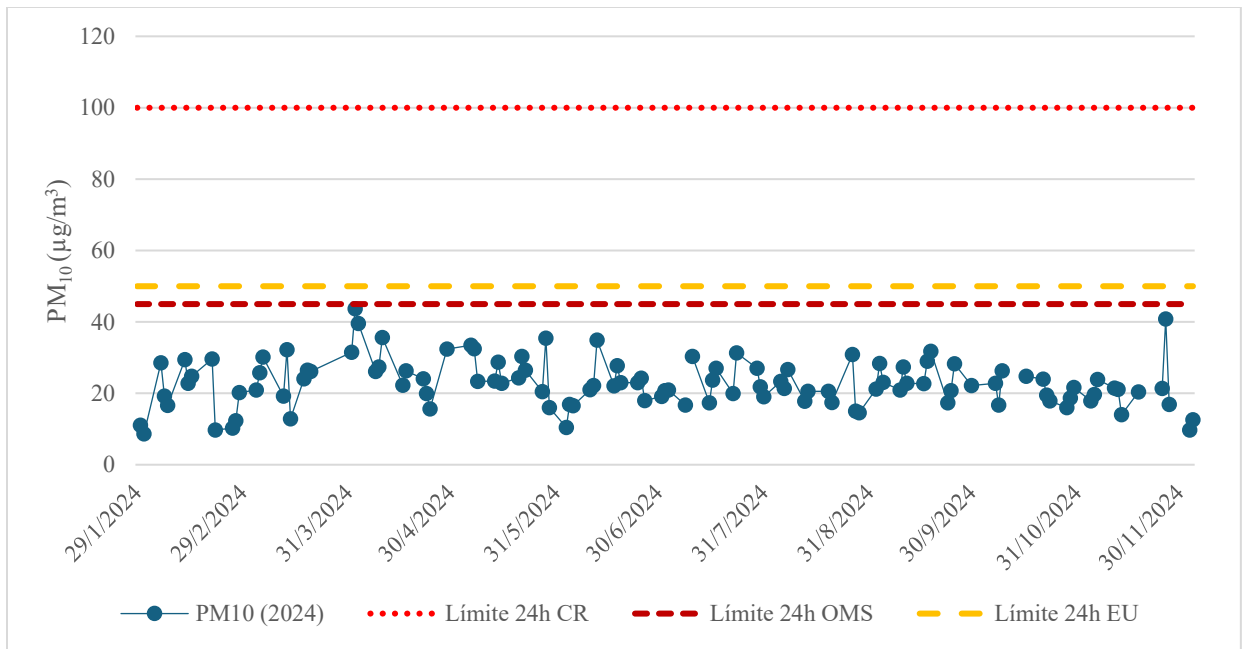


Figura 12. Concentración material particulado PM_{10} en el punto PI-018 en Belén, San José, 2024.

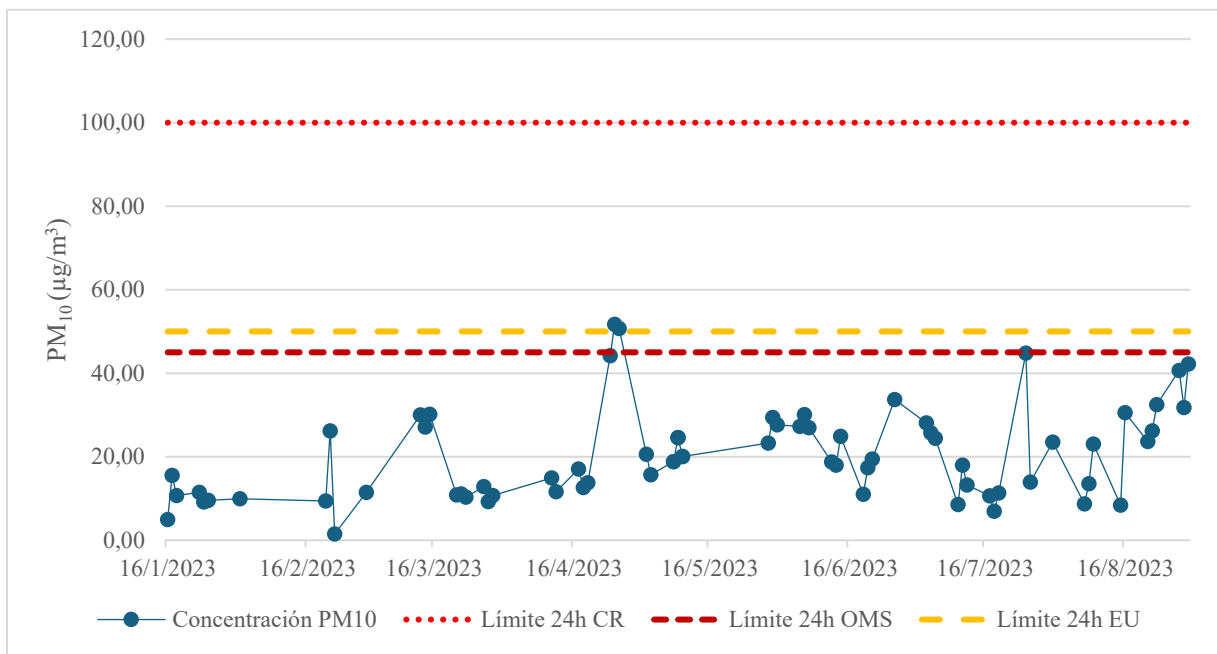


Figura 13. Concentración material particulado PM_{10} en el punto PI-025 en Heredia, Heredia, 2023.

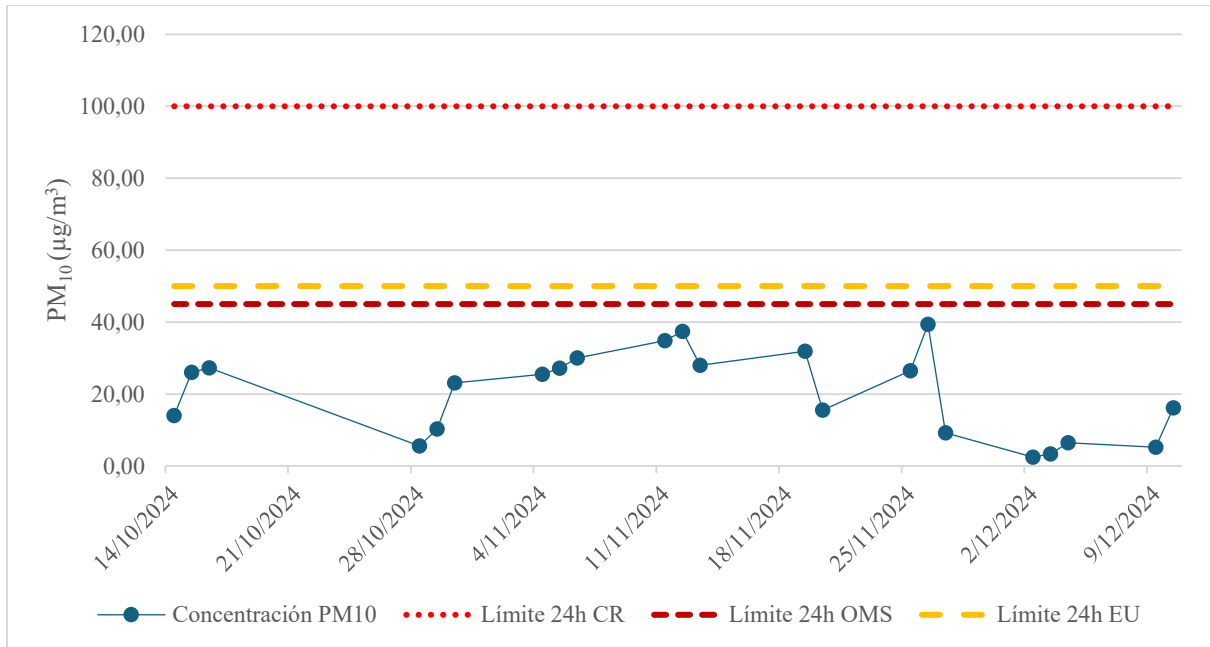


Figura 14. Concentración material particulado PM₁₀ en el punto PI-025 en Heredia, Heredia, 2024.

4.1.2 Concentración de PM_{2.5}

La concentración de PM_{2.5} muestra resultados similares a los obtenidos en PM₁₀ en cuanto al cumplimiento de la normativa costarricense en términos de promedio anual para los puntos ubicados en Belén y el Ministerio de Salud en San José. No obstante, en Heredia el promedio anual diario fue de 16 µg/m³ en 2023 y 17 µg/m³ en 2024 superando el límite máximo permitido en el Reglamento de contaminantes criterio de Costa Rica (15 µg/m³).

En contraste con las PM₁₀, las partículas PM_{2.5}, al ser mucho más finas (menos de 2.5 micrómetros), tienen la capacidad de penetrar profundamente en los pulmones, llegando hasta los alvéolos e incluso ingresando al torrente sanguíneo. Esta característica las convierte en un riesgo mayor para la salud, ya que se han asociado con un incremento en enfermedades cardiovasculares, ataques cardíacos, accidentes cerebrovasculares y otros problemas sistémicos. Por ello, la exposición prolongada a PM_{2.5} no solo afecta la función pulmonar, sino que también puede tener consecuencias más graves en el sistema circulatorio y en la salud general del organismo.

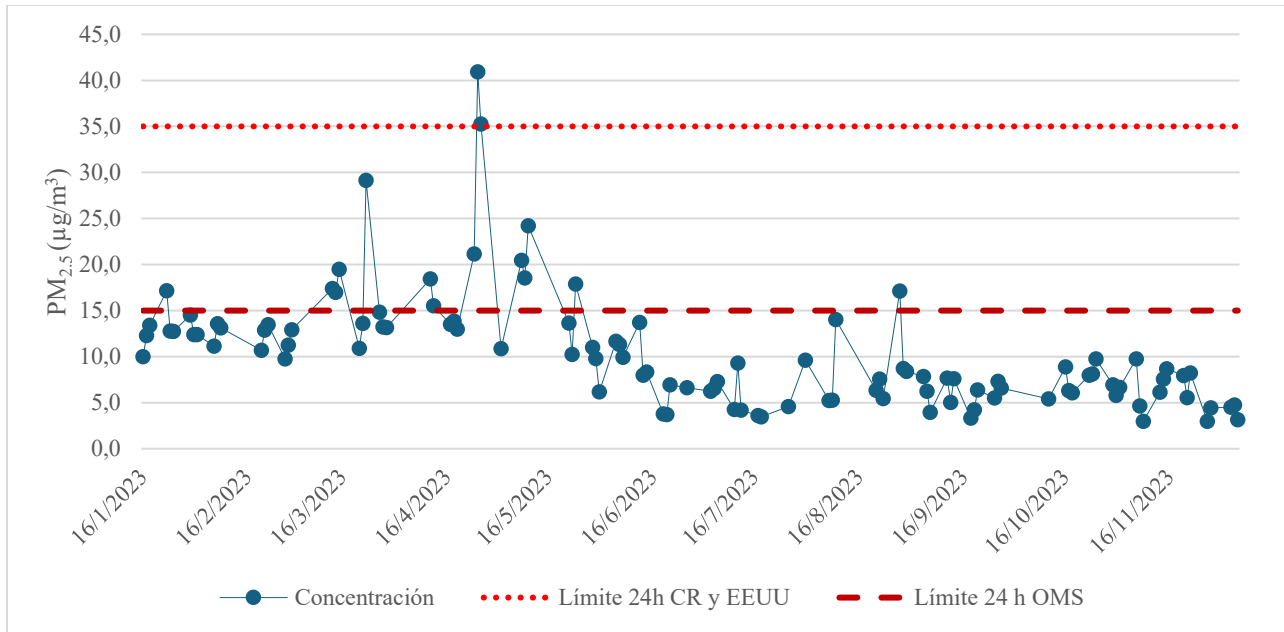


Figura 15. Concentración material particulado PM_{2.5} en el punto PI-007 en Ministerio de Salud, San José, 2023.

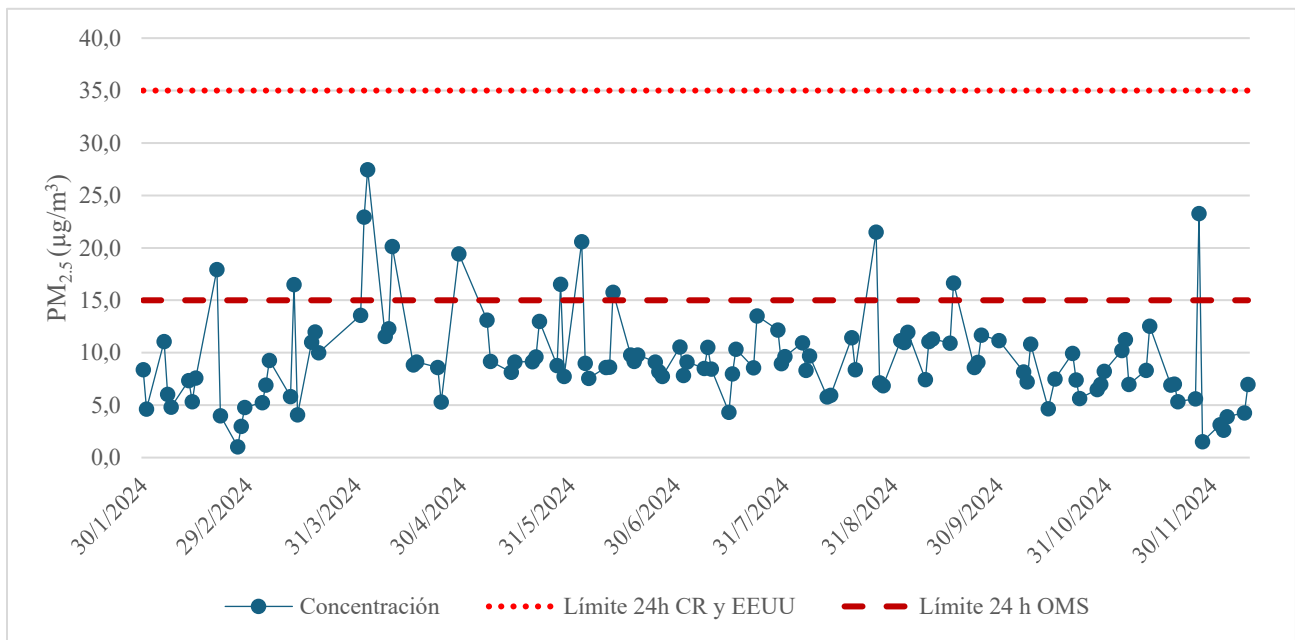


Figura 16. Concentración material particulado PM_{2.5} en el punto PI-007 en Ministerio de Salud, San José, 2024.

En el Ministerio de Salud en San José el monitoreo de la concentración de PM_{2.5} de 24 horas registró valores que cumplen con reglamento en 2024 (**Figura 16**) al no superar el límite establecido de 35 µg/m³ mientras que en el 2023 este límite se superó únicamente en dos ocasiones en el mes de abril (**Figura 15**). En la entrada al cantón de Belén (BE-02) los valores también cumplen con la normativa de Costa Rica en la mayoría del periodo evaluado, sin embargo, al igual que con lo registrado en el Ministerio de Salud se supera el límite establecido por la OMS de 15 µg/m³. En Belén se supera este umbral principalmente entre los meses de abril y junio en 2023 (**Figura 17**) mientras que en 2024 lo supera desde febrero hasta julio (**Figura 18**).

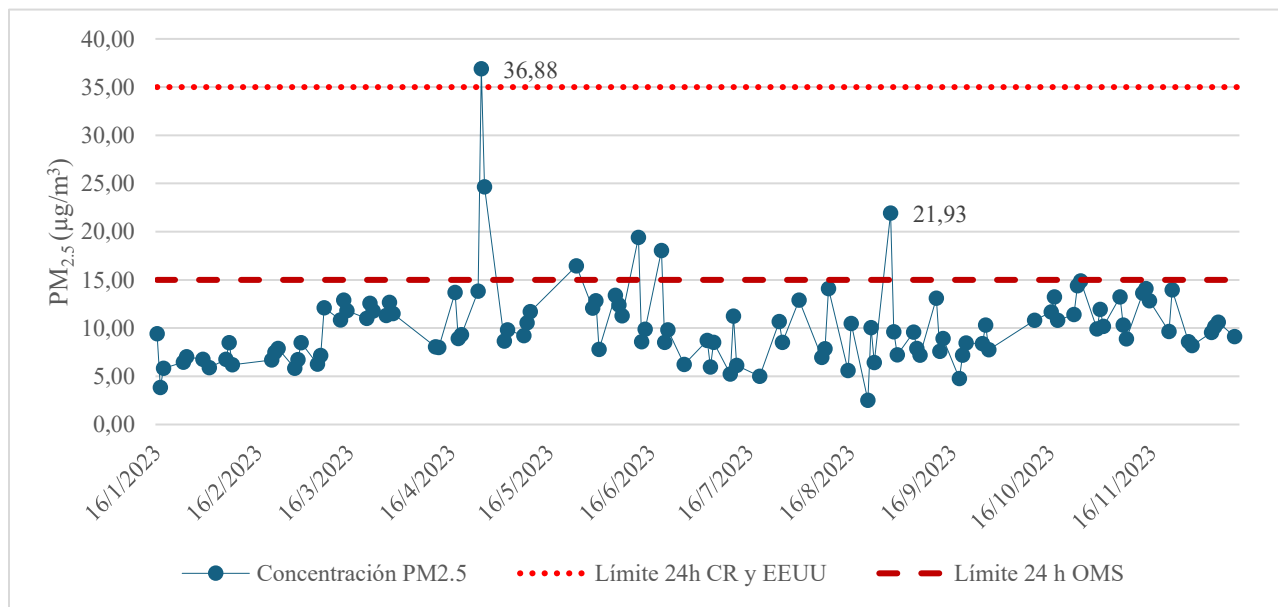


Figura 17. Concentración material particulado PM_{2.5} en el punto de EPA, Belén, 2023.

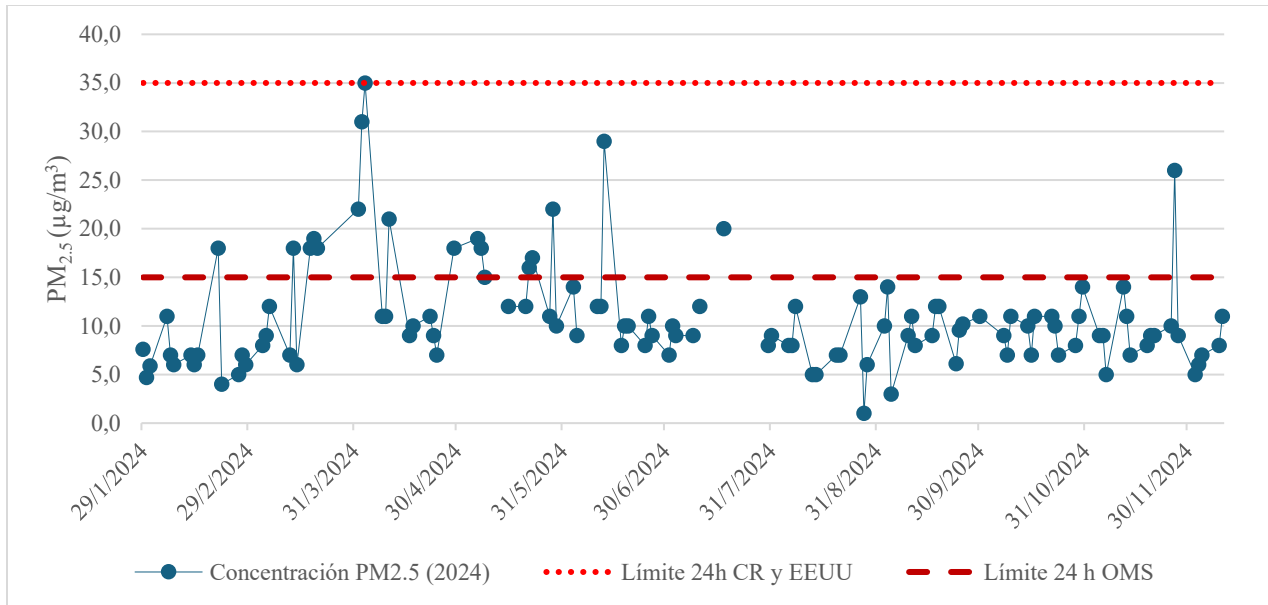


Figura 18. Concentración material particulado PM_{2.5} en el punto de EPA, Belén, 2024.

En Heredia los valores de 24 horas obtenidos durante el 2023 y 2024 también superaron el límite de la OMS con registros superiores a los 15 µg/m³ y durante el mes de abril en 2023 la concentración de este contaminante superó el límite establecido en Costa Rica (**Figura 19**). Al igual que en años anteriores este punto siempre ha sido uno de los de mayores problemas debido al alto tránsito vehicular. Esto indica un problema de contaminación persistente con impactos significativos en la salud pública y el medio ambiente. La exposición prolongada a concentraciones elevadas de PM_{2.5} puede provocar enfermedades respiratorias como asma y bronquitis, aumentar el riesgo de enfermedades cardiovasculares y afectar especialmente a grupos vulnerables como niños, ancianos y personas con afecciones preexistentes.

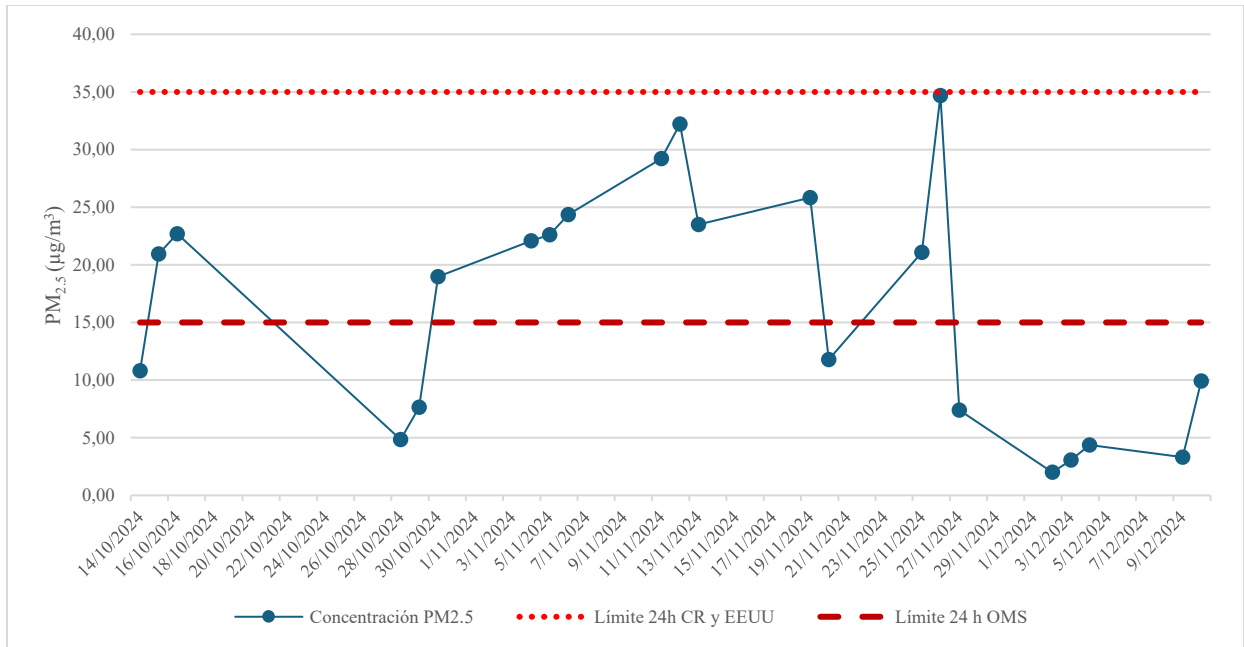


Figura 20. Concentración material particulado PM_{2.5} en el punto Rectoría UNA, Heredia, 2024.

4.1.3 Concentración de NO₂

En el cantón de Belén, la concentración promedio de dióxido de nitrógeno (NO₂) en el aire fue de 29,87 µg/m³ en el año 2023 y aumentó a 33,14 µg/m³ en 2024. Al comparar estos valores con los registrados en 2021 (32,02 µg/m³) y 2022 (31,19 µg/m³), se observa una disminución en 2023 seguida de un incremento en 2024, superando incluso los niveles de los dos años anteriores (**Cuadro 5**).

El Reglamento de Calidad del Aire para Costa Rica establece un límite anual de 100 µg/m³ para el dióxido de nitrógeno (NO₂), mientras que la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda un valor mucho más estricto: una media anual de 10 µg/m³. Además, la OMS propone tres metas intermedias de reducción: 40 µg/m³ (primera), 30 µg/m³ (segunda) y 20 µg/m³ (tercera). Esta amplia diferencia entre los valores permitidos por la normativa nacional y los recomendados por la OMS genera dos formas de interpretar los resultados. Por un lado, según el Decreto N.º 39951-S, todos los promedios anuales registrados para el cantón de Belén, están por debajo del límite nacional de 100 µg/m³. Sin embargo, desde la perspectiva de la OMS, el cantón sobrepasa el valor guía de 10 µg/m³.

A pesar de ello, los datos de 2023 sí cumplen con la segunda meta intermedia de la OMS (30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), y los de 2024 se ubican por debajo de la primera meta (40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), aunque superan la segunda. Esto resalta una mejora parcial en relación con los objetivos internacionales y sugiere la necesidad de reconsiderar los valores límite nacionales para acercarlos a lo recomendado por la OMS, especialmente en lo que respecta a la protección de la salud a largo plazo.

Cuadro 5. Concentración de promedio en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de NO_2 por campaña para el cantón de Belén durante los años 2021, 2022, 2023 y 2024.

Año	2021	2022	2023	2024	Promedio
Promedio	32,02	31,19	29,87	33,14	31,56
Mediana	33,5	32	28,43	32,55	31,62
Desviación estándar	12,49	12,69	15,85	13,45	13,62
Mínimo	3,8	10,6	1,6	0,03	4,01
Máximo	62	78,6	122,55	77,82	85,24

Fuente: Elaboración propia.

Los puntos muestreados en el año 2023, el 50 % superó la primera meta intermedia de la OMS (40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), el 20 % sobrepasó la segunda meta (30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y el 40 % excedió la tercera meta (20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Estos porcentajes reflejan que, si bien se cumple con la normativa nacional al no superar el límite de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, la calidad del aire dista de ser adecuada desde una perspectiva de salud pública internacional. En 2024, aunque nuevamente ningún punto superó el límite nacional, el 20 % de las mediciones superó la primera meta de la OMS, el 40 % sobrepasó la segunda, el 30 % excedió la tercera, y el 20 % restante se ubicó entre 10 y 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Es decir, ningún punto alcanzó el valor guía anual de la OMS de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Figura 21 y 22**). Esto evidencia que todos los puntos evaluados presentan concentraciones de dióxido de nitrógeno potencialmente perjudiciales para la salud, lo que subraya la necesidad de fortalecer las estrategias de control de emisiones y mejorar la calidad del aire en el cantón.

Los datos correspondientes a 2023 y 2024 muestran, en su mayoría, una baja variabilidad según el análisis del diagrama de cajas y bigotes. Sin embargo, el punto de monitoreo en el 2023 en el Palacio Municipal se distingue por presentar una mayor dispersión en los valores, lo que indica una variabilidad más alta en las concentraciones de NO_2 en ese sitio.

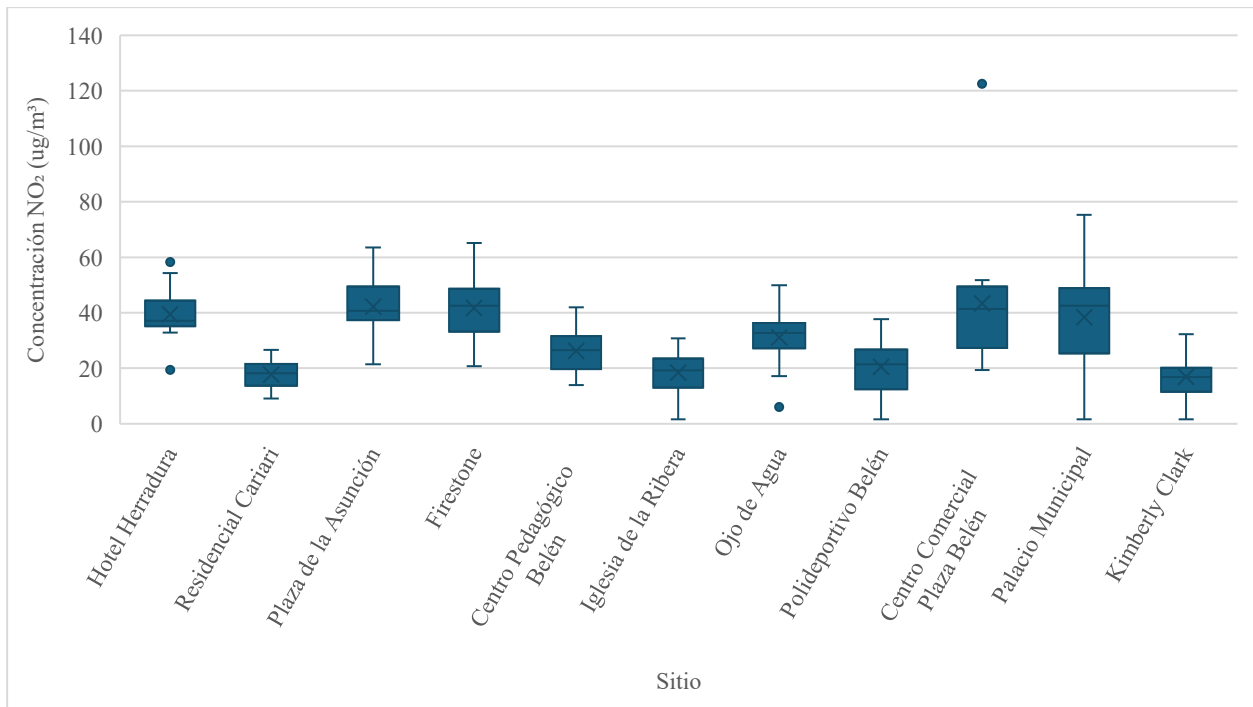


Figura 21. Variación de la concentración de dióxido de nitrógeno por punto de monitoreo durante el 2023 en el cantón de Belén.

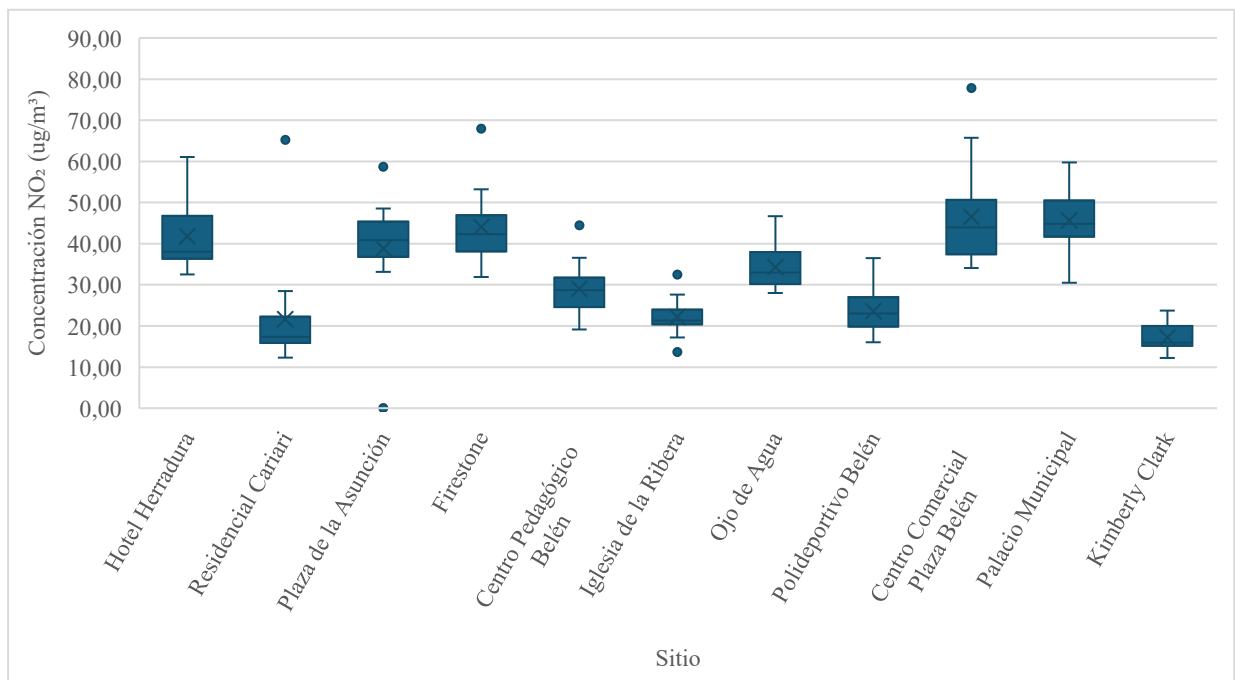


Figura 22. Variación de la concentración de dióxido de nitrógeno por punto de monitoreo durante el 2024 en el cantón de Belén.

En la **Figura 23 y 24** se presenta de forma gráfica la distribución de las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO_2) en el cantón de Belén durante los años 2023 y 2024. Los datos muestran que los puntos de monitoreo con mayores concentraciones fueron el Palacio Municipal y el Centro Comercial Plaza Belén, donde se superó la primera meta intermedia establecida por la OMS. Esto indica una mayor exposición al contaminante en estas zonas específicas. Asimismo, otros puntos destacados como Firestone, Plaza de la Asunción y Hotel Herradura registraron valores superiores a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sobrepasando la segunda meta intermedia de la OMS y evidenciando una exposición significativa al NO_2 en dichas ubicaciones, las cuáles son de alto flujo vehicular.

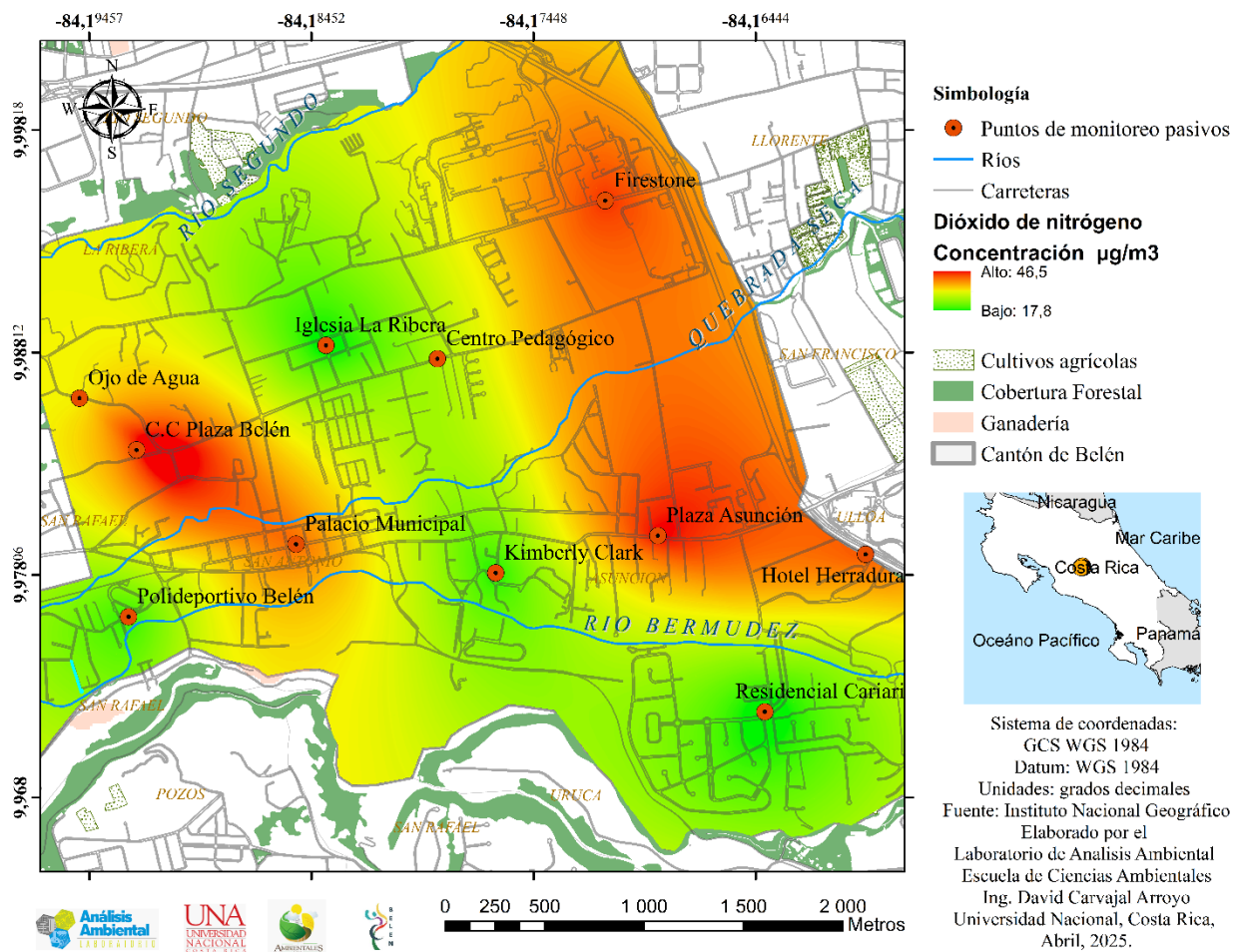


Figura 23. Concentración promedio de NO_2 por sitio de muestreo 2023 en el cantón de Belén.

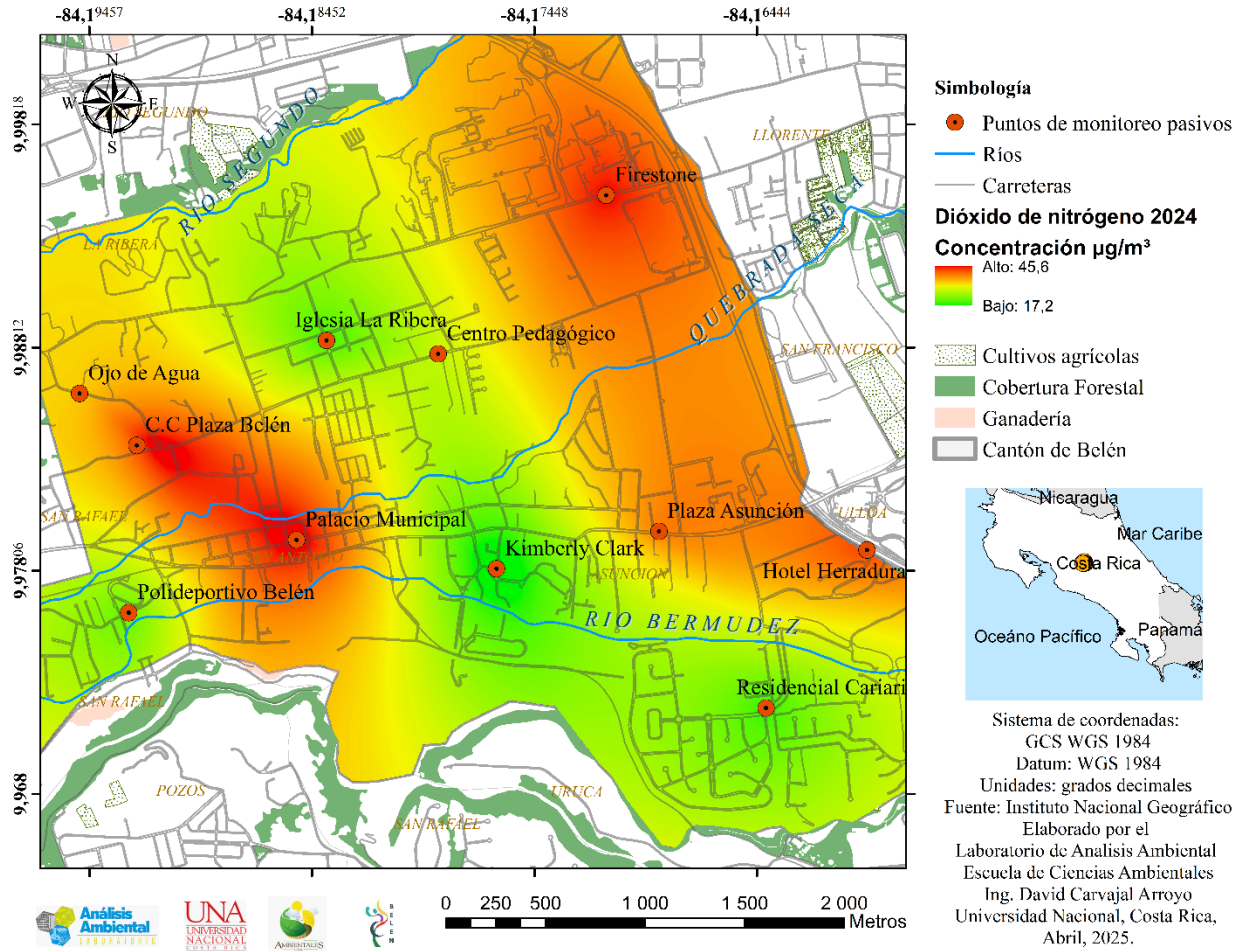


Figura 24. Concentración promedio de NO_2 por sitio de muestreo 2024 en el cantón de Belén.

4.1.4 Concentración de SO_2

En el cantón de Belén, la concentración promedio de dióxido de azufre (SO_2) en el aire fue de $18,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el año 2023 y disminuyó a $6,78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2024 (**Cuadro 6**). Según los valores guía establecidos por OMS, la concentración promedio anual recomendada para el SO_2 es de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En este contexto, el cantón de Belén en 2023 se encontraba por debajo de este límite, aunque relativamente cercano. Sin embargo, en 2024 se observa una reducción significativa del 64 %, lo que representa una mejora sustancial en la calidad del aire en relación con este contaminante. Esta disminución sugiere un avance positivo en la reducción de las emisiones de SO_2 en este cantón.

Cuadro 6. Concentración promedio de SO₂ en µg/m³ registradas para el cantón de Belén durante el año 2023 y 2024.

Año	2023	2024	Promedio
Promedio	18,77	6,78	12,77
Mediana	8,21	3,93	6,07
Desviación estándar	40,42	15,02	27,72
Mínimo	3,43	1,58	2,51
Máximo	368,78	144,42	256,60

Fuente: Elaboración propia.

En el año 2023, las concentraciones de SO₂ en el cantón de Belén mostraron variabilidad entre los diferentes puntos de monitoreo. El 9% de los puntos (Plaza de la Asunción) presentó valores superiores a 100 µg/m³, mientras que el 9% de los puntos (Firestone) superó los 20 µg/m³. Los 82% restantes de los puntos de medición estuvieron por debajo de los 20 µg/m³. En 2024, los datos reflejan una mejora significativa, con el 9% de los puntos (Firestone) superando los 20 µg/m³, mientras que el 91% de los otros puntos se mantuvieron por debajo de este umbral. En general, los datos de ambos años muestran una baja variabilidad, según lo evidenciado en los diagramas de cajas y bigotes. Sin embargo, el sitio de monitoreo en Firestone durante 2023 presentó una mayor dispersión en los valores, lo que indica una variabilidad más alta en las concentraciones de SO₂ en ese punto (**Figuras 25 y 26**).

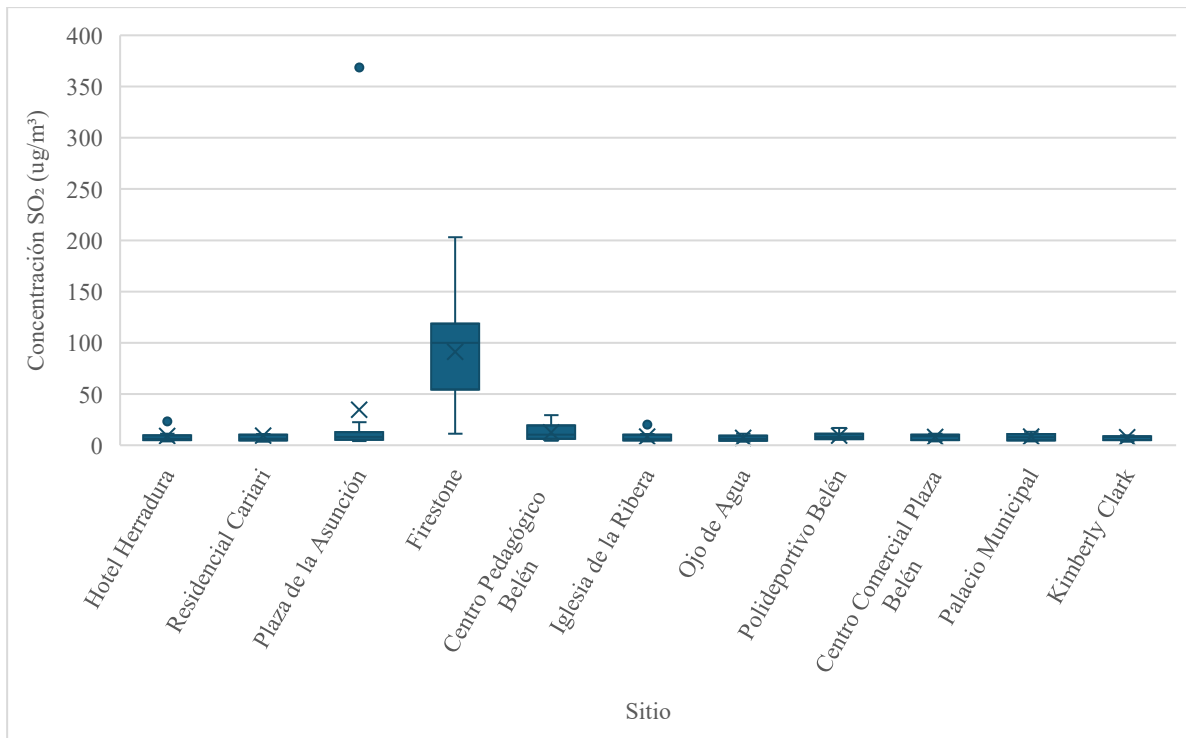


Figura 25. Variación de la concentración de dióxido de azufre por punto de monitoreo durante el 2023 en el cantón de Belén.

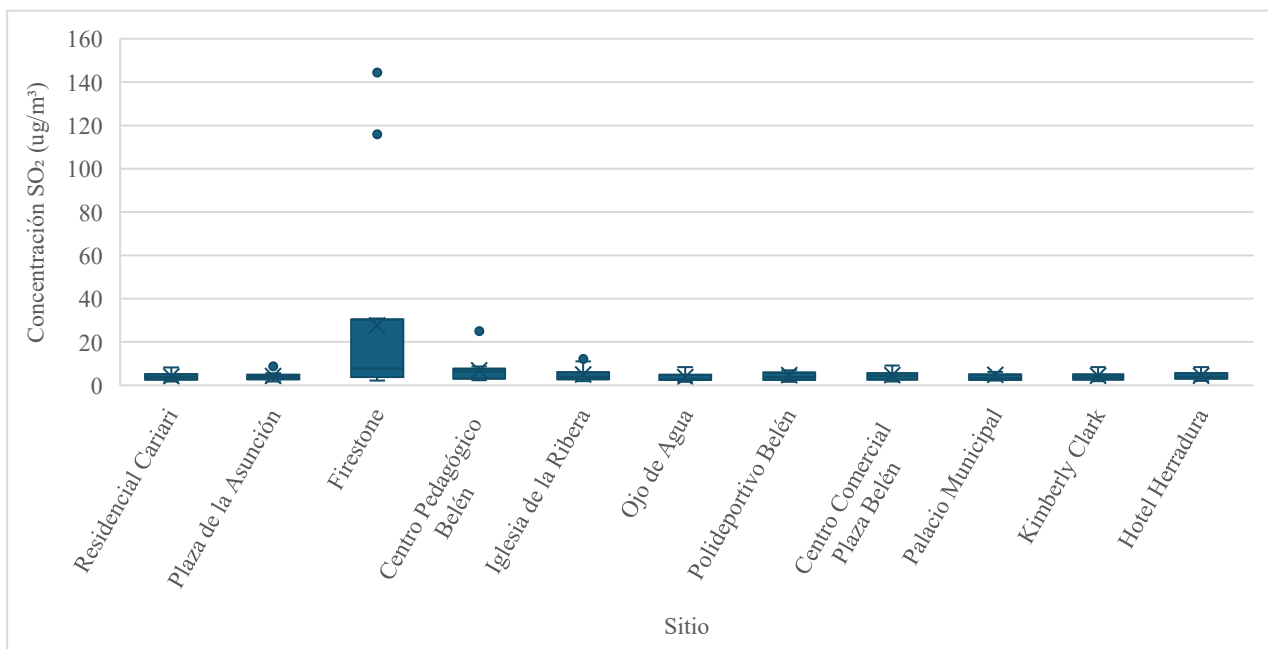


Figura 26. Variación de la concentración de dióxido de azufre por punto de monitoreo durante el 2024 en el cantón de Belén.

En las **Figuras 27 y 28** se puede observar que, durante los años 2023 y 2024, los puntos de monitoreo que registraron las concentraciones más altas de SO₂ en el cantón de Belén fueron los correspondientes a la estación ubicada frente a Firestone. En ambas figuras se puede observar que este sitio destaca visualmente por presentar los valores más elevados en comparación con los demás puntos de muestreo. En 2023, dicho sitio superó el umbral de 20 µg/m³ recomendado por la OMS, mientras que, en 2024, aunque las concentraciones disminuyeron, continuó siendo el único punto que mantuvo valores por encima de dicho límite. Esta tendencia sugiere una afectación más local por una o más fuentes de emisión de dióxido de azufre en los alrededores, lo que resalta la importancia de un seguimiento más detallado en este sitio en específico. A esto se suma ser un sitio de alto flujo vehicular con actividad industrial cercana.

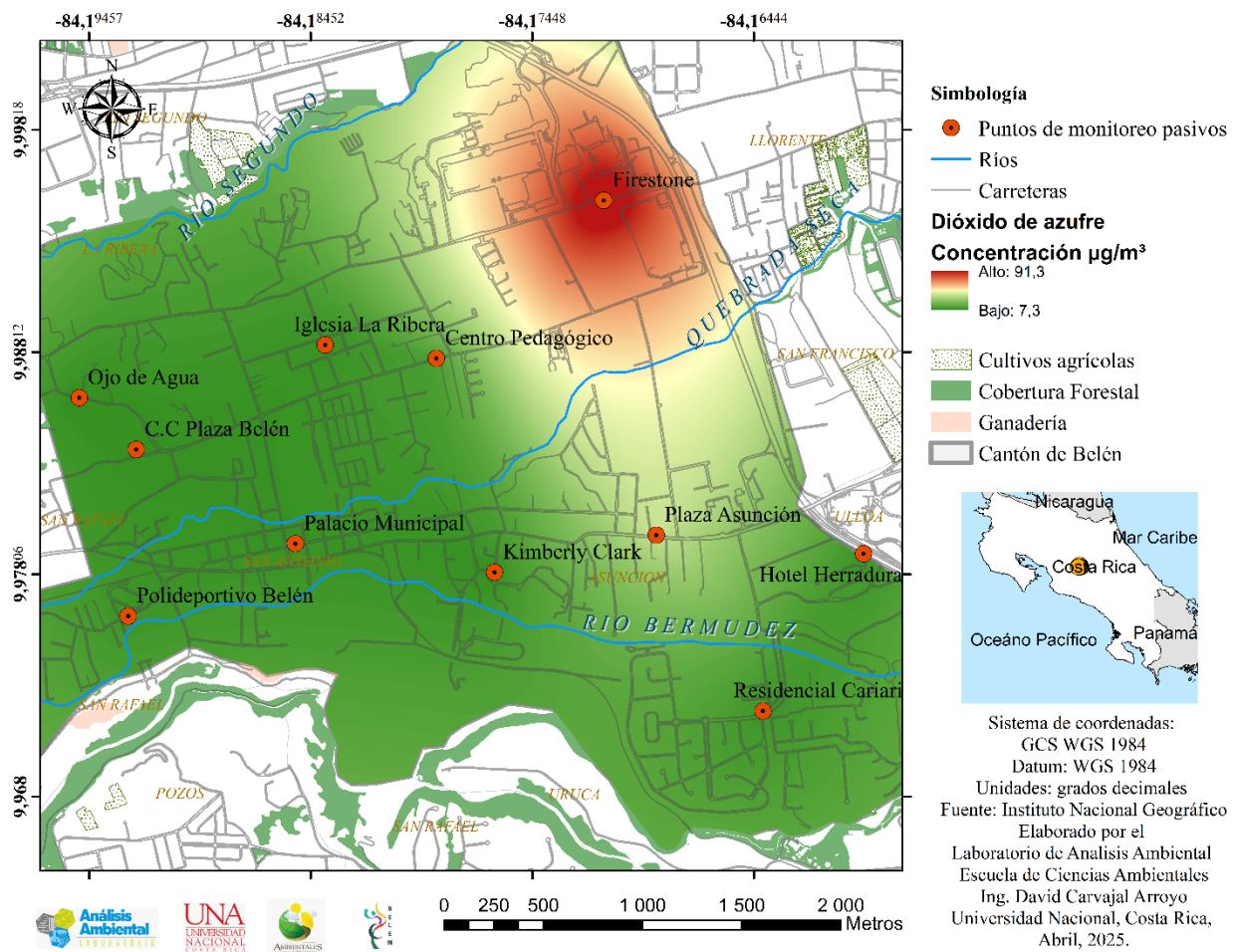


Figura 27. Concentración promedio de SO₂ por sitio de muestreo el 2023 en el cantón de Belén.

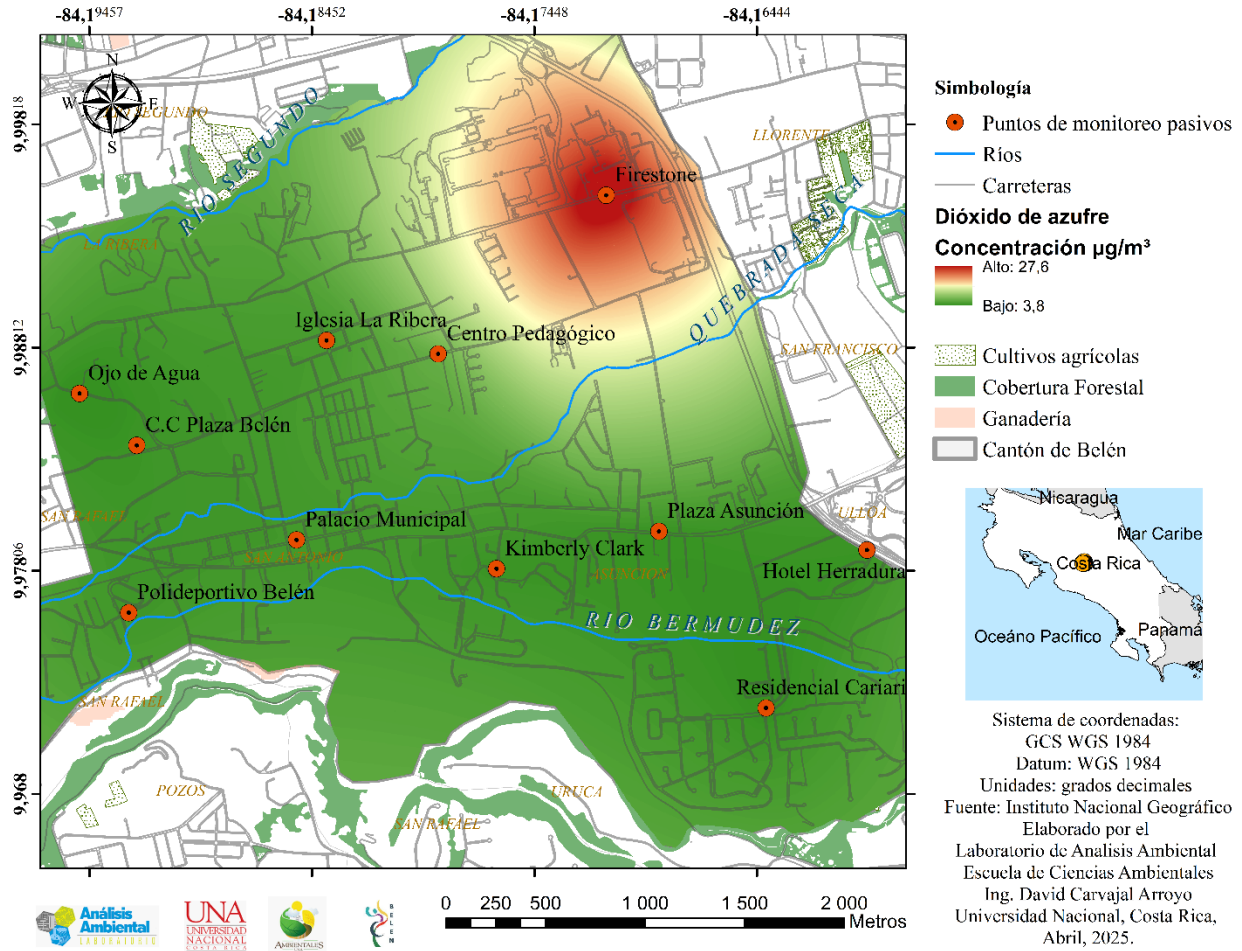


Figura 28. Concentración promedio de SO_2 por sitio de muestreo el 2024 en el cantón de Belén.

4.1.5 Concentración de O_3

En el cantón de Belén, la concentración promedio de ozono (O_3) en el aire fue de $16,32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2023 y aumentó a $32,60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2024 (**Cuadro 7**). De acuerdo con la OMS, el valor guía para la concentración media de ozono durante la temporada alta es de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo que ambos promedios anuales se encuentran considerablemente por debajo de este límite. Aunque los niveles promedio no superan el umbral recomendado, el aumento de más del 99% entre 2023 y 2024 podría ser una señal de alerta que justifica un seguimiento más detallado, ya que el ozono troposférico es un contaminante secundario que puede tener efectos adversos en la salud respiratoria, incluso en concentraciones moderadas y durante exposiciones repetidas.

Cuadro 7. Concentración promedio de O₃ en µg/m³ registradas para el cantón de Belén durante el año 2023 y 2024.

Año	2023	2024	Promedio
Promedio	16,32	32,60	24,46
Mediana	17,41	25,87	21,64
Desviación estándar	12,45	22,98	17,71
Mínimo	0,03	0,52	0,26
Máximo	50,35	109,15	79,75

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las concentraciones de O₃ en el cantón de Belén, los datos de los años 2023 y 2024, se tiene en 2023, el 18 % de los puntos, superaron el valor guía de la OMS para la temporada alta (60 µg/m³), correspondientes a Plaza de la Asunción y Firestone, mientras que el 82 % restante, registró concentraciones inferiores a 10 µg/m³, lo cual indica una marcada desigualdad entre zonas. En 2024, si bien ningún punto superó el umbral de 60 µg/m³, el 9 % registró un valor cercano al límite (59,67 µg/m³ en Iglesia de la Ribera), el 45 % presentó concentraciones mayores a 40 µg/m³ y otro 45 % superó los 20 µg/m³ (**Figuras 29 y 30**). Este cambio evidencia un incremento generalizado en los niveles de ozono respecto al año anterior.

En ambos gráficos de cajas y bigotes, se observa que tanto las cajas como los bigotes presentan una altura considerable, lo cual indica una alta variabilidad en las concentraciones registradas. Este comportamiento puede estar asociado a factores como cambios en la meteorología o a la variabilidad en la actividad humana y a la emisión de contaminantes precursores. Se debe recordar que este contaminante es de tipo secundario y su formación es compleja y depende de múltiples condiciones locales.

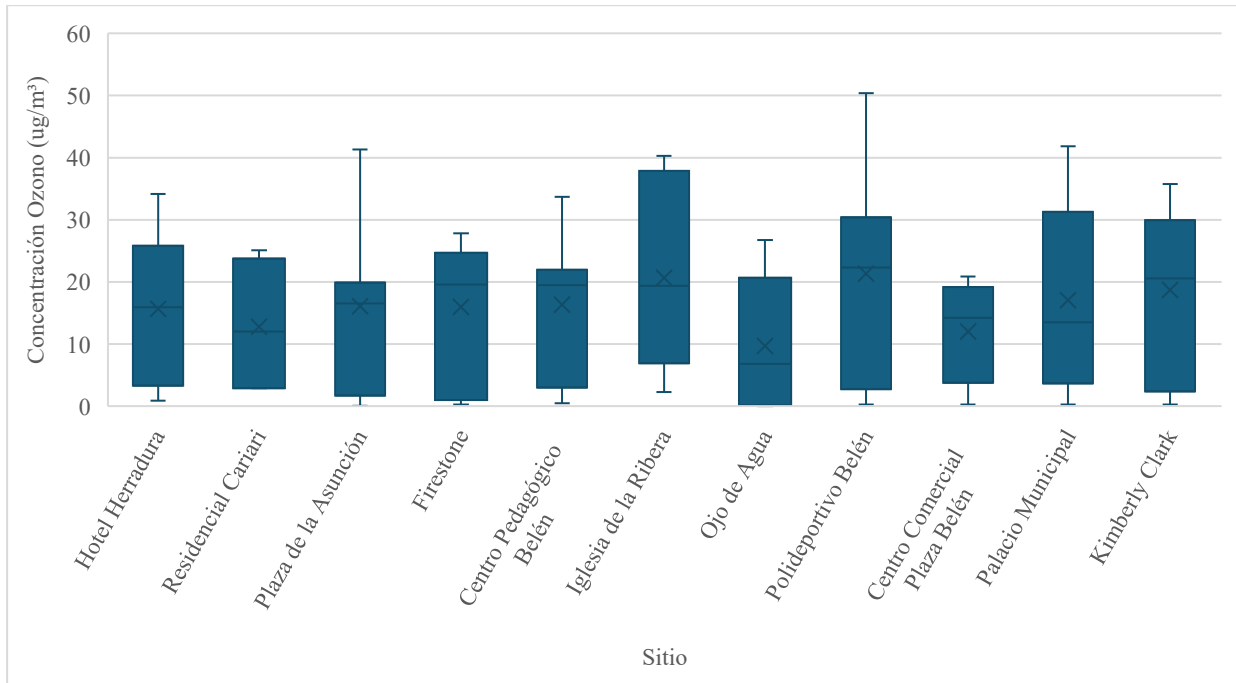


Figura 29. Variación de la concentración de ozono por punto de monitoreo durante el 2023 en el cantón de Belén.

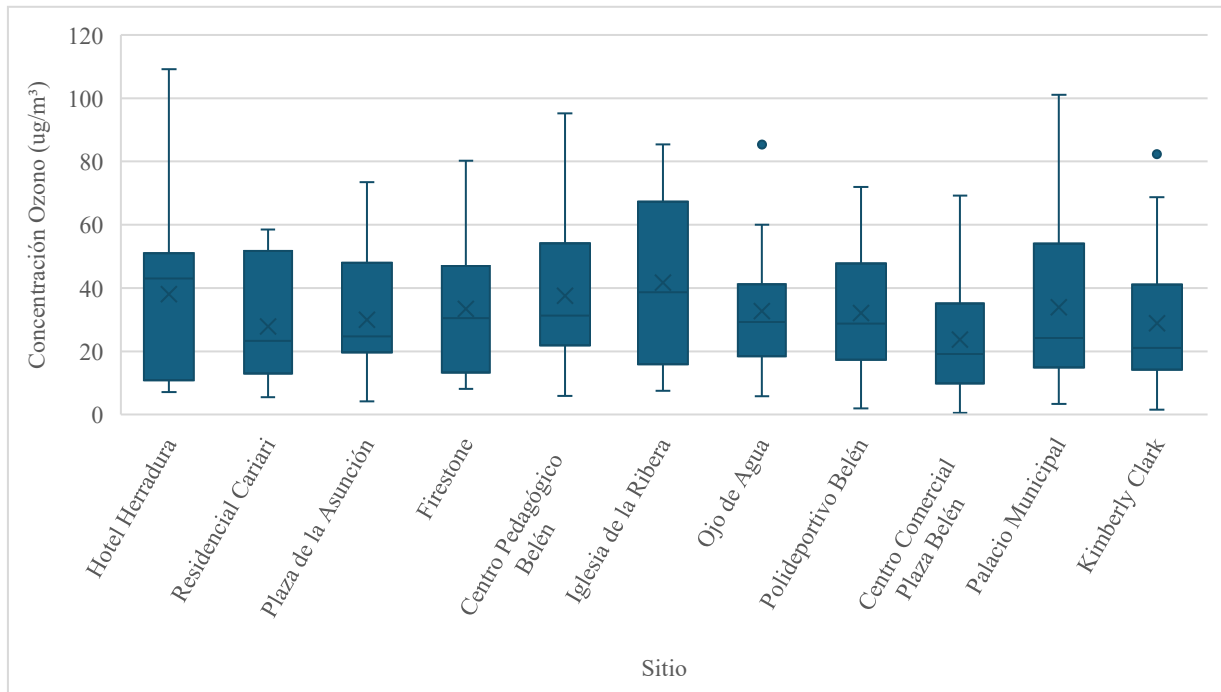


Figura 30. Variación de la concentración de ozono por punto de monitoreo durante el 2024 en el cantón de Belén.

Para el año 2023, los puntos de monitoreo con las concentraciones más altas de O₃ en el cantón de Belén fueron Plaza de la Asunción, Firestone y Centro Pedagógico Belén. En 2024, los puntos con mayores concentraciones fueron Iglesia de la Ribera, Centro Pedagógico Belén, Palacio Municipal, Firestone y Plaza de la Asunción, todos con valores superiores a 40 µg/m³. Como se observa en las **Figuras 31 y 32**, hay una diferencia notable entre ambos años, con una expansión más pronunciada de las áreas con niveles elevados de ozono en 2024. En 2023, las concentraciones oscilaron entre 9,7 µg/m³ y 21,3 µg/m³, mientras que en 2024 los valores máximos alcanzaron 41,7 µg/m³ y los valores mínimos fueron de 23,7 µg/m³. Este cambio en el rango de concentraciones sugiere un aumento en los niveles de ozono, lo cual podría estar relacionado con factores como cambios en las condiciones locales o variaciones en las fuentes emisoras, a pesar de la aparente estabilidad visual en los mapas, lo cual debe investigarse más.

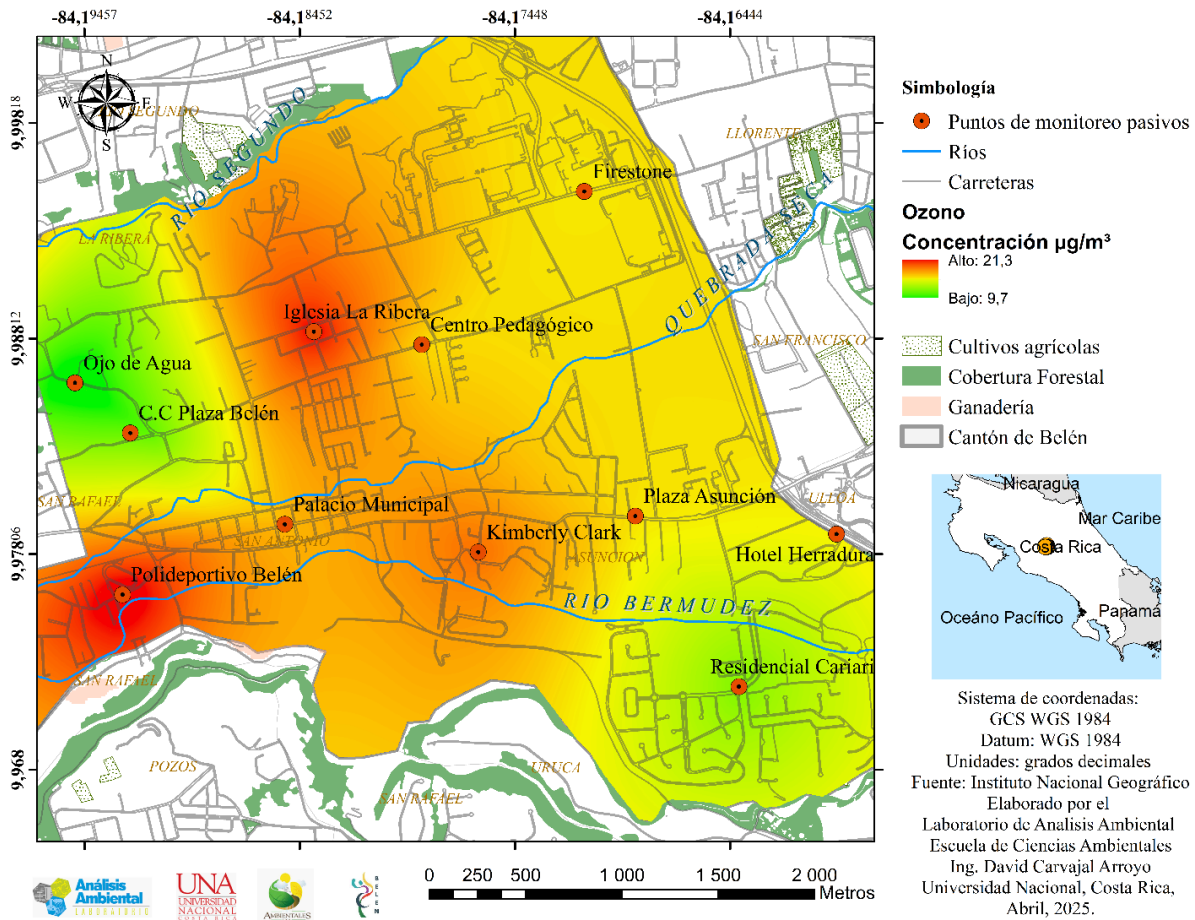


Figura 31. Concentración promedio de ozono (en unidades de µg/m³) por punto de muestreo para el 2023.

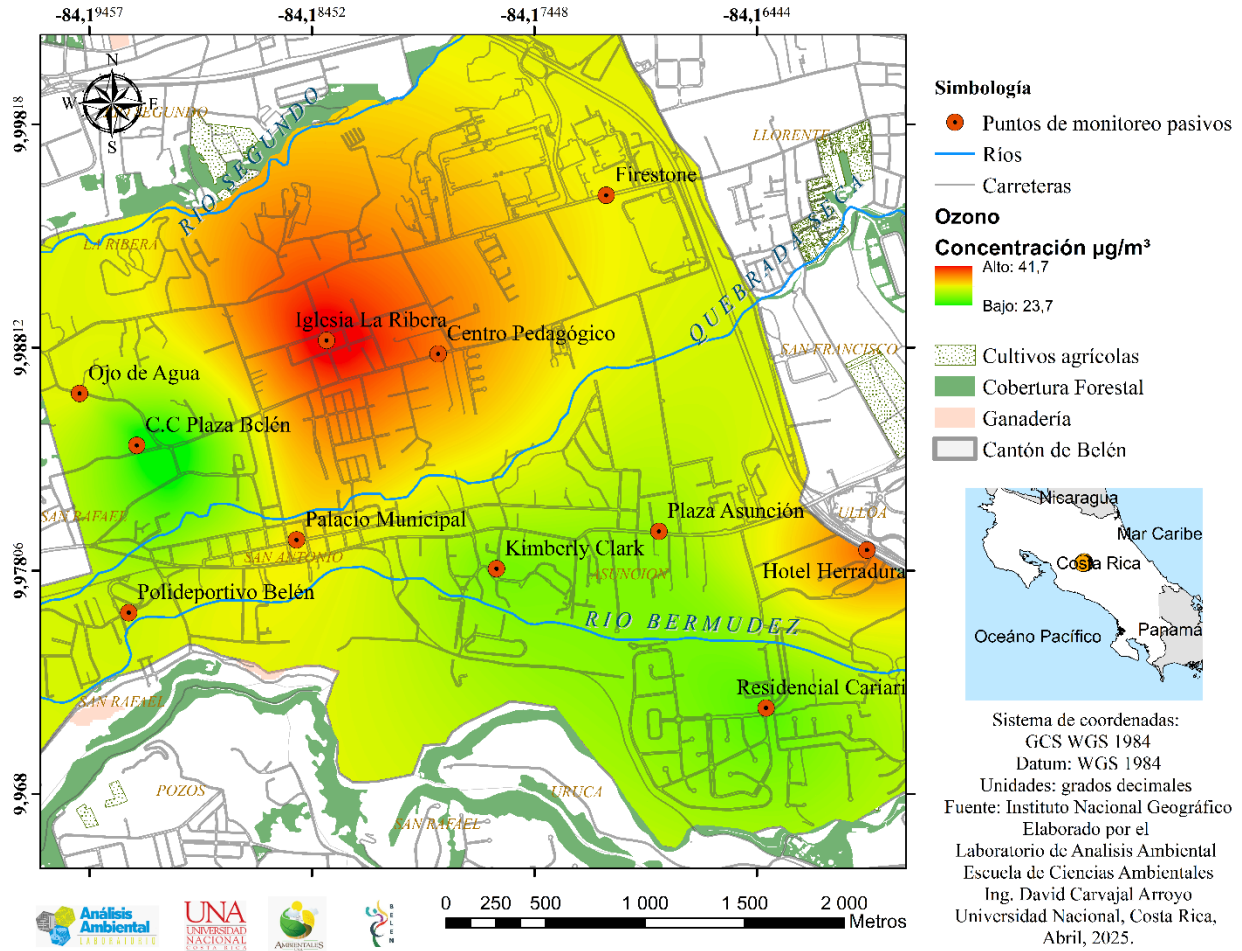


Figura 32. Concentración promedio de ozono (en unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$) por punto de muestreo para el 2024.

4.2 Monitoreo automático

4.2.1 Red automática de RECOPE, Ochomogo, Cartago

Esta estación automática de monitoreo se mantuvo activa durante el 2023 y 2024 monitoreando material particulado (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y carbono negro) y gases (CO , NO_2 , SO_2 y O_3) no obstante, no todos los contaminantes presentaron datos consecutivos. Según el Reglamento de Calidad del Aire para Contaminantes Criterio (N° 39951-S) se deben tener al menos el 75 % de datos (para gases y material particulado) para ser válidos y poder contrastarse con los límites máximos establecidos en el reglamento. Por ejemplo, para valores promedio diarios durante un año se deben tener al

menos 274 días de datos y en el caso de 24 horas se deben tener al menos 18 horas de datos continuos.

Los contaminantes que cumplen con las condiciones mínimas para la validez durante 2023 y 2024 fueron el SO₂ y el NO₂. En el caso del material particulados y el ozono solo se cumplió con el mínimo de datos durante el 2024 mientras que el monóxido de carbono solo contó con el 25 % de datos en 2024 y 0 % de datos en 2023 (**Cuadro 8**). Las principales razones de la pérdida de datos fueron problemas con algunos de los analizadores y labores de mantenimiento profundo. En los Anexos se pueden observar los gráficos completos de toda la base de datos para cada gas en donde se pueden distinguir los valores atípicos que advirtieron de problemas en la toma de datos.

Cuadro 8. Cantidad de datos relativa según años para los contaminantes criterio de la estación automática en RECOPE, Cartago, 2023-2024.

Contaminante	Año	Datos validos	Valor relativo	Cumple criterio
SO ₂	2023	336	92%	SI
	2024	359	98%	SI
NO ₂	2023	365	100%	SI
	2024	365	100%	SI
O ₃	2023	239	65%	NO
	2024	365	100%	SI
PM _{2.5}	2023	181	50%	NO
	2024	303	83%	SI
PM ₁₀	2023	181	50%	NO
	2024	303	83%	SI
CO	2024	92	25%	NO
Carbono Negro	2023	150	41%	NO
	2024	109	30%	NO

4.2.1.1 Material particulado

De acuerdo con los datos registrados, el valor promedio anual de PM_{2.5} fue de 3,0 µg/m³ en 2023 y aumentó a 23,3 µg/m³ en 2024. Ambos valores se encuentran por debajo del límite nacional de 35 µg/m³; sin embargo, el dato correspondiente a 2024 superó el umbral recomendado por la OMS, que es de 5 µg/m³, lo cual podría representar un riesgo para la salud pública de acuerdo con los estándares internacionales. Cabe destacar que los valores reportados para PM₁₀ prácticamente coincidieron con los de PM_{2.5}. Esto sugiere que probablemente las partículas PM₁₀ están

compuestas en su mayoría por fracciones finas ($PM_{2.5}$), por lo que no se detectaron fracciones intermedias (entre 2,5 y 10 μm). En las **Figuras 33 y 34** se aprecia el comportamiento diario de las concentraciones medidas para los años 2023 y 2024.

La concentración de $PM_{2.5}$ excedió el valor diario recomendado por la Organización Mundial de la Salud (15 $\mu g/m^3$) en un 82 % de las mediciones realizadas en el 2024, con valores máximos que alcanzaron los 89,5 $\mu g/m^3$, mientras que en el 2023 solamente se superó una vez. Por otro las concentraciones en 2024 fueron superiores a las de 2023, sin embargo, no hay suficientes datos en 2023 para asegurarlo por completo. Es importante mencionar que el sitio de muestreo tiene una alta influencia de la industria cercana, incluyendo la misma actividad dentro del plantel, y del alto flujo vehicular de la autopista cercana, siendo este último un contribuyente relevante; lo cual se discute seguidamente.

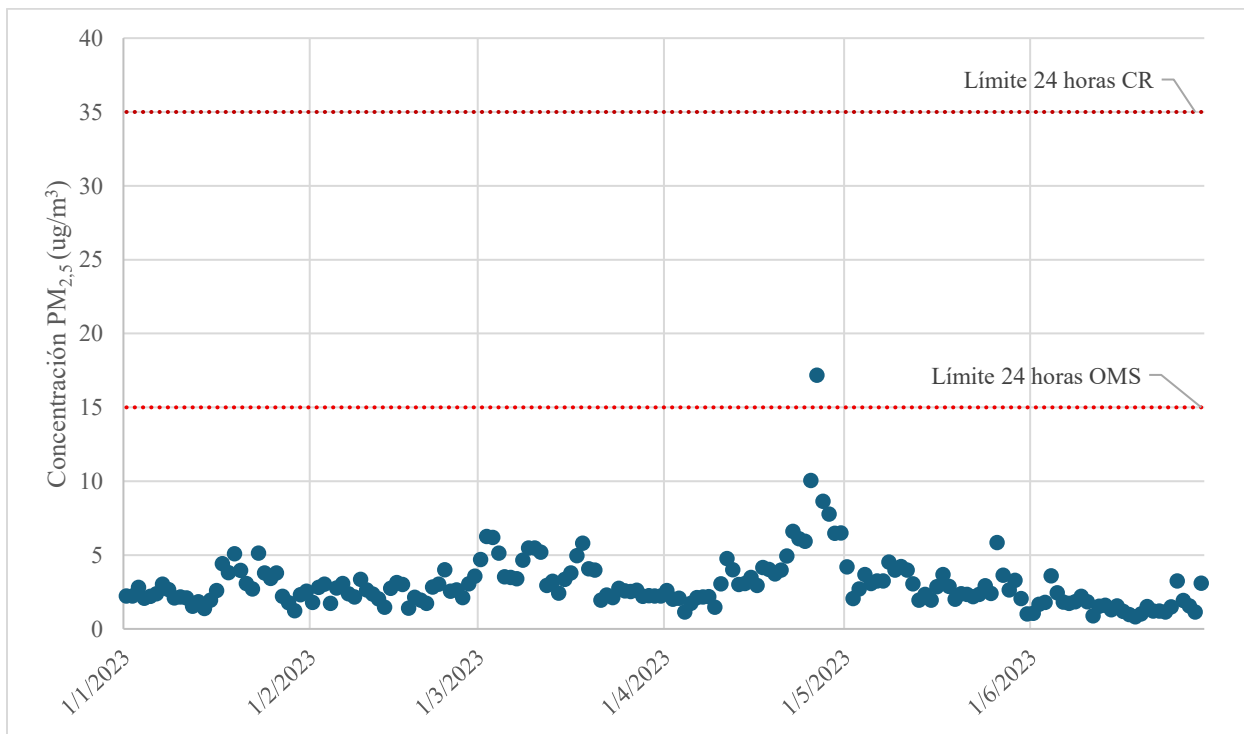


Figura 33. Concentración diaria de $PM_{2.5}$ (en unidades de $\mu g/m^3$) en RECOPE, Cartago, 2023.

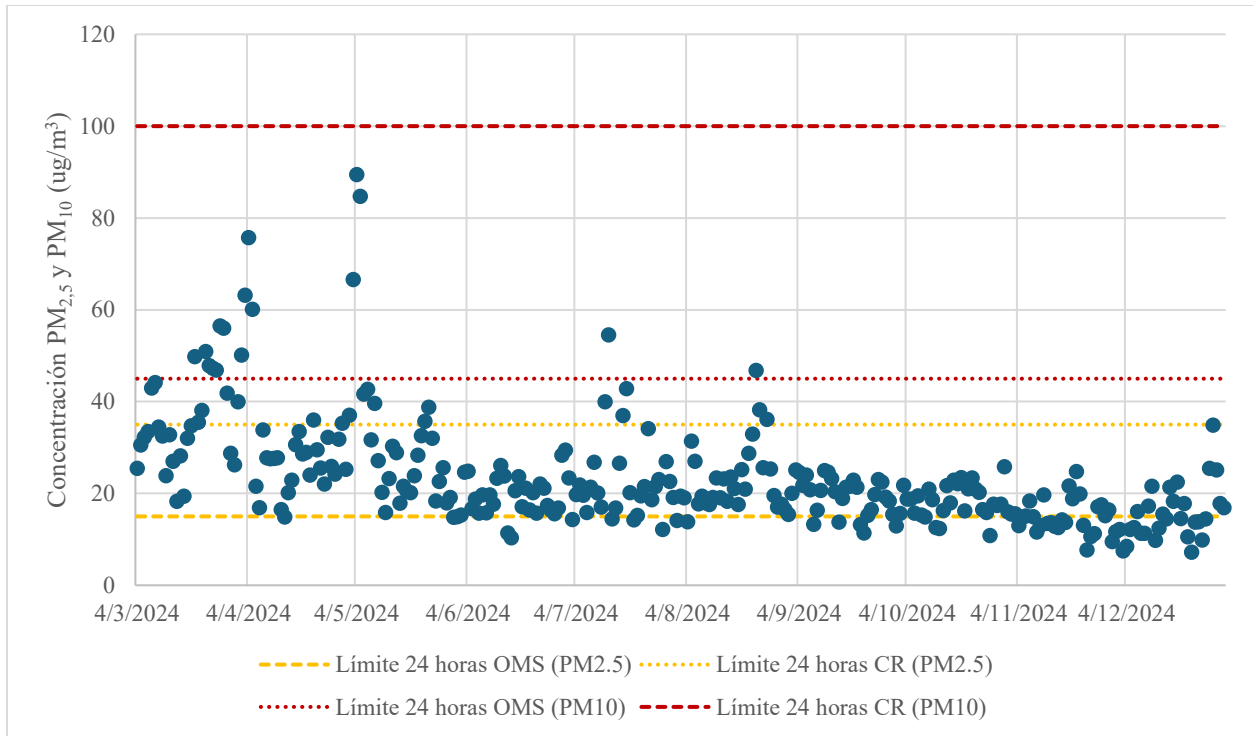


Figura 34. Concentración diaria de $PM_{2.5}$ (en unidades de $\mu g/m^3$) en RECOPE, Cartago, 2024.

En la **Figura 35** se muestra la concentración horaria promedio de $PM_{2.5}$, para el año 2024, en donde se ven claramente dos máximos, uno en la mañana y otro en la tarde, los cuales están relacionados con el patrón vehicular típico en zonas urbanas debido a los congestionamientos y alto flujo vehicular que ocurren durante las horas pico de la mañana y tarde, producto del desplazamiento de la población hacia sus trabajos, centros de estudio y hogares. Esto sugiere que la contaminación del aire en ese sitio tiene contribución de fuentes vehiculares, particularmente las que circulan por la Autopista Florencio del Castillo (Ruta Nacional Primaria 2). Esto no deja por fuera la posible contribución de otro tipo de fuentes cercanas al ser una zona con actividad industrial y comercial.



Figura 35. Concentración horaria de PM_{2.5} (en unidades de µg/m³) en RECOPE, Cartago, 2024.

4.2.1.2 Dióxido de azufre

A continuación, se muestra el comportamiento de la concentración promedio diaria del dióxido de azufre (SO₂) en la estación RECOPE, para los años 2023 y 2024. Para el año 2023 (**Figura 36**), ninguno de los registros superó el valor diario máximo recomendado por la OMS, de 15 ppb; sin embargo, solo se reportaron los datos hasta el mes de agosto, debido a que posteriormente el equipo fue sometido a labores de mantenimiento. No se observaron picos importantes, y las concentraciones se mantuvieron relativamente constantes,

En 2024 se observaron concentraciones más altas, en donde el porcentaje de valores que excedieron el límite aumentó significativamente, alcanzando el 21%. A diferencia del año anterior, se registraron niveles más altos de dióxido de azufre de forma sostenida durante todos los meses del año, con varios picos de concentración elevada (**Figura 37**). Es importante mencionar que el punto de muestreo está ubicado en una zona que está rodeada de actividad tanto comercial como industrial, por lo que es posible que haya influencia de fuentes puntuales que utilizan combustibles pesados que contienen azufre.

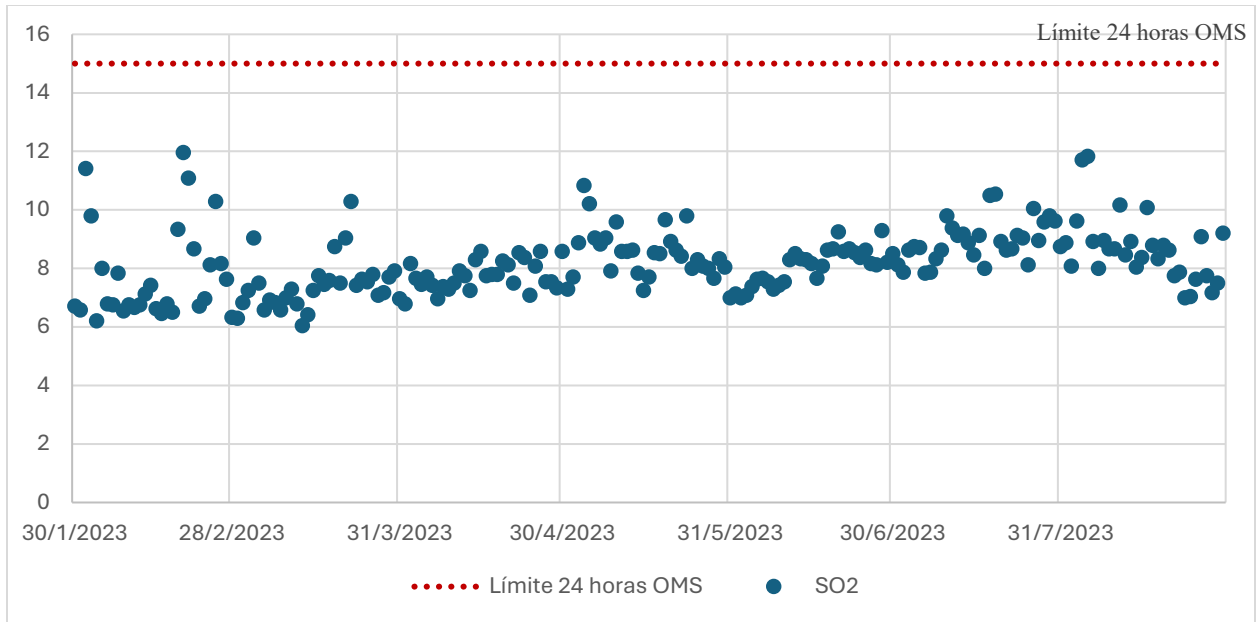


Figura 36. Concentración promedio diaria de dióxido de azufre (en unidades de ppb) en RECOPE, Cartago, 2023.

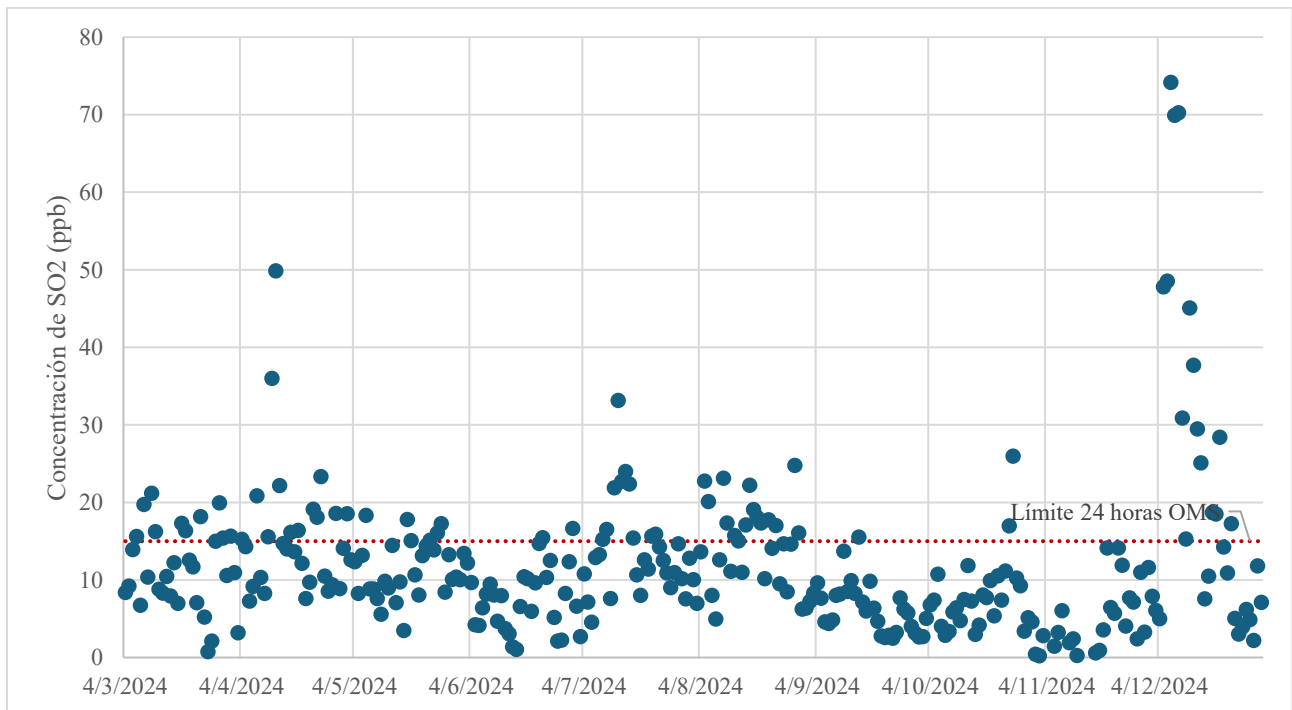


Figura 37. Concentración promedio diaria de dióxido de azufre (en unidades de ppb) en RECOPE, Cartago, 2024.

Según la **Figura 38**, en el año 2023 y 2024 la concentración horaria de SO₂ en la estación RECOPE muestra dos picos pronunciados: uno entre las 8:00 y 9:00 horas, y otro entre las 14:00 y 15:00 horas. Estos aumentos podrían deberse a los patrones de tránsito vehicular, ya que esas horas suelen coincidir con los picos de movilidad urbana, lo que incrementa las emisiones provenientes de automotores, sin embargo, el pico de la tarde es un poco anticipado de lo esperado. Otro factor importante por considerar es que al ser una zona industrial podría haber influencia de fuentes puntuales como calderas que quemen búnker y diésel, lo cual podría explicar los picos y cambios súbitos observados en la concentración.



Figura 38. Concentración horaria de dióxido de azufre (en unidades de ppb) en plantel de RECOPE, Cartago, 2023 y 2024.

4.2.1.3 Dióxido de nitrógeno

Los valores de concentración promedio diaria de dióxido de nitrógeno (NO₂) registrados en la estación RECOPE no deben superar los 13,5 partes por billón (ppb), de acuerdo con las guías establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para proteger la salud humana. Durante el año 2023, aproximadamente un 12 % de las mediciones superaron este límite, mientras que en 2024 ese porcentaje aumentó a un 21 % (**Figuras 39 y 40**). Este incremento evidencia un deterioro en la calidad del aire relacionado con este contaminante, posiblemente debido a un aumento en la actividad de las fuentes de emisión cercanas como industriales, vehiculares y cualquier otra de combustión.

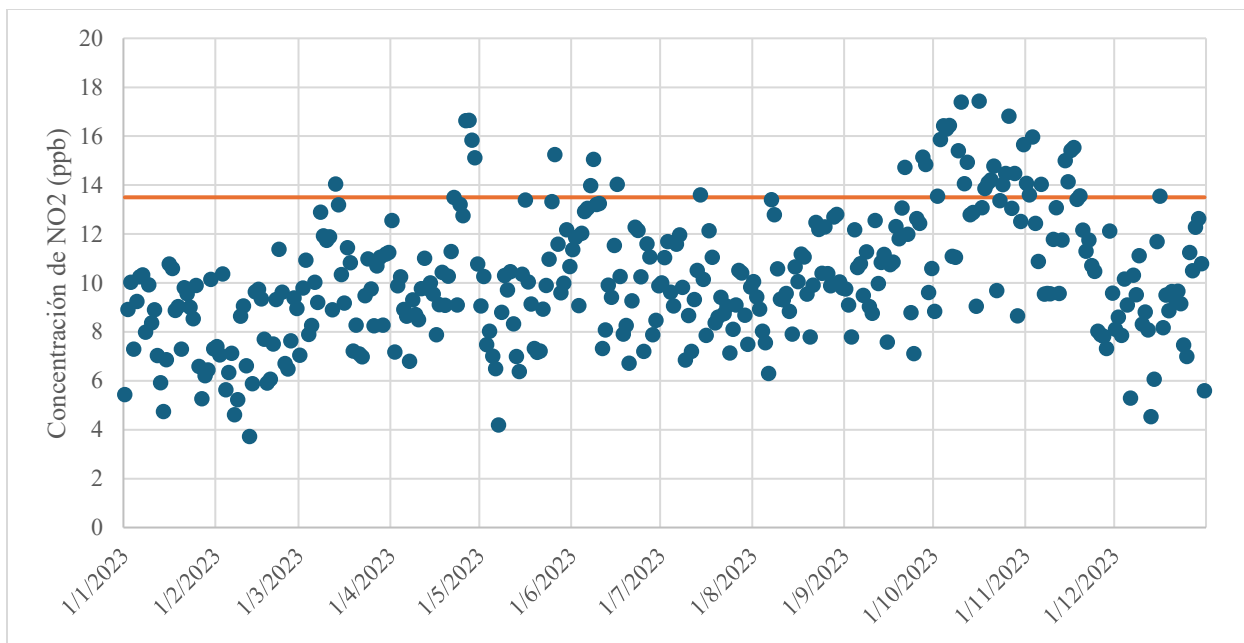


Figura 39. Concentración promedio diaria de dióxido de nitrógeno (en unidades de ppb) en RECOPE, Cartago, 2023.

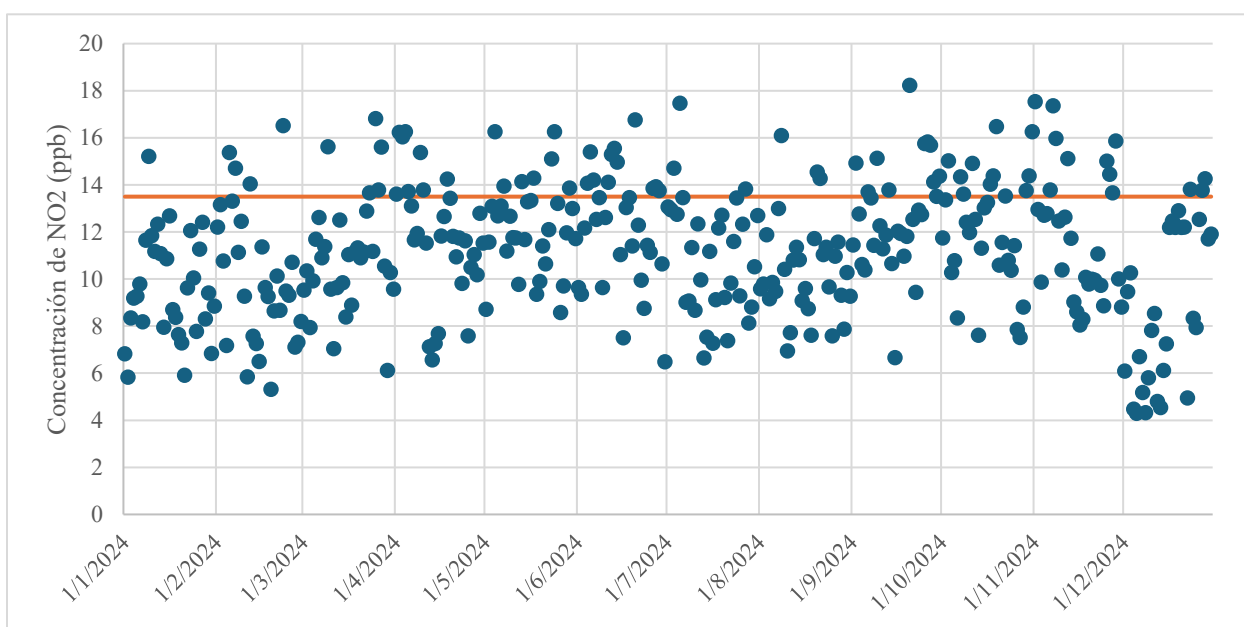


Figura 40. Concentración promedio diaria de dióxido de nitrógeno (en unidades de ppb) en RECOPE, Cartago, 2024.

Según la **Figura 41**, durante los años 2023 y 2024 la concentración horaria de NO₂ en la estación RECOPE presentan comportamientos similares, ambos con dos picos destacados; uno entre las 6:00 y 8:00 horas, y otro entre las 18:00 y 20:00 horas. Estos incrementos podrían estar asociados a los horarios de mayor actividad vehicular, coincidiendo con las horas punta de entrada y salida laboral, que generan un aumento significativo en las emisiones contaminantes. Además, la estabilidad atmosférica y las condiciones meteorológicas durante estas franjas horarias pueden favorecer la acumulación de NO₂ cerca del suelo, limitando su dispersión y elevando las concentraciones registradas.



Figura 41. Concentración horaria de dióxido de nitrógeno (en unidades de ppb) en plantel de RECOPE, Cartago, 2023 y 2024.

4.2.1.4 Carbono negro

El carbono negro es un contaminante atmosférico en forma de partículas finas que puede permanecer suspendido en el aire durante períodos prolongados, contribuyendo significativamente a la contaminación del aire, especialmente en zonas urbanas y en regiones donde se produce la quema de biomasa y combustibles fósiles pesados (diésel y búnker). Además, es clasificado como un contaminante climático de vida corta (CCVC), debido a su capacidad para absorber radiación solar y contribuir al calentamiento global. También tiene impactos negativos sobre la salud humana, ya que puede penetrar profundamente en el sistema respiratorio.

En la estación RECOPE, las concentraciones promedio de carbono negro fueron de 3 026 ng/m³ en el año 2023 (con datos disponibles de julio a diciembre) y de 2 466 ng/m³ en el año 2024 (con datos de enero a noviembre), como se muestra en las **Figuras 42 y 43**. Esta variación podría estar asociada a fluctuaciones en las fuentes de emisión, condiciones meteorológicas o patrones estacionales de actividad humana. En cuanto a los valores mensuales más altos, noviembre de 2023 presentó la mayor concentración con un promedio de 4 015 ng/m³, mientras que en noviembre de 2024 se registró un pico aún más elevado, alcanzando un promedio de 10 410 ng/m³. Este valor atípicamente alto en 2024 sugiere un posible evento puntual o un incremento significativo en las emisiones durante ese periodo, lo cual amerita un análisis más detallado para identificar sus causas.

Cabe destacar que las mediciones de concentración de carbono negro presentan una alta variabilidad temporal, con picos significativos registrados en momentos específicos. En 2023, se alcanzaron valores máximos de hasta 18 481 ng/m³, mientras que en 2024 se observaron concentraciones de hasta 16 660 ng/m³. Esta variabilidad puede deberse a factores como el aumento puntual del tráfico vehicular, actividades de combustión cercanas, o condiciones meteorológicas que favorecen la acumulación de contaminantes. Es importante considerar que la estación RECOPE se encuentra ubicada relativamente cerca de una carretera principal, lo cual podría influir en las mediciones, especialmente durante horas pico o en condiciones de baja dispersión atmosférica. Además de la influencia de fuentes puntuales cercanas al encontrarse en una zona industrial.

Además de los efectos adversos sobre la salud humana, el carbono negro también tiene un impacto significativo en el efecto invernadero y el cambio climático. Este contaminante atmosférico posee la capacidad de absorber la radiación solar, lo que contribuye al aumento de la temperatura atmosférica y, por tanto, al calentamiento global. Cuando se deposita sobre superficies como nieve, hielo o suelos claros, reduce su albedo (capacidad de reflejar la luz solar), incrementando la absorción de energía térmica y acelerando el deshielo en regiones sensibles.

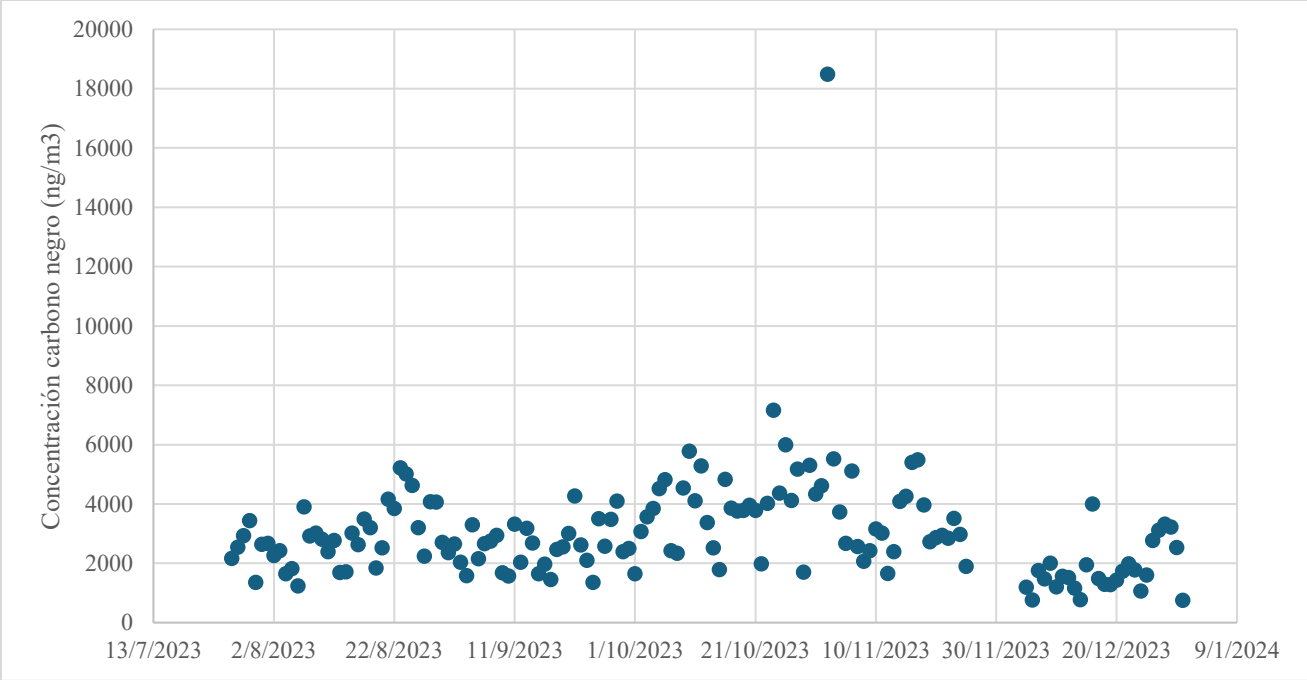


Figura 42. Concentración de carbono negro (en unidades de ng/m^3) en plantel de RECOPE, Cartago, 2023.

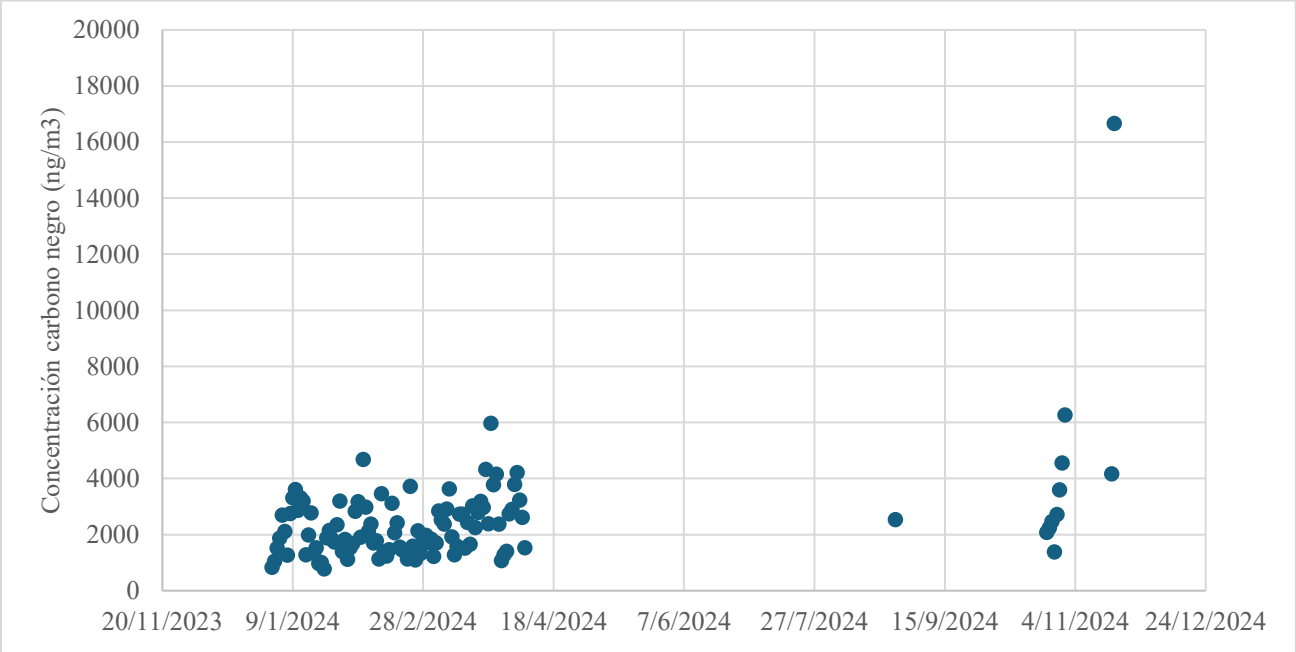


Figura 43. Concentración de carbono negro (en unidades de ng/m^3) en plantel de RECOPE, Cartago, 2024.

En la **Figura 44**, se observa que la concentración horaria de carbono negro en la estación RECOPE durante el año 2023 presenta dos picos principales; uno en el rango de 6:00 a 7:00 horas y otro entre las 18:00 y 20:00 horas. Para el año 2024, aunque se mantiene un pico marcado en las primeras horas del día (6:00 a 7:00), el aumento en las horas de la tarde no es tan pronunciado, aunque todavía se registran valores elevados entre las 18:00 y 20:00 horas. Esta distribución horaria sugiere una posible relación con los patrones de tráfico vehicular, ya que coincide con los horarios pico de entrada y salida laboral, en los cuales aumentan las emisiones por combustión de motores.

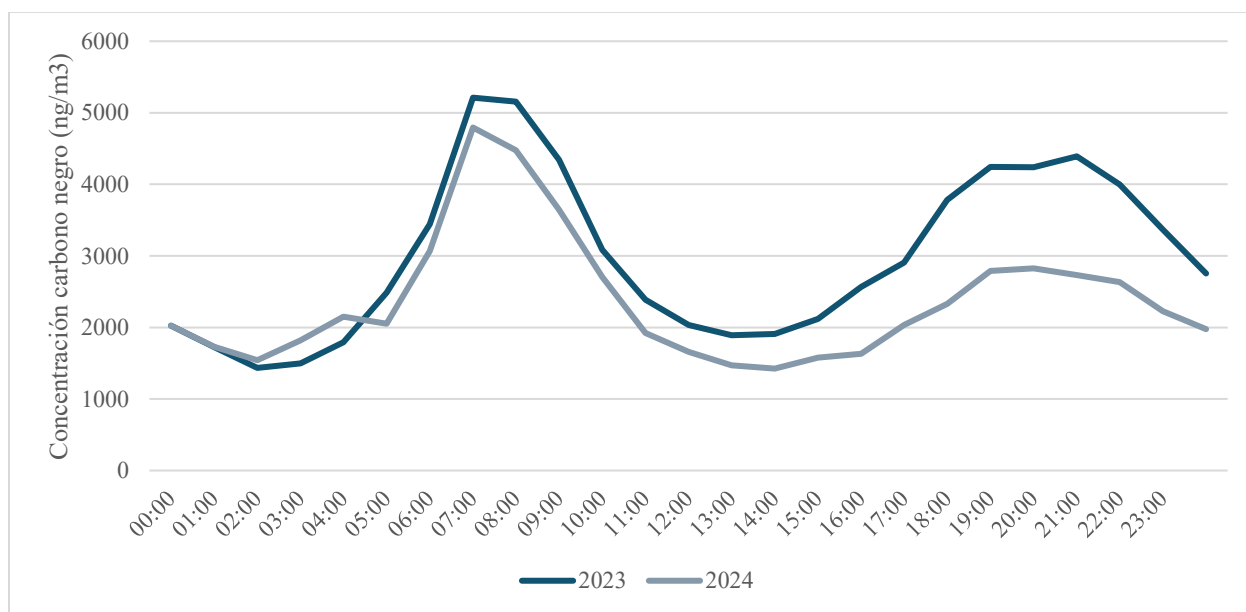


Figura 44. Concentración horaria de carbono negro (en unidades de ng/m^3) en plantel de RECOPE, Cartago, 2023 y 2024.

4.2.1.5 Monóxido de carbono

En cuanto a la concentración horaria de monóxido de carbono (CO), se observó un pico destacado entre las 7:00 y 8:00 horas, posiblemente asociado al aumento del tránsito vehicular en horas de la mañana. Posteriormente, los valores disminuyen considerablemente hacia el mediodía, alcanzando un mínimo alrededor de las 12:00 horas. Sin embargo, se registra un repunte a las 13:00 horas, seguido de una nueva disminución a las 14:00, y un ligero aumento nuevamente a las 15:00 horas (**Figura 45**).

Lo anterior puede deberse a que los picos observados en la concentración horaria de CO estén relacionados con el tráfico vehicular, que representa una de las principales fuentes de emisión de este contaminante. El aumento entre las 7:00 y 8:00 a.m. coincide con el inicio de la jornada laboral y escolar, momento en el que se incrementa significativamente el flujo vehicular. Durante estas horas, los motores de combustión interna, especialmente en arranques en frío, liberan mayores cantidades de CO. El repunte alrededor de las 13:00 horas podría estar asociado con el retorno de las personas tras el almuerzo o con cambios de turno en zonas urbanas e industriales. Finalmente, el aumento a las 15:00 horas puede vincularse al inicio del tráfico vespertino o al incremento de actividades comerciales e industriales durante las últimas horas de la jornada. Esto no descarta también la influencia de fuentes puntuales en los alrededores al existir distintas industrias en los alrededores.

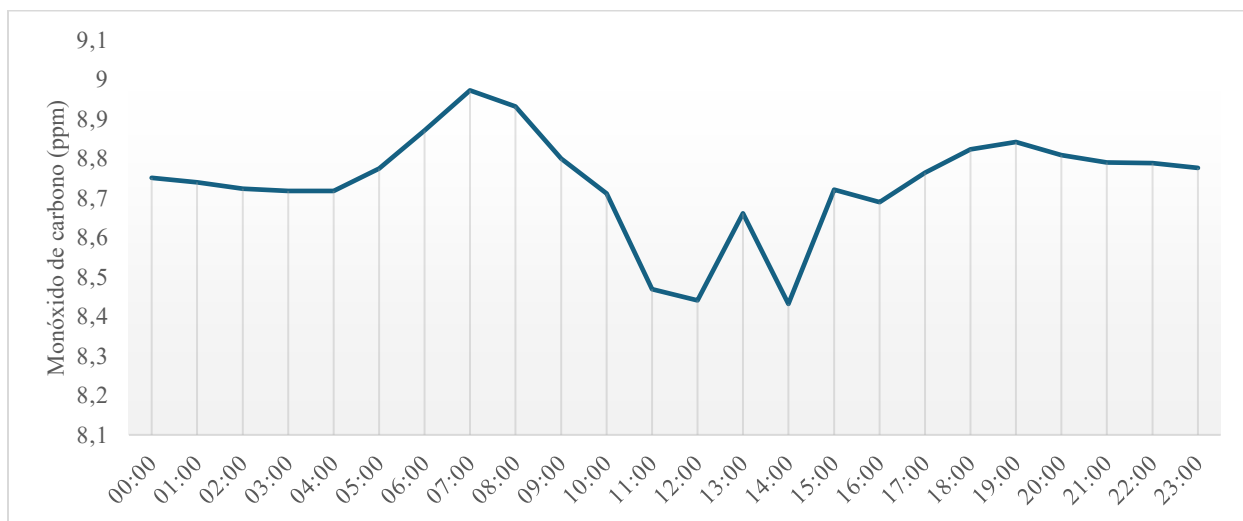


Figura 45. Concentración horaria de monóxido de carbono (en unidades de ppm) en plantel de RECOPE, Cartago, 2024.

4.2.1.6 Ozono

Los valores de concentración promedio diaria de ozono (O_3) en la estación RECOPE, según el Reglamento de Calidad del Aire para Contaminantes Criterio (Decreto N.º 39951-S), no deben superar los 100 partes por billón (ppb), considerando promedios horarios. En el año 2023, el valor promedio de concentración horaria fue de 6,0 ppb, mientras que en 2024 se incrementó a 16,5 ppb (**Figuras 46 y 47**).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) no establece un valor guía para concentraciones promedio de ozono (O_3) en 24 horas, debido a que este contaminante presenta un comportamiento

altamente fotoquímico y variable a lo largo del día, influenciado principalmente por la radiación solar. A diferencia de otros contaminantes como el material particulado (PM_{10} o $PM_{2.5}$), cuya exposición prolongada se evalúa mediante promedios diarios, el ozono tiende a alcanzar sus máximos niveles durante el mediodía y las primeras horas de la tarde, cuando la radiación solar es más intensa. Por esta razón, el análisis se realiza a partir de valores promedio por hora, ya que permiten observar la evolución general del contaminante a lo largo del día.

En la **Figura 46**, los datos correspondientes al periodo de enero a junio del 2023 en concentración de ozono presentan inconsistencias debido a un mal funcionamiento del equipo de monitoreo, por lo que no se tomaron en cuenta para los análisis de datos.

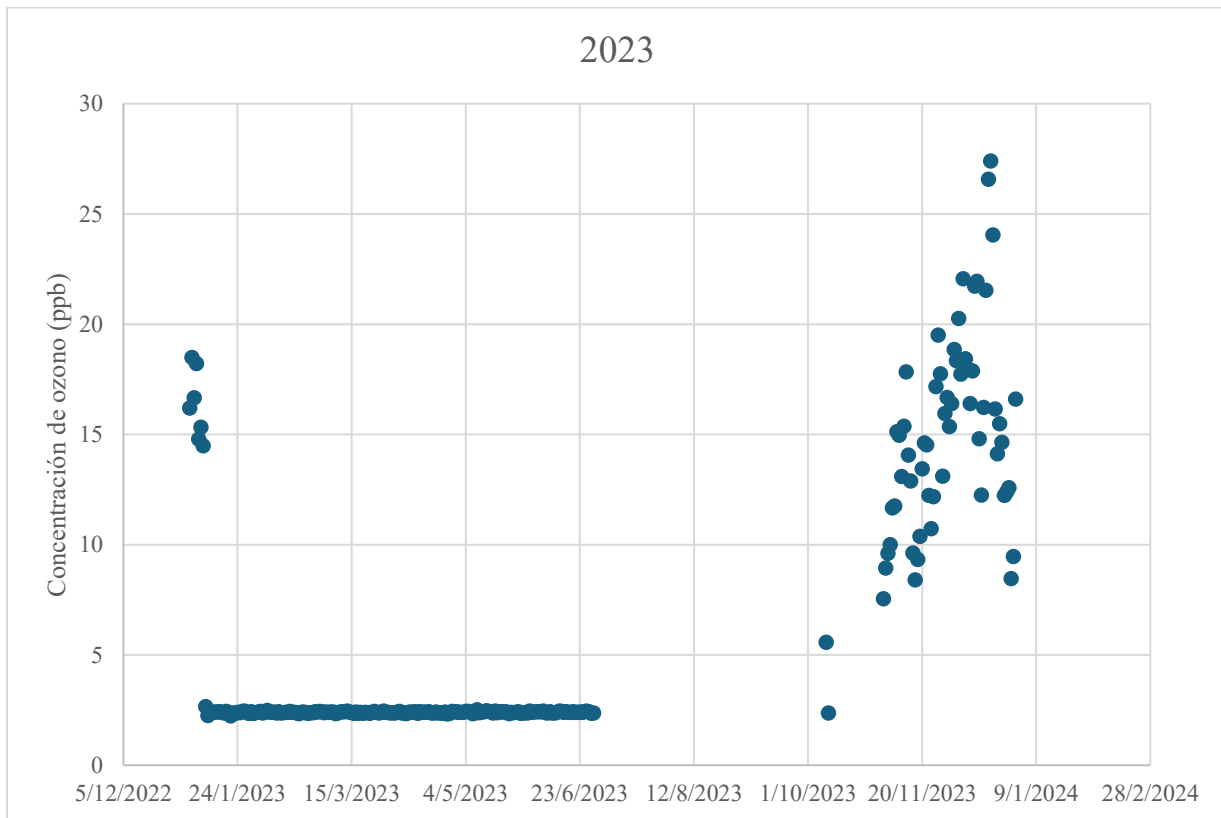


Figura 46. Concentración ozono (en unidades de ppb) en plantel de RECOPE, Cartago, 2023.

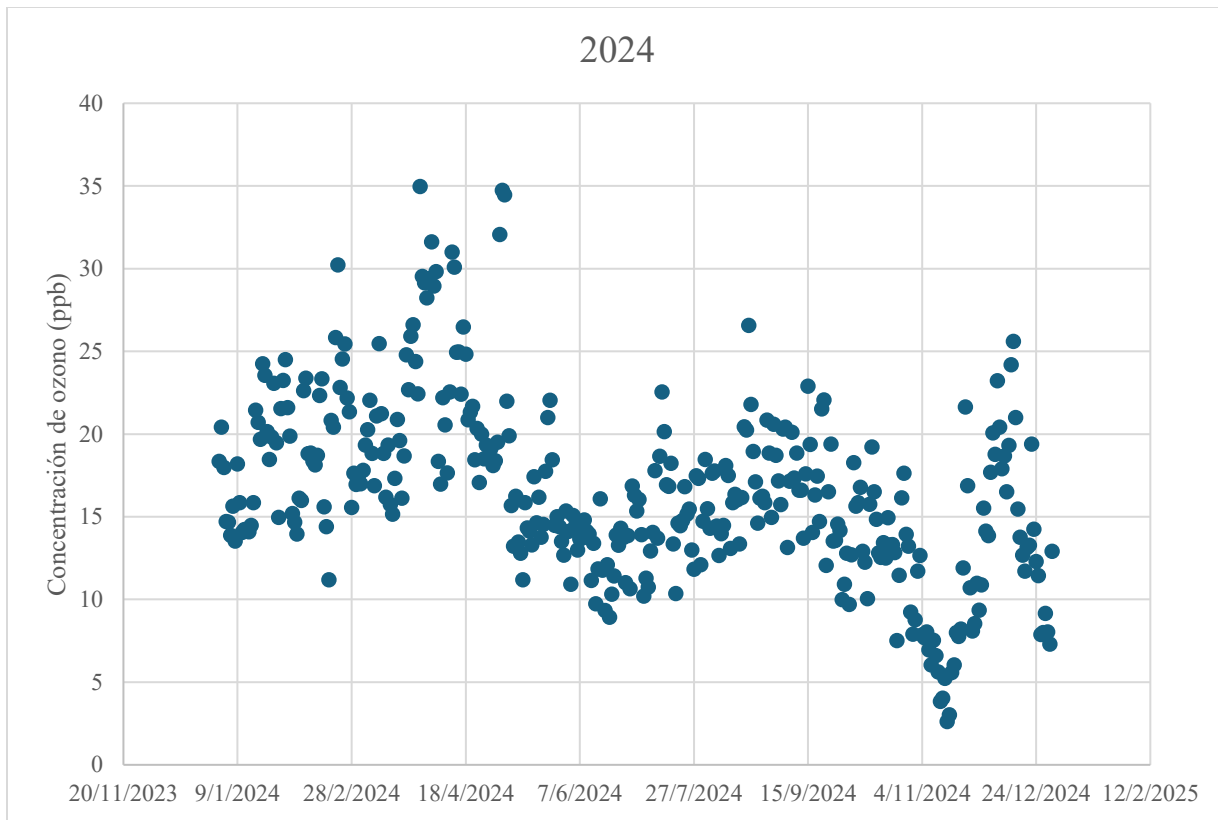


Figura 47. Concentración ozono (en unidades de ppb) en plantel de RECOPE, Cartago, 2024.

Con respecto a la concentración horaria de O_3 en la estación RECOPE durante los años 2023 y 2024, se observa un pico significativo entre las 12:00 y las 14:00 horas en ambos años (**Figura 48**). Este comportamiento es consistente con el patrón típico del ozono, cuyo aumento puede estar relacionado con la intensidad de la radiación solar durante el mediodía, que favorece las reacciones fotoquímicas responsables de su formación.

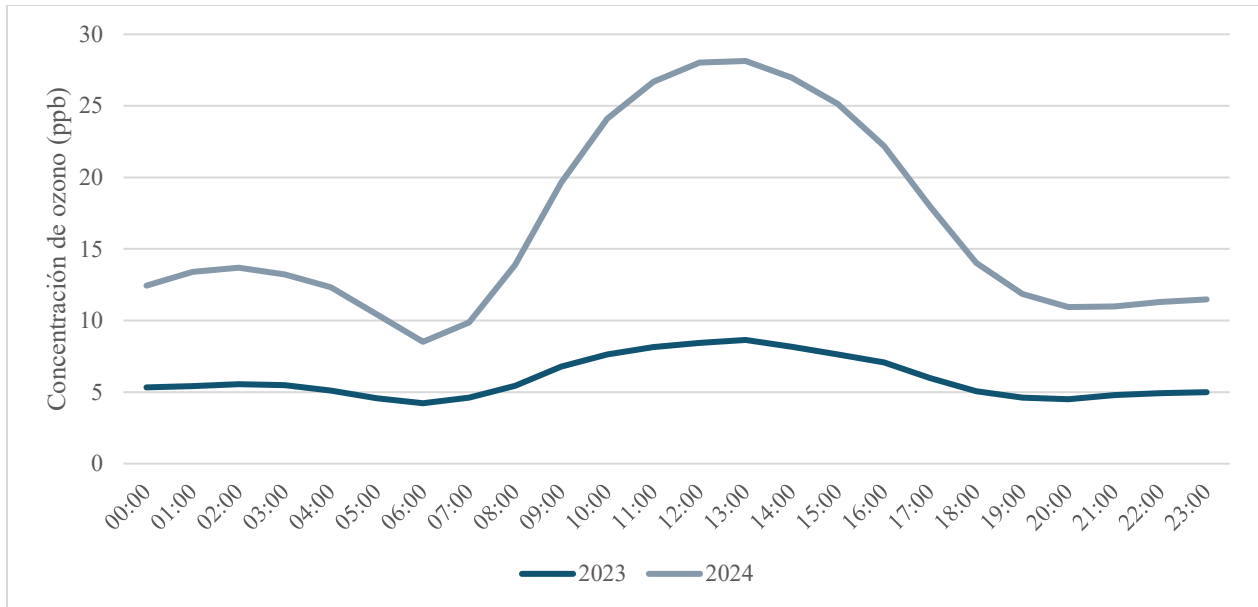


Figura 48. Concentración horaria ozono (en unidades de ppb) en plantel de RECOPE, Cartago, 2023 y 2024.

4.2.2 Red automática de Coronado

4.2.2.1 Material particulado

Los valores de concentración promedio diaria de material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la estación de Coronado. Según la OMS los valores anuales no deben superar los $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} . Por su parte, el Reglamento de Calidad del Aire para Contaminantes Criterio (Decreto Ejecutivo N.º 39951-S) establece límites máximos permisibles anuales de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} .

En cuanto a los datos registrados, el valor promedio anual de $PM_{1.0}$, aunque no se encuentra regulado por las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021) ni por el Reglamento de Calidad del Aire para Contaminantes Criterio de Costa Rica (Decreto Ejecutivo N.º 39951-S), presentó una disminución de $4,18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2023 a $1,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2024. En el análisis de la distribución de los datos correspondientes al año 2023, se observa que la mayoría de los valores diarios se mantuvieron por debajo de los $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$; no obstante, se registraron valores puntuales con concentraciones superiores a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que sugiere la posible influencia de fuentes emisoras específicas o condiciones atmosféricas particulares que favorecieron la acumulación de partículas ultrafinas en ciertos momentos del año (**Figura 49**).

Para el año 2024, los datos disponibles corresponden al periodo de enero a marzo. Durante este trimestre, las concentraciones de $PM_{1.0}$ presentan una dispersión amplia, con valores distribuidos principalmente en el rango de 0 a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. No obstante, se observa que la mayoría de los valores tienden a concentrarse por debajo de los $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que indica una prevalencia de niveles bajos de partículas ultrafinas en el ambiente. Esta tendencia sugiere condiciones de calidad del aire favorables durante este periodo, con menor presencia de eventos contaminantes extremos en comparación con lo registrado en 2023 (**Figura 50**).

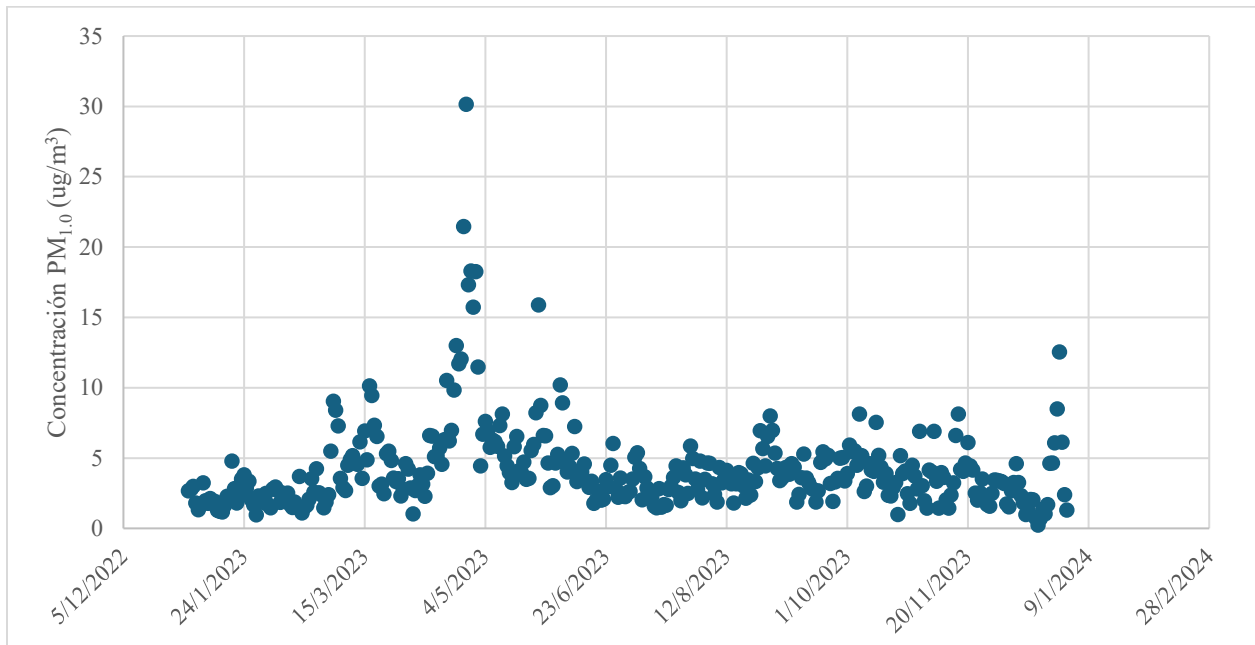


Figura 49. Concentración de $PM_{1.0}$ (en unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en Coronado, 2023.

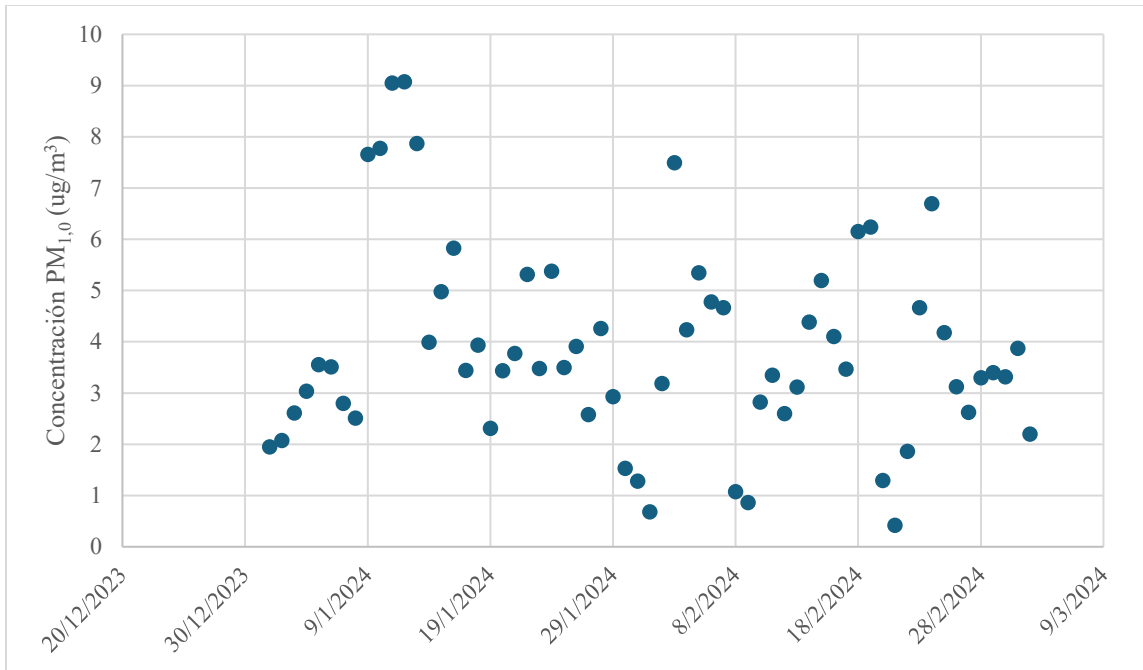


Figura 50. Concentración de PM_{1.0} (en unidades de µg/m³) en Coronado, 2024.

En el caso del PM_{2.5}, cuyo límite anual recomendado por la OMS es de 5 µg/m³, la concentración promedio anual fue de 5,57 µg/m³ en 2023, superando levemente el valor guía. Para 2024, aunque los datos disponibles corresponden únicamente al periodo de enero a marzo, se registró una concentración promedio de 1,46 µg/m³, lo que representa una mejora significativa, ubicando los niveles por debajo del umbral recomendado. Esta reducción podría estar relacionada con una disminución en las emisiones provenientes de las fuentes cercanas.

Al analizar la distribución de los valores diarios, en 2023 la mayoría de las concentraciones se ubicaron por debajo de 10 µg/m³, aunque se registraron algunos episodios aislados con niveles entre 10 y 35 µg/m³, posiblemente asociados a eventos puntuales de contaminación. En contraste, los datos de 2024 muestran valores más uniformemente distribuidos entre 0 y 12 µg/m³, sin presencia de concentraciones elevadas, lo que refuerza la tendencia hacia una mejora en la calidad del aire durante ese primer trimestre del año (**Figuras 51 y 52**).

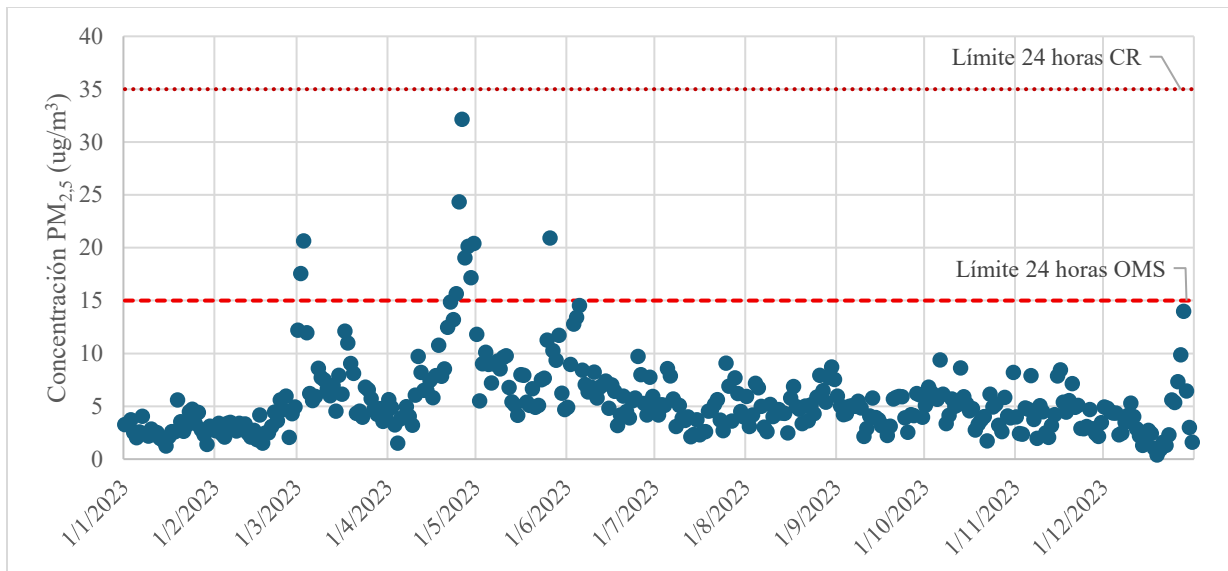


Figura 51. Concentración de PM_{2.5} (en unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en Coronado, 2023.

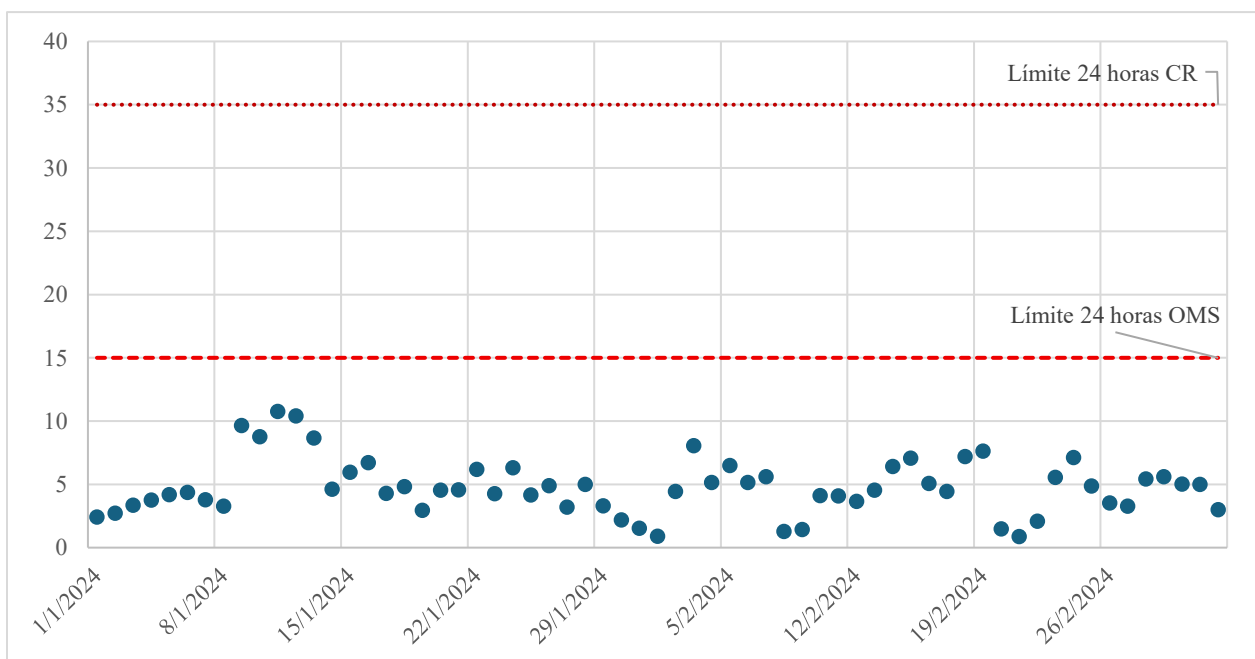


Figura 52. Concentración de PM_{2.5} (en unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en Coronado, 2024.

Respecto al PM₁₀, cuyo límite anual recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) es de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, se registró un valor promedio anual de $8,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2023 y una concentración de $1,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el periodo de enero a marzo de 2024. Ambos valores se encuentran por debajo

de las recomendaciones internacionales, y la disminución adicional observada en 2024 refuerza una tendencia positiva en la calidad del aire.

En cuanto a la distribución diaria, para 2023 la mayoría de los valores se concentraron por debajo de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en 2024 los valores estuvieron más dispersos, fluctuando entre 0 y $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, sin presentarse episodios de alta concentración. Estas reducciones conjuntas pueden tener impactos beneficiosos en la salud respiratoria de la población y contribuir a la conservación de ecosistemas urbanos que son sensibles a la contaminación atmosférica (**Figuras 53 y 54**).

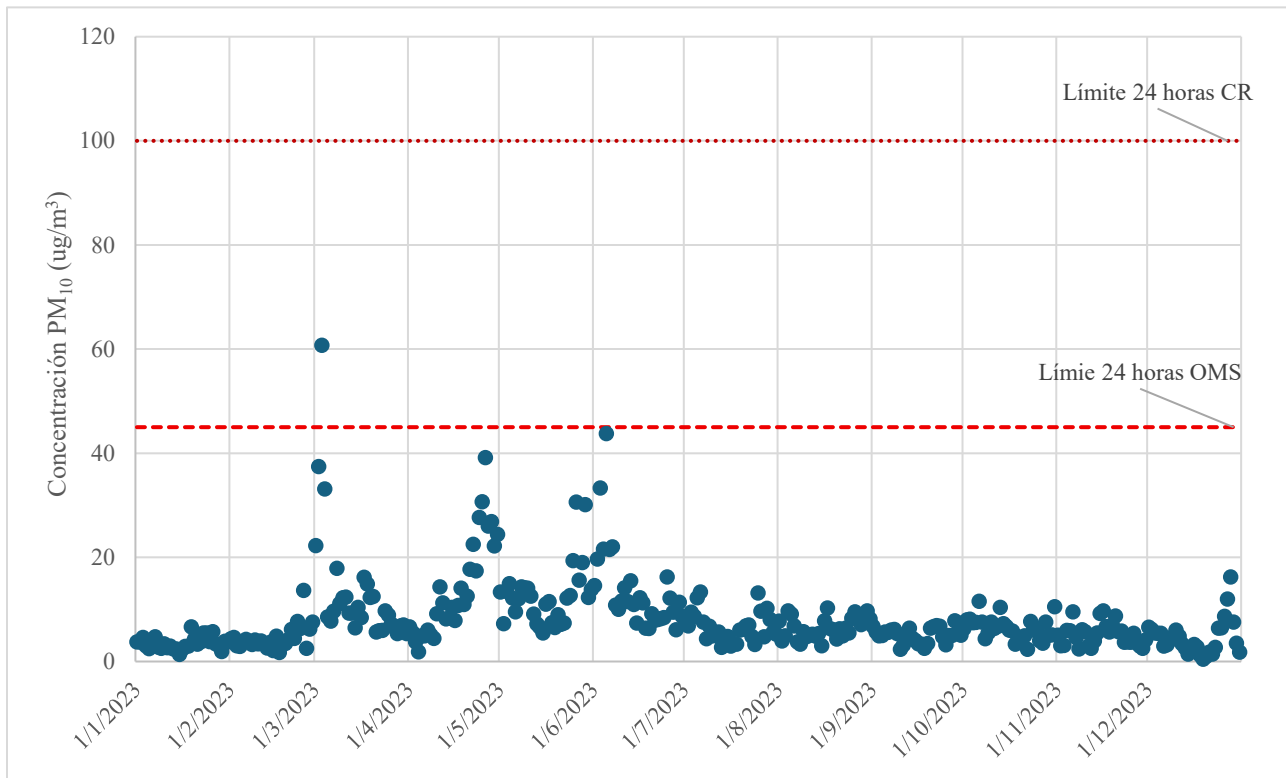


Figura 53. Concentración de PM₁₀ (en unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en Coronado, 2023.

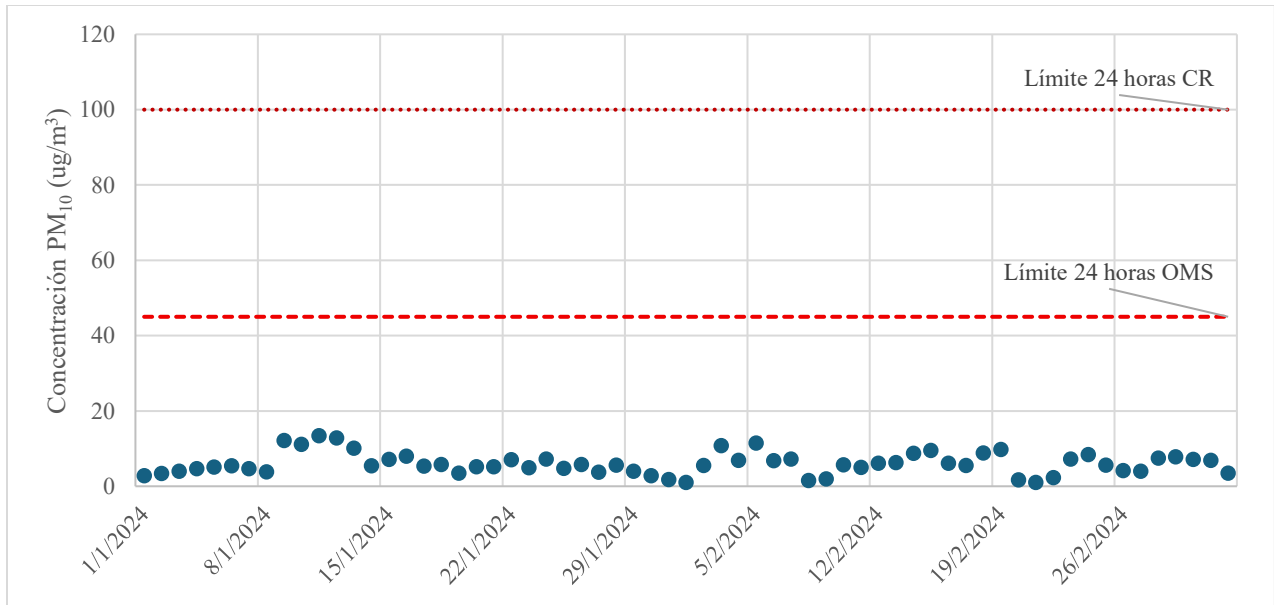


Figura 54. Concentración de PM₁₀ (en unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en Coronado, 2024.

Al analizar las concentraciones horarias de PM_{1.0}, PM_{2.5} y PM₁₀ en Coronado durante 2023 y 2024 (expresadas en unidades de ppb), se observa que los valores más altos de PM_{1.0} y PM_{2.5} se registran entre las 17:00 y 18:00 horas. En contraste, las concentraciones máximas de PM₁₀ se presentan en el periodo comprendido entre las 11:00 y 15:00 horas. Esta distribución horaria sugiere diferencias en las fuentes de emisión o en los procesos atmosféricos que afectan la dispersión y acumulación de las distintas fracciones de material particulado a lo largo del día (**Figura 55**).

Cabe destacar que este sitio de monitoreo se encuentra en los límites de la zona urbana de la GAM por lo que sus condiciones reflejan el comportamiento esperado de un sitio “blanco” de baja influencia de actividad humana urbana compleja.

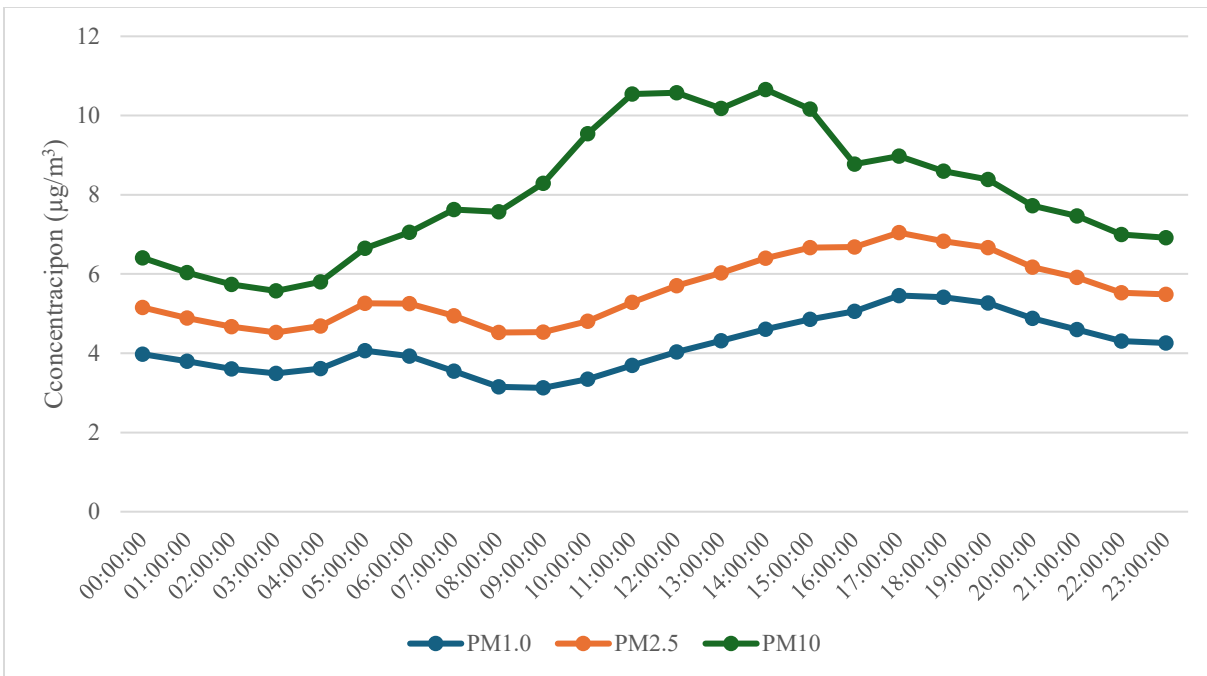


Figura 55. Concentración horaria de PM_{1.0}, PM_{2.5} y PM₁₀ (en unidades de ppb) en Coronado, 2023 y 2024.

4.2.2.1 Dióxido de azufre

Los valores de concentración promedio anual de dióxido de azufre (SO₂) en la estación de Coronado, según los lineamientos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), no deben superar los 15 partes por billón (ppb). En 2023, el valor promedio fue de 0,47 ppb, mientras que en 2024 aumentó ligeramente a 0,71 ppb, manteniéndose en ambos casos muy por debajo del umbral recomendado.

Al analizar la distribución de los datos, en 2023 la mayoría de los valores se ubicaron por debajo de 0,5 ppb, indicando concentraciones consistentemente bajas. En 2024, los valores se concentraron principalmente por debajo de 2 ppb, aunque se registraron algunos valores atípicos superiores a 5 ppb, posiblemente asociados a eventos específicos o fuentes puntuales de emisión (**Figuras 56 y 57**). A pesar de este ligero incremento, las concentraciones observadas continúan reflejando una buena calidad del aire con respecto a este contaminante.

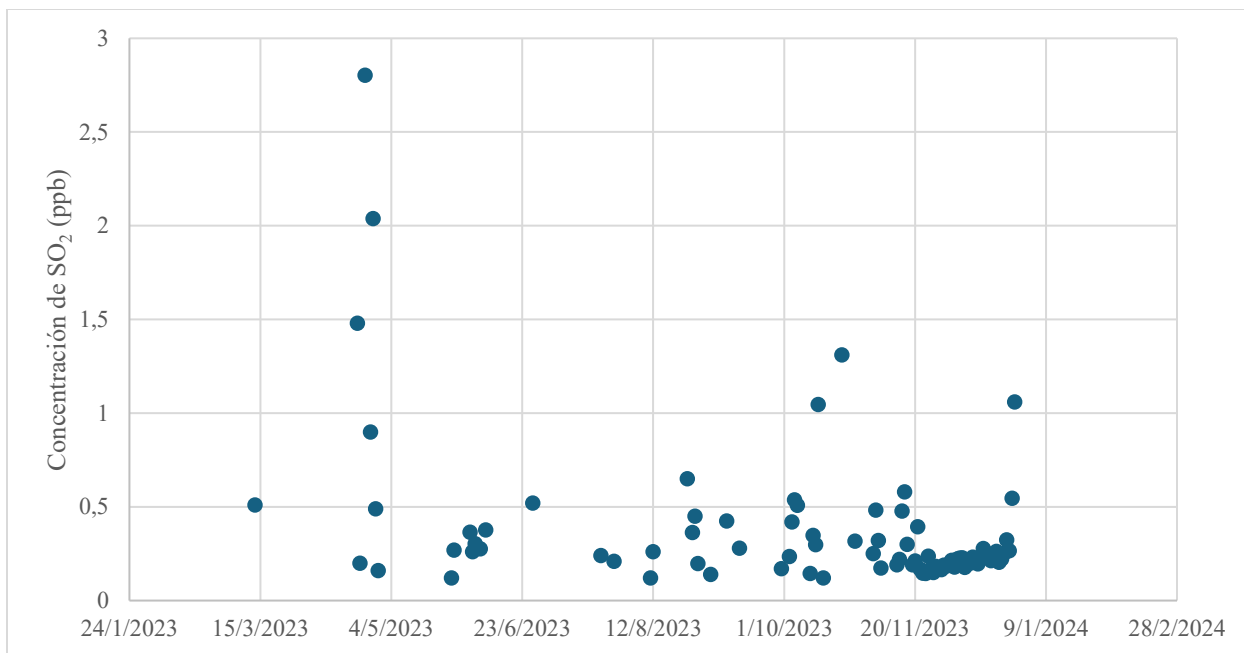


Figura 56. Concentración media diaria de dióxido de azufre (en unidades de ppb) en Coronado, 2023.

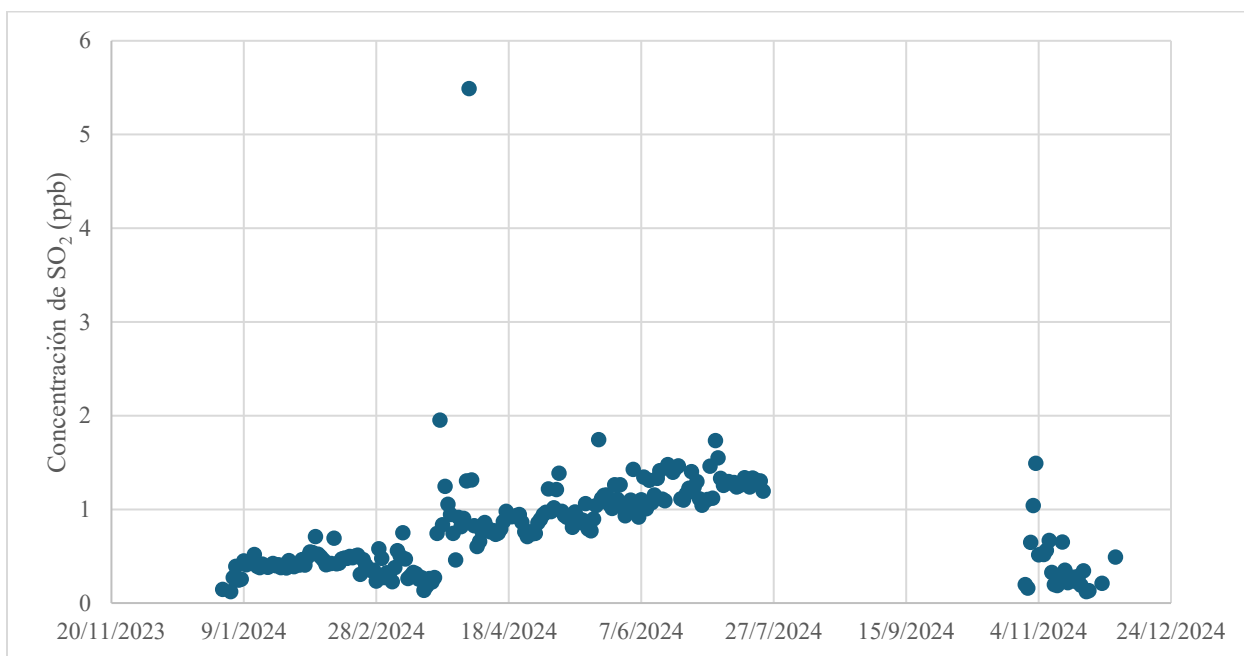


Figura 57. Concentración media diaria de dióxido de azufre (en unidades de ppb) en Coronado, 2024.

Al analizar las concentraciones horarias de SO₂, se observa que los valores más elevados tienden a registrarse entre las 10:00 y 11:00 horas. Este comportamiento podría estar relacionado con un aumento en la actividad humana durante las horas de la mañana en un zona predominantemente residencial y escolar.

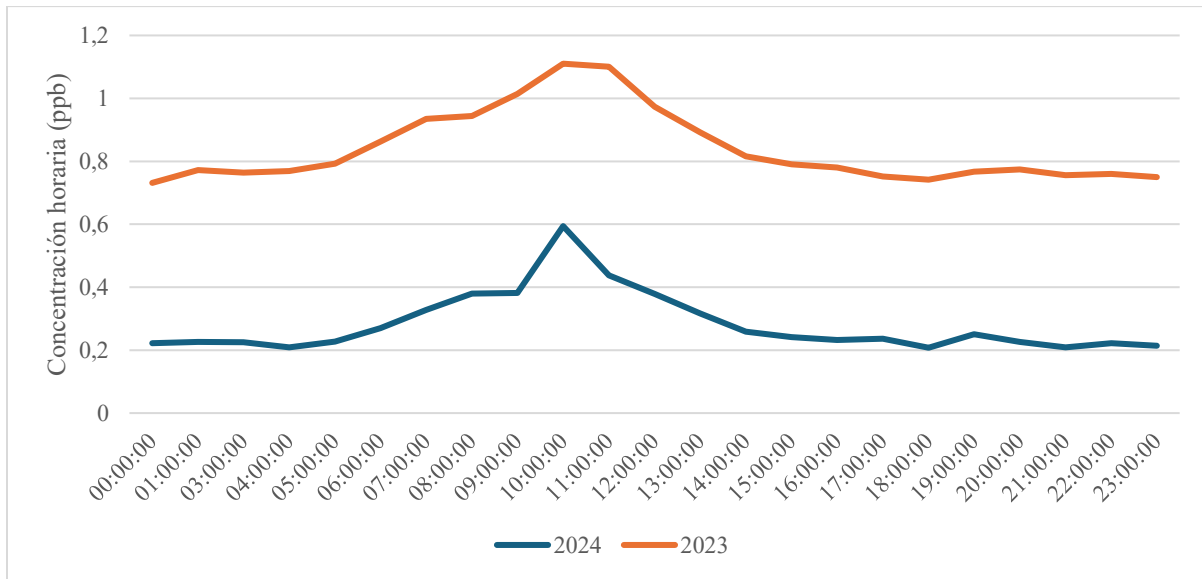


Figura 58. Concentración horaria dióxido de azufre (en unidades de ppb) en Coronado, 2023 y 2024.

4.2.3 Campaña de monitoreo Volcán Poás

Entre abril y mayo de 2024 se realizó una campaña de monitoreo de partículas y dióxido de azufre en San Pedro de Poás de Alajuela, debido a los constantes reportes de contaminación del aire por un aumento significativo en la actividad del Volcán Poás. Para esto se trasladó una estación móvil de monitoreo del Ministerio de Salud, operada por el Laboratorio de Análisis Ambiental de la EDECA-UNA. Con el fin de brindar reportes constantes a las autoridades correspondientes para la vigilancia de la calidad del aire y facilitar la toma de decisiones.

4.2.3.1 Material particulado

Se calcularon los valores de concentración promedio diaria de material particulado, específicamente PM_{2.5} y PM₁₀, durante el período comprendido entre abril y mayo de 2024. Donde los promedios diarios calculados para estas partículas estuvieron constantemente por debajo de los valores límite del reglamento de Calidad del Aire para Contaminantes Criterio, establecidos en 35

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} , lo que indica que, en general, los niveles de contaminación por partículas finas no superaron los umbrales de riesgo para la salud (**Cuadro 9**).

Sin embargo, se observaron eventos puntuales de incremento en las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} . Estos incrementos fueron más notables entre el 2 al 9 de mayo de 2024, cuando las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ superaron ligeramente el límite de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, alcanzando un valor promedio de $36.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el 3 y 4 de mayo y con un valor promedio de $38.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre el 4 y 5 de mayo. Aunque el nivel de PM_{10} se mantuvo generalmente dentro de los límites establecidos, en algunas ocasiones se registraron picos elevados, aunque sin superar el valor máximo permitido de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Cuadro 9**).

Cuadro 9. Concentración de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} (en unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el Volcán Poas, 2024.

Periodo	Rango Instantáneo $\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio $\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Rango Instantáneo PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
05–07 abril	–	< 35	–	< 100
05–10 abril	0.9 – 36.7	10.1	1.2 – 42.2	14.7
11–16 abril	0.5 – 15.4	4.4	1.6 – 27.6	7.3
16–19 abril	1.9 – 21.8	10.8	6.9 – 38.9	19.5
19–24 abril	1.3 – 39.8	13.8	1.9 – 54.0	20.2
24 abril – 02 mayo	0.5 – 30.4	10.7	0.7 – 53.5	16.3
02–04 mayo	–	36.1 (03–04 mayo)	–	< 100
04–09 mayo	–	38.2 (04–05 mayo)	–	< 100
09–24 mayo	0.3 – 41.6	10.1	0.4 – 55.0	14.1

La dirección del viento predominante, proveniente del noreste, jugó un papel importante en la distribución de las partículas finas, como se muestra en la **Figura 59**, donde se observa el comportamiento de la concentración de partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$) en función de la dirección del viento. Es claro que la dirección del viento predominante es la que proviene del noreste, pero la contribución más alta de partículas finas no se puede atribuir a una sola dirección del viento, incluyendo la proveniente en la dirección del volcán. Esto es especialmente relevante para el periodo comprendido entre el viernes 05 de abril y el miércoles 10 de abril, donde se detectó la presencia de ceniza proveniente de alguna quema de biomasa hacia el sector sur de la zona el miércoles 10 de abril, lo que generó un ligero aumento en las concentraciones de partículas finas.

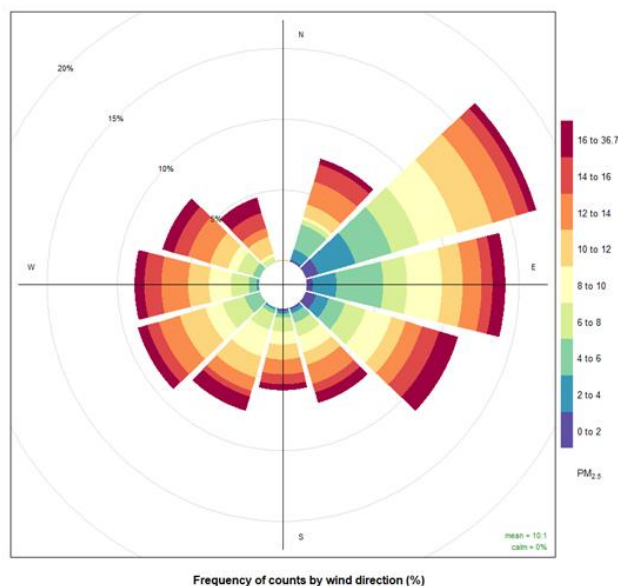


Figura 59. Comportamiento de la concentración de partículas fina (PM_{2.5}) en función de la dirección del viento Volcán Poás, del 05 al 10 de abril 2024.

4.2.2.1 Dióxido de azufre

El monitoreo de dióxido de azufre (SO₂) en la región también arrojó resultados significativos durante el análisis de la calidad del aire en abril y mayo de 2024. Aunque en la mayoría de los días las concentraciones de SO₂ se mantuvieron por debajo del límite máximo de 75 ppb establecido por el Reglamento de Calidad del Aire, se registraron episodios de concentración elevada, especialmente durante eventos de actividad volcánica elevada reportada en el Volcán Poás.

Entre las fechas de abril y mayo, picos de SO₂ se observaron principalmente durante la madrugada y mañana, coincidiendo con los momentos de mayor actividad volcánica y condiciones favorables de viento para que la pluma llegara a San Pedro de Poás. Por ejemplo, entre las 11:00 p.m. del 2 de mayo y las 2:00 a.m. del 3 de mayo, las concentraciones de SO₂ alcanzaron 264 ppb, lo que superó considerablemente el límite horario de 75 ppb. Este incremento fue acompañado de fuertes olores a azufre en la zona, lo que coincidió con los reportes de OVSICORI sobre la alta actividad del volcán.

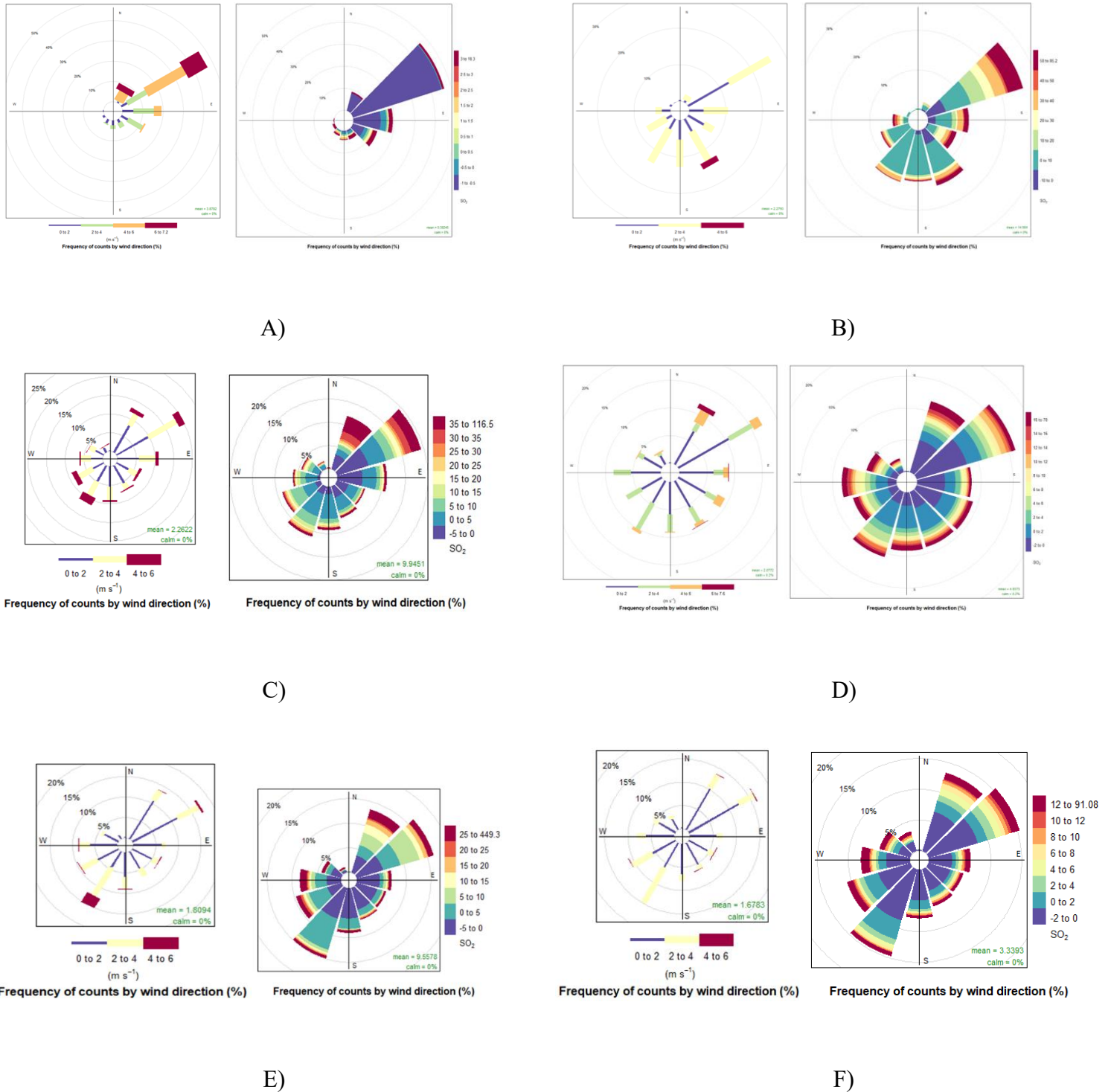
Otro evento significativo ocurrió el 6 de mayo, entre las 00:00 y 06:00 horas, cuando el SO₂ alcanzó picos de 284.7 ppb, nuevamente superando el límite permitido, lo que también estuvo asociado a reportes sobre la presencia de olores azufrados en las zonas cercanas. A pesar de estos

aumentos puntuales, los promedios diarios de SO₂ durante la mayor parte del periodo se mantuvieron dentro de los límites establecidos (**Cuadro 10**).

Cuadro 10. Concentración de dióxido de azufre (en unidades de ppb) en el Volcán Poas, 2024.

Periodo	Rango Instantáneo (ppb)	Promedio (ppb)
11–16 abril	0 – 18.3	0.4
16–19 abril	0 – 85.2	14.6
19–24 abril	0 – 116.5	9.9
24 abril – 02 mayo	0 – 81.4	4.8
02–04 mayo	Hasta 264	–
04–09 mayo	Hasta 284.7	–
09–24 mayo	0 – 91.1	3.3

El comportamiento del SO₂ estuvo estrechamente relacionado con las condiciones meteorológicas de la zona, ya que el viento predominante del noreste ayudó a transportar las concentraciones más altas de SO₂ en ciertas direcciones. Es claro que el viento predominante proviene del noreste, como se observa en la **figura 60**. Sin embargo, para algunos momentos (E y F), se observa que el viento del suroeste ha comenzado a tomar fuerza. A pesar de estos picos, las concentraciones de SO₂ se redujeron rápidamente después de cada evento de alta emisión, y no se reportaron violaciones continuas a los límites establecidos por la normativa. Desde el noreste se pueden atribuir las concentraciones más altas de dióxido de azufre. Esto está relacionado con el comportamiento de la pluma del Volcán Poás, la cual cambia su dirección de acuerdo a la hora del día.



Nota: A) 11 al 16 de abril, B) 16 al 19 de abril, C) 19 al 24 de abril, D) 24 de abril al 02 de mayo, E) 04 al 09 de mayo, F) 09 al 24 de mayo.

Figura 60. Comportamiento de la meteorología en el sitio de medición y su relación con el dióxido de azufre, Volcán Poás, 2024.

5. Conclusiones

- Durante el periodo de monitoreo 2023-2024, el promedio anual de concentración de PM_{10} en las estaciones de la Gran Área Metropolitana (GAM) de Costa Rica se mantuvo por debajo del límite nacional establecido en el Decreto Ejecutivo N.º 39951-S ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$), lo que indica un cumplimiento normativo general en cuanto a este contaminante. Sin embargo, todos los sitios monitoreados superaron el límite recomendado por la OMS para exposición anual de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- El punto de mayor concentración promedio anual de PM_{10} en el 2023 y 2024 fue La Uruca (SJ-04), con valores que oscilaron entre $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2023, seguido por La Ribera de Belén (BE-01) y Heredia (HE-01), ambos con concentraciones entre 20 y $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en este periodo. Estas estaciones registraron también los valores máximos diarios de 24 horas más cercanos al límite nacional de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- En cuanto a $PM_{2.5}$, los datos indican que la mayoría de los puntos de monitoreo superaron el límite anual de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ del reglamento costarricense en al menos uno de los dos años evaluados. En Heredia (HE-01) se registraron los valores más elevados, con un promedio anual de $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2023 y $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2024, siendo el único punto que sobrepasó el umbral nacional en ambos años.
- El Ministerio de Salud en San José y Belén (BE-02) también presentaron superaciones del límite recomendado por la OMS de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con concentraciones anuales que oscilaron entre 13 y $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, aunque cumpliendo con la normativa nacional en 2023 y en su mayoría en 2024. En estas estaciones, los picos diarios de $PM_{2.5}$ también coincidieron con la estación seca, particularmente entre los meses de abril y junio, periodo asociado a condiciones meteorológicas adversas, quema de biomasa y mayor resuspensión de polvo.
- El valor más crítico registrado en el periodo fue en la estación de Heredia en 2023, donde un evento puntual alcanzó una concentración diaria de $PM_{2.5}$ de $163 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ampliamente por encima del límite de exposición de 24 horas nacional ($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y del valor recomendado por la OMS ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$), lo que representó un riesgo considerable para la salud poblacional durante eventos de contaminación aguda.
- Los niveles de NO_2 en el cantón de Belén no superan el límite nacional de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido por la normativa de Costa Rica, sin embargo, las concentraciones registradas

en 2023 (29,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2024 (33,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), superan las metas intermedias anuales 2 y 3 recomendadas por la OMS (meta 1=40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, meta 2=30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, meta 3=20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). La exposición al NO_2 es perjudicial, especialmente en puntos de mayor concentración como el Palacio Municipal y el Centro Comercial Plaza Belén.

- Se observó una mejora significativa en los niveles de SO_2 entre 2023 y 2024, con una disminución notable del 64% en las concentraciones. Sin embargo, el sitio ubicado frente a la Firestone sigue mostrando concentraciones más altas que deben ser estudiadas más de cerca para identificar otras posibles fuentes de emisión incipientes.
- Aunque las concentraciones de O_3 en el cantón de Belén estuvieron por debajo del límite recomendado por la OMS (60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), se observa un aumento del 99,75 % entre 2023 y 2024, lo cual también debe investigarse más a fondo para.
- La estación RECOPE presenta niveles de material particulado $\text{PM}_{2.5}$ que, aunque están por debajo del límite nacional permitido, exceden consistentemente el umbral recomendado por la OMS en un 82 % de las mediciones, con picos máximos que alcanzaron hasta 89,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta situación indica la necesidad de implementar medidas para controlar y reducir las fuentes de emisión de partículas finas en la zona monitoreada.
- La estación RECOPE mostró un incremento en los niveles de contaminantes como dióxido de azufre (SO_2) y dióxido de nitrógeno (NO_2), con un aumento considerable en las superaciones de los límites establecidos, para el 2024. Este aumento, junto con la alta variabilidad y picos en contaminantes como carbono negro y monóxido de carbono, sugiere que las fuentes vehiculares y actividades industriales cercanas influyen significativamente en la calidad del aire.
- Los niveles de $\text{PM}_{1.0}$, $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} y SO_2 en Coronado durante 2023 y 2024 se mantuvieron por debajo de los límites establecidos por la OMS y la normativa nacional. Se observa una mejora en la calidad del aire, con reducciones significativas en los valores anuales de material particulado. Las concentraciones horarias muestran picos asociados a actividades humanas y condiciones atmosféricas específicas no determinadas en este estudio.
- Durante la campaña de monitoreo en Poás de Alajuela, entre abril y mayo de 2024, las concentraciones de partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10}) y dióxido de azufre (SO_2), los niveles de contaminación se mantuvieron dentro de los límites establecidos por la normativa la mayor parte del tiempo. Sin embargo, se dieron picos de concentración de SO_2 y partículas

finas que estuvieron asociados a la actividad del Volcán Poás y que superaron los valores reglamentados.

6. Recomendaciones

- Es de suma importancia reactivar la Comisión de Calidad del Aire y fortalecer el trabajo interinstitucional. En este sentido, se requiere de una integración entre múltiples actores que estén interesados en mantener y ampliar el monitoreo de la calidad de aire tanto para la concentración de gases como material particulado.
- Fortalecer las acciones de reducción de emisiones de partículas finas (PM_{2.5}). Dado que varias estaciones superaron los límites nacionales y todas excedieron los niveles recomendados por la OMS, por lo que se recomienda implementar estrategias más agresivas de control de fuentes emisoras; como transporte, industria y quema de biomasa y reforzar la vigilancia durante la estación seca, cuando se observan picos de contaminación.
- Asegurar la disponibilidad de los recursos necesarios para mejorar el monitoreo y la comunicación sobre el estado de la calidad del aire, garantizando que la información sea clara, oportuna y accesible para toda la población.
- Mantenerse alerta ante posibles cambios en la actividad del volcán Poás, ya que su actividad y las condiciones meteorológicas locales influyen en la presencia de contaminantes como el dióxido de azufre (SO₂) y las partículas finas, en centros urbanos cercanos.
- Es esencial que las autoridades sigan educando a la población sobre los riesgos de la contaminación atmosférica y la importancia de proteger la salud respiratoria, así como implementar medidas de salud pública para mitigar los efectos nocivos.
- Se debe reforzar el monitoreo de ozono con equipos automáticos para mejorar la calidad de los datos.
- Finalmente, se recomienda priorizar en definir un mecanismo financiero fijo que permita sostener el monitoreo continuo de la contaminación del aire y otras actividades fundamentales en la gestión de la calidad del aire del país.

7. Referencias Bibliográficas

- Agencia SINC. (2024). *Las nubes de polvo africano contribuyen a superar los límites de partículas en suspensión en Madrid*.
- AirNow. (2016). *Air Quality Index Basics*. Recuperado el 17 de agosto de 2021, de AirNow: <https://www.airnow.gob/index.cfm?action=aqibasics.aqi>
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2022). *Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá Año 2021. Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá*. Bogota, Colombia: Secretaría Distrital de Ambiente.
- Borsese, A., & Esteban, S. (2005). Química, educación ambiental y vida cotidiana: el ozono troposférico. *Enseñanza de las Ciencias*, 23(2), 251-261.
- Canciano-Fernández, J., Reinoso-Valladares, M., Ordoñez-Sánchez, Y., & Hernández-Garcés, A. (2017). Muestreo pasivo de contaminantes atmosféricos. Uso en Cuba. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 18(2), 113-121.
- Carrales, B., & Chairez, I. (2019). Metodologías para el muestreo de la calidad del aire. *Vidsupra Visión Científica*, 11(1), 7-11.
- Centro Europeo de Posgrados. (2018). *La dispersión de los contaminantes*. Recuperado el 17 de agosto de 2021, de CEUPE: <https://www.ceupe.com/blog/la-dispersion-de-los-contaminantes.html>
- Centro Europeo de Posgrados. (2018b). *¿Cuáles son los efectos de la contaminación atmosférica?* Recuperado el 17 de agosto de 2021, de <https://www.ceupe.com/blog/cuales-son-los-efectos-de-la-contaminacion-atmosferica.html>
- Ciupek, K., Butterfield, D., Quincey, P., Sweeney, B., Lilley, A., & Bradshaw, C. (2021). *2019 annual report for the UK black carbon network*. London: Hampton Road, Teddington, Middlesex, TW11 0LW.
- Comisión federal para la protección contra riesgos sanitarios. (2017). *Clasificación de los contaminantes del aire ambiente*. Recuperado el 17 de agosto de 2021, de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/2-clasificacion-de-los-contaminantes-del-aire-ambiente>
- Decreto Ejecutivo N° 39951-S. (2016). Reglamento de Calidad del Aire para Contaminantes Criterio. *Diario Oficial La Gaceta*, 209(239).

- Environmental Protection Agency. (2016). *Basic Information about NO2*. Recuperado el 17 de agosto de 2021, de EPA: <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2>
- Environmental Protection Agency. (2017). *Effectos of acid rain*. Recuperado el 17 de agosto de 2021, de EPA: <https://www.epa.gov/acidrain/effects-acid-rain>
- Environmental Protection Agency. (2018). *Particulate Matter (PM) Basics*. Recuperado el 17 de agosto de 2021, de EPA: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- Environmental Protection Agency. (2019). *Sulfur Dioxide Basics*. Recuperado el 17 de agosto de 2021, de EPA: <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#what%20is%20so2>
- Franco, P., & Iglesias, R. (2022). *Informe de Calidad del Aire 2022-Informe anual*. Montevideo, Uruguay: Servicio Evaluación de la Calidad y Control Ambiental.
- Gálvez-Serna, A. (2020). *Evaluación de ozono troposférico en ciudades latinoamericanas*. Bogota, Colombia: [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia].
- García-Reynoso, J. (2009). Influencia de la meteorología en la calidad del aire ne la zona metropolitana del Valle de México. *Revista especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 12(2), 83-86.
- Herrera, J. (2015). Inventario de emisiones de contaminantes criterio de Costa Rica en 2011. *Ciencias ambientales*, 5-19.
- Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales. (s.f.). *Contaminación del aire y sus efectos*. Recuperado el 17 de agosto de 2021, de IDEAM: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/001083/Course2/Lecturas/Vehiculos/chapter2.pdf>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2010). *Principios de Medición de la Calidad del Aire*.
- Ley N° 5395. (1974). Ley General de Salud. *Diario Oficial La Gaceta*, 222.
- Mena, M. (19 de Agosto de 2022). *El Observador*.
- Ministerio Demográfico para la Transición Ecológica y el Reto. (2023). *Evaluación de la calidad del aire en España 2023*.
- Molina, F. (2016). *Monitoreandos la calidad del aire*. Recuperado el 17 de agosto de 2021, de NASA: <https://ciencia.nasa.gov/monitoreando-la-calidad-del-aire>

Murillo, J., & Herrera, J. (2020). Evolución del monitoreo de la calidad del aire en Costa Rica. *AMBIENTICO*, 11-15.

Organización Panamericana de la Salud. (s.f.). *Contaminación del aier ambiental*. Recuperado el 17 de agosto de 2021, de OPS: https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=12918:ambient-air-pollution&Itemid=72243&lang=es

Pacsi, S. (2016). Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en Lima Metropolitana. *Anales Científicos*, 77(2), 273-283.

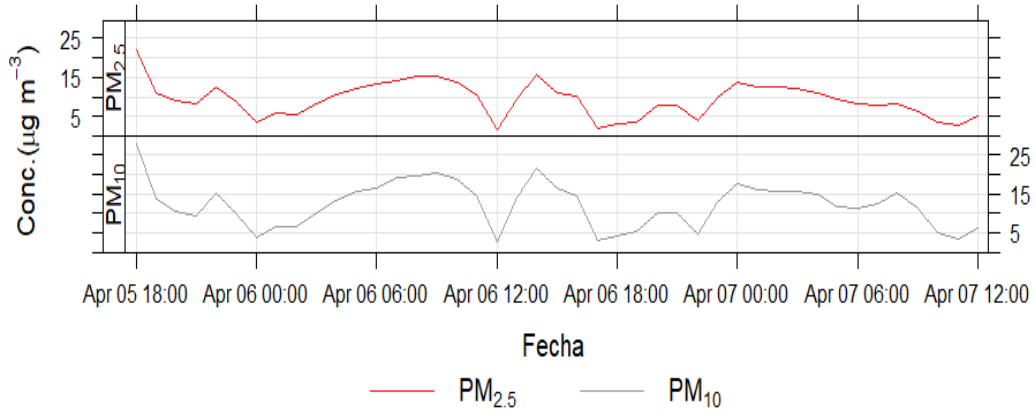
Sbarato, D., & Sbarato, V. (2015). *Contaminación del aire*. Buenos Aire: Editorial Brujas.

Secretaría del Medio Ambiente. (2017). *Informe de Gobierno*. Ciudad de México.

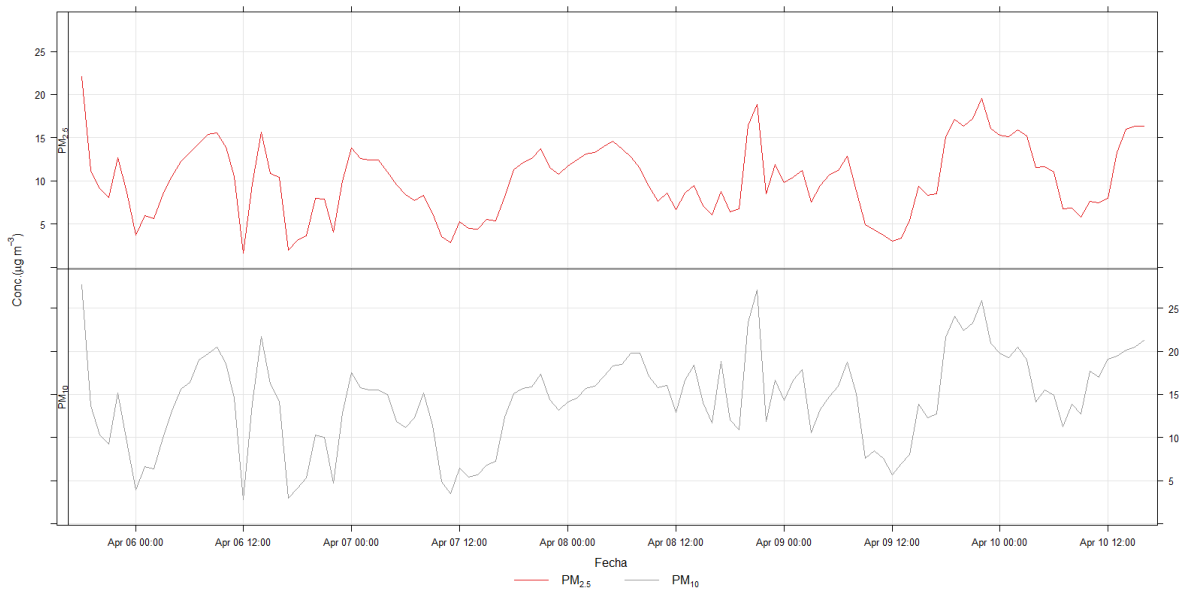
UNA, MINAE, MS, MOPT & MSJ. (2016). *Sexto Informe de Calidad del Aire del Área Metropolitana de Costa Rica 2013-2015*. Heredia.

Wark, K., & Warner, C. (2017). *Contaminación del Aire, Origen y Control*. Cuidad de México: Limusa Noriega Editores.

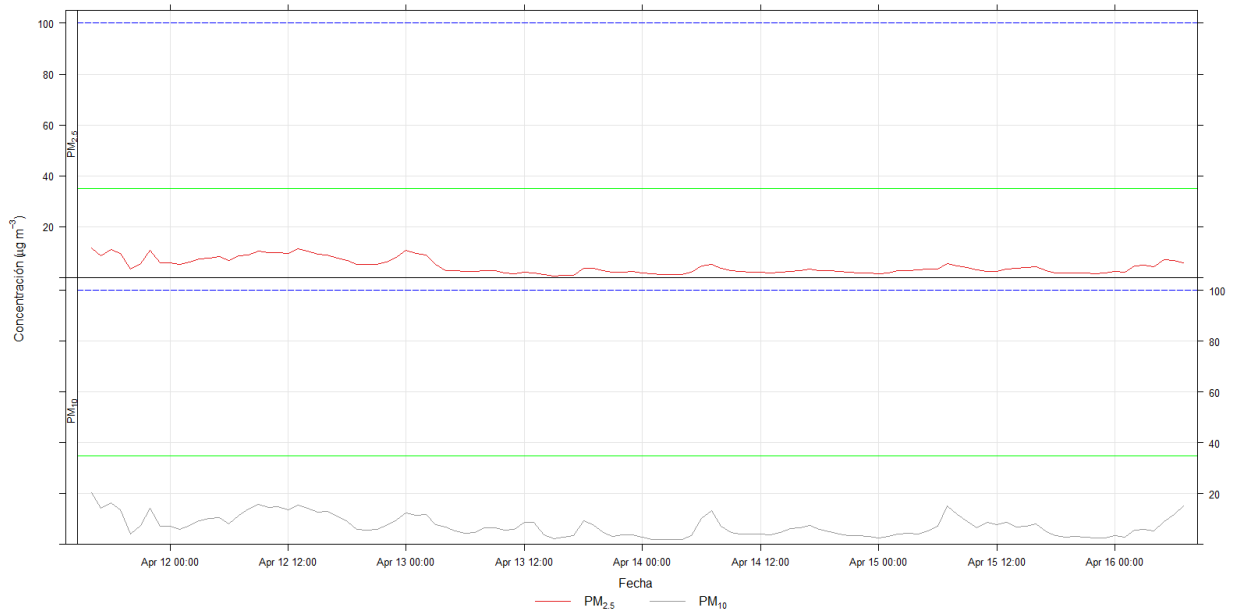
8. Anexos



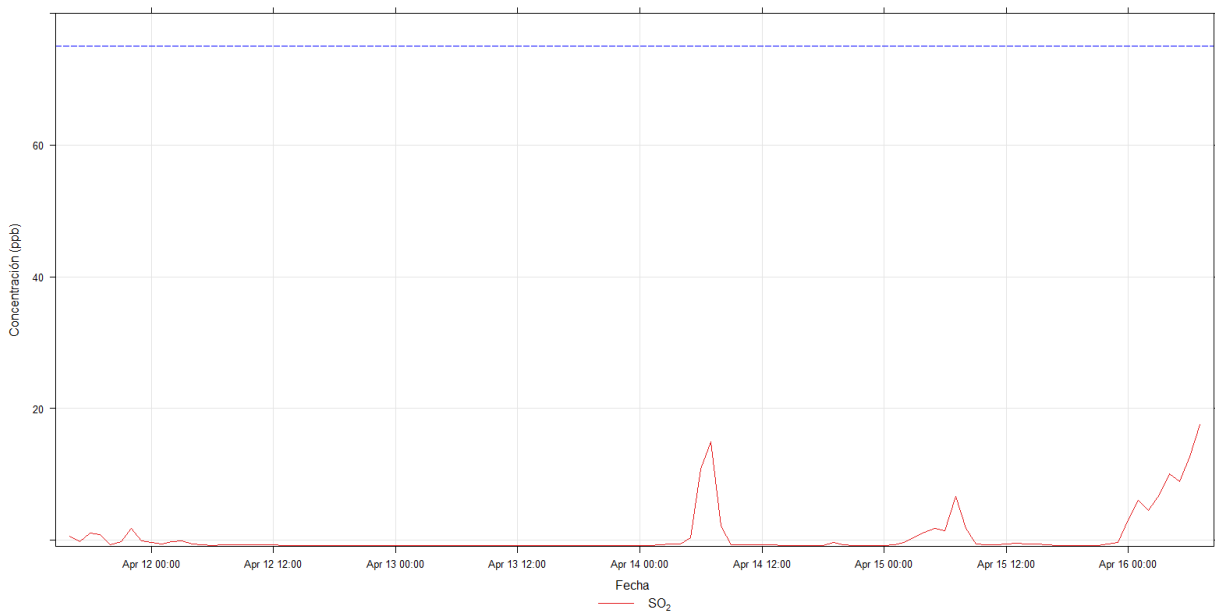
Anexo 1. Concentración diaria de PM_{2.5} y PM₁₀ (en unidades de mg/m^3), Volcán Poás, del viernes 05 de abril al domingo 07 de abril 2024.



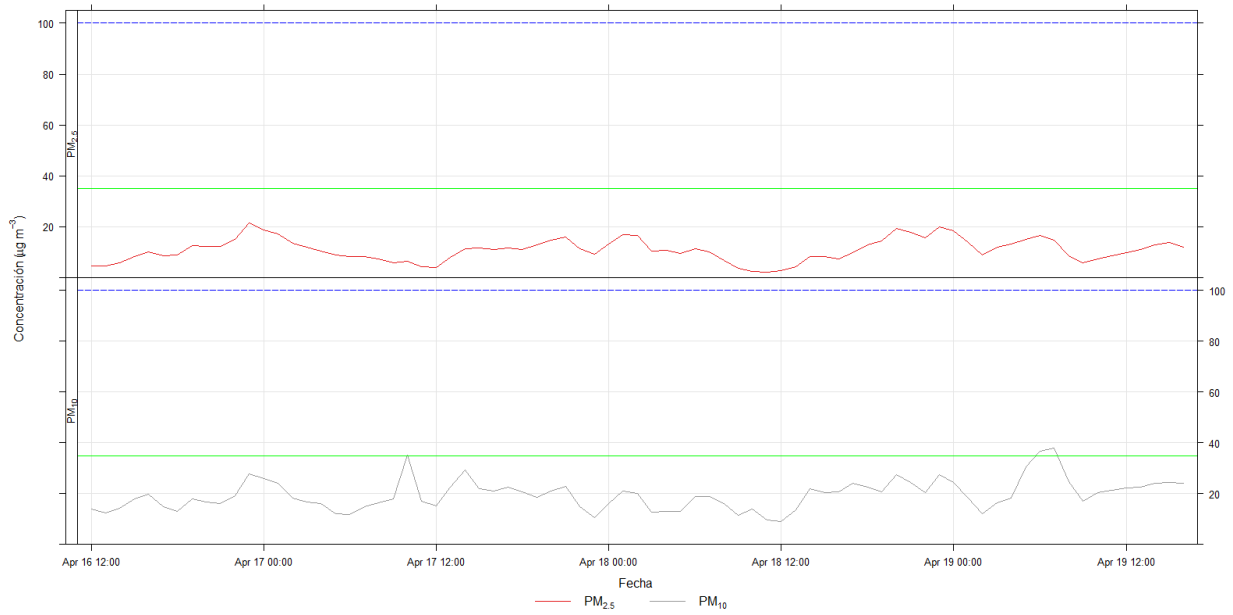
Anexo 2. Concentración diaria de PM_{2.5} y PM₁₀ (en unidades de mg/m^3), Volcán Poás, del viernes 05 de abril al miércoles 10 de abril 2024.



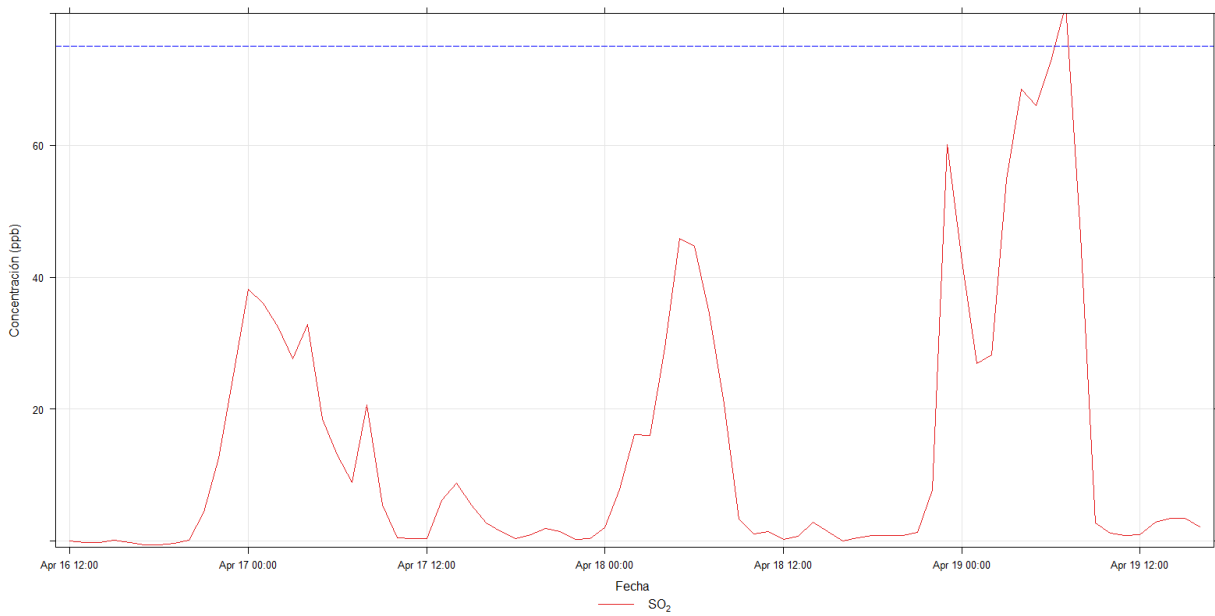
Anexo 3. Concentración diaria de $PM_{2.5}$ y PM_{10} (en unidades de mg/m^3), Volcán Poás, del jueves 11 de abril al martes 16 de abril 2024.



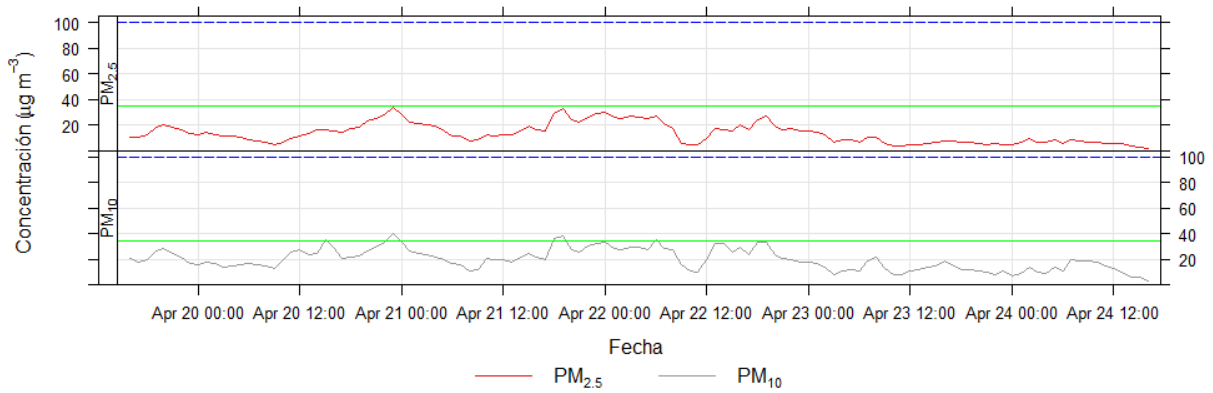
Anexo 4. Concentración diaria de SO_2 (en unidades de ppb), Volcán Poás, del jueves 11 de abril al martes 16 de abril 2024.



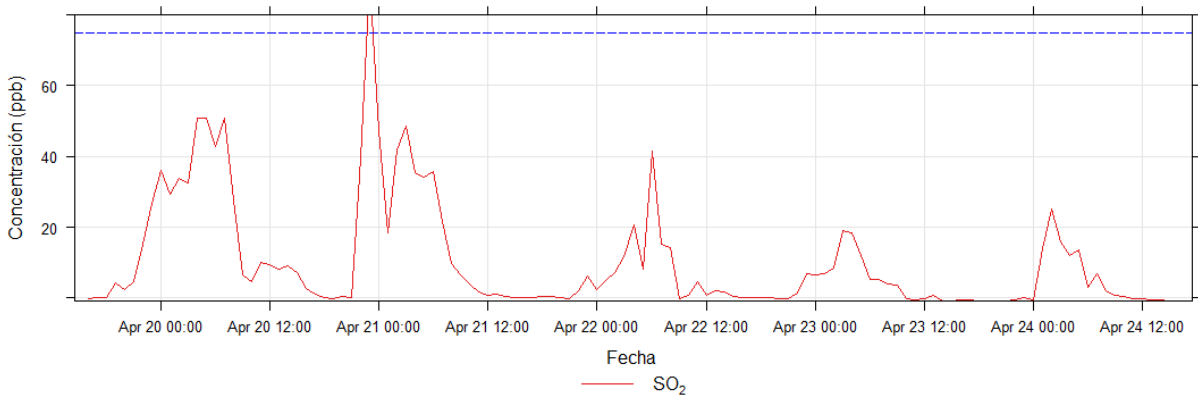
Anexo 5. Concentración diaria de $PM_{2.5}$ y PM_{10} (en unidades de mg/m^3), Volcán Poás, del martes 16 de abril al viernes 19 de abril del 2024.



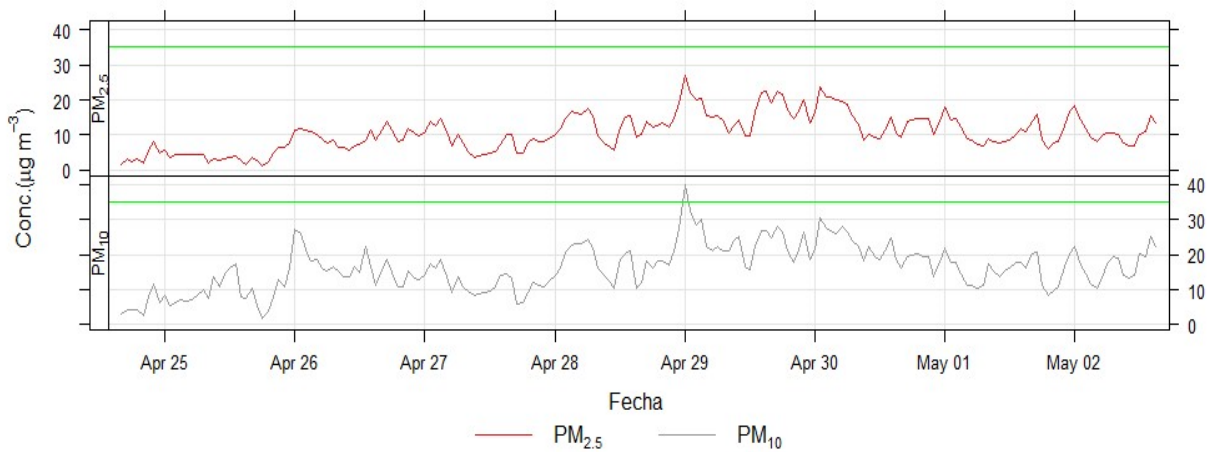
Anexo 6. Concentración diaria de SO_2 (en unidades de ppb), Volcán Poás, del martes 16 de abril al viernes 19 de abril del 2024.



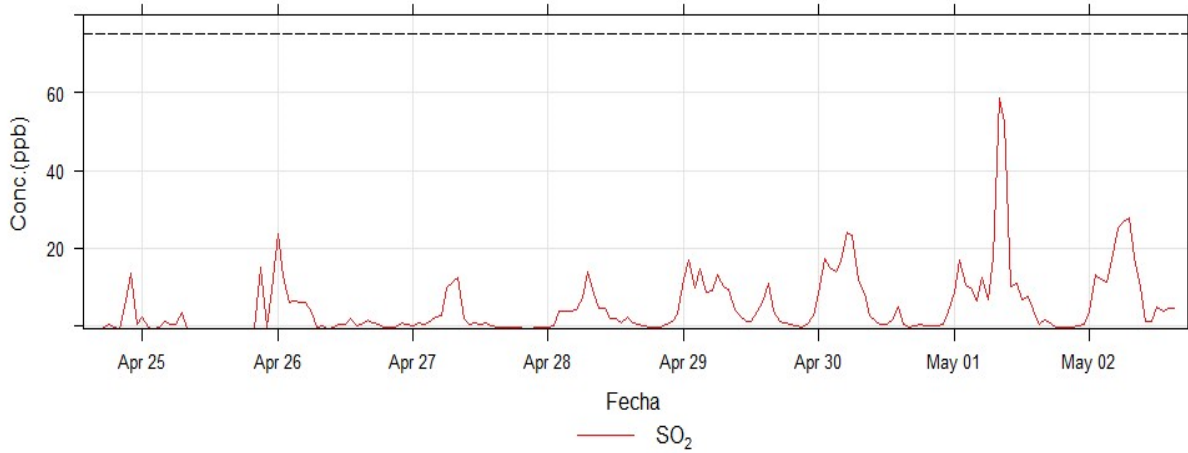
Anexo 7. Concentración diaria de $PM_{2.5}$ y PM_{10} (en unidades de mg/m^3), Volcán Poás, del viernes 19 de abril al miércoles 24 de abril 2024.



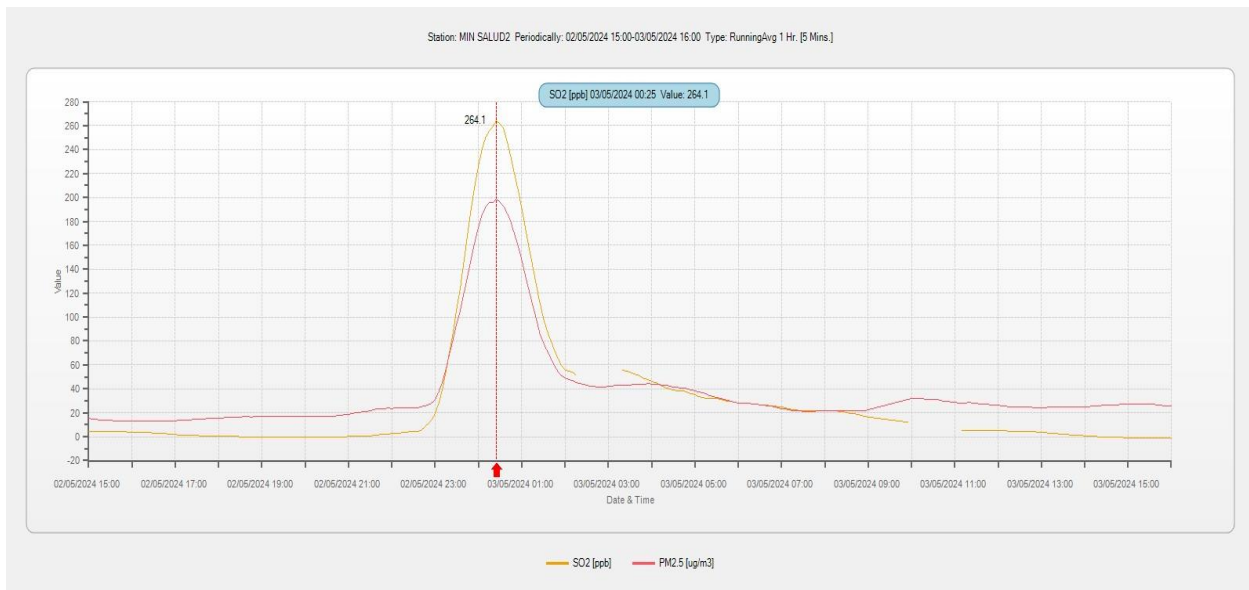
Anexo 8. Concentración diaria de SO_2 (en unidades de ppb), Volcán Poás, del viernes 19 de abril al miércoles 24 de abril 2024.



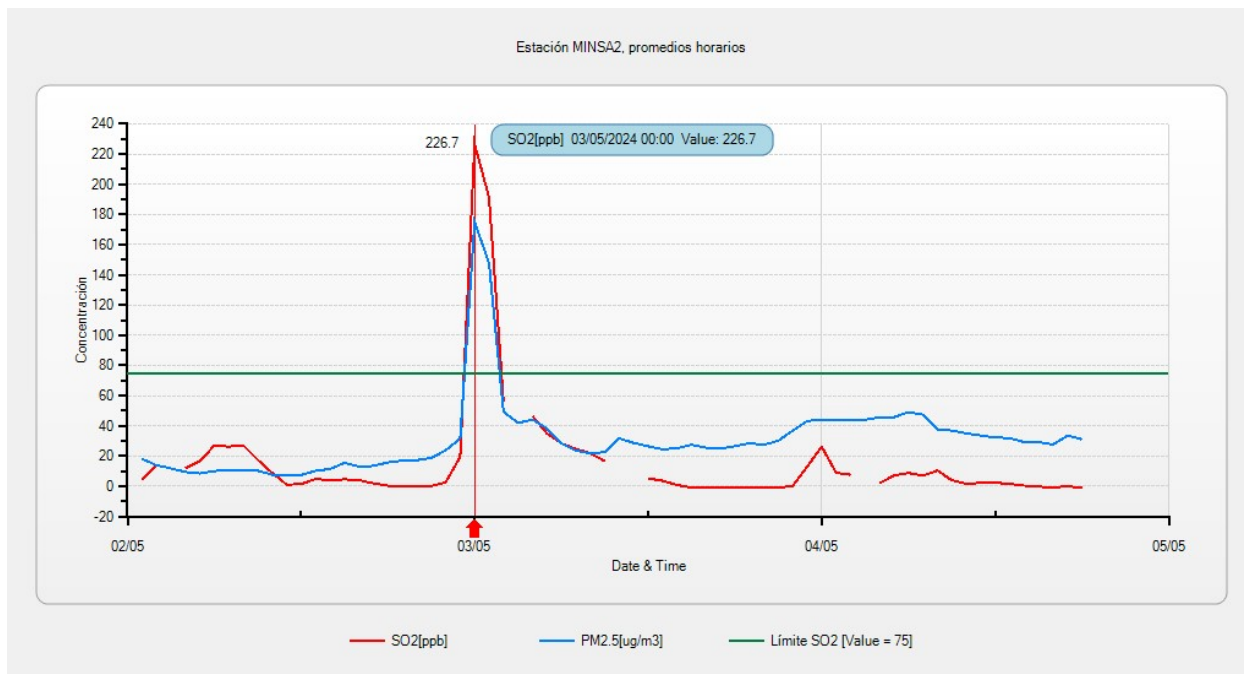
Anexo 9. Concentración diaria de PM_{2.5} y PM₁₀ (en unidades de mg/m³), Volcán Poás, del miércoles 24 de abril al jueves 02 de mayo 2024.



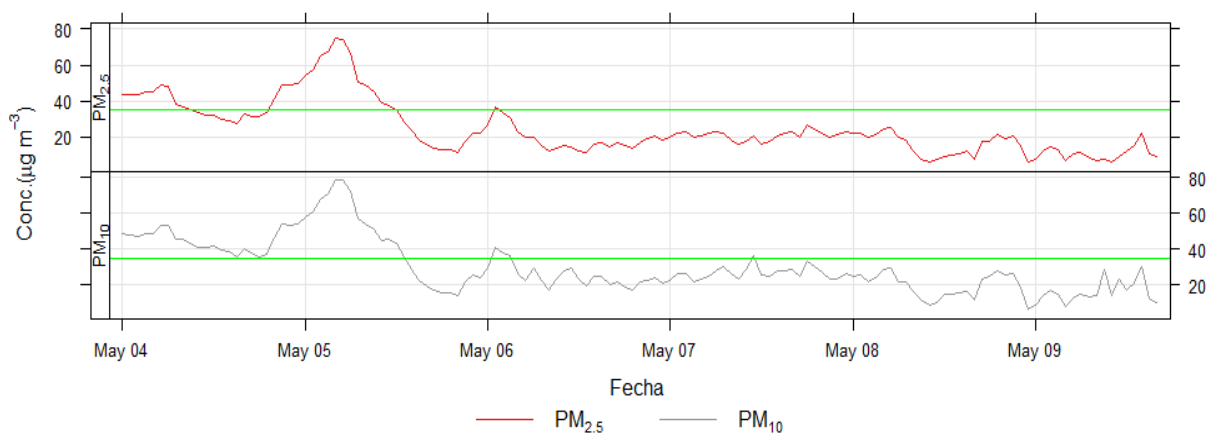
Anexo 10. Concentración diaria de SO₂ (en unidades de ppb), Volcán Poás, del miércoles 24 de abril al jueves 02 de mayo 2024.



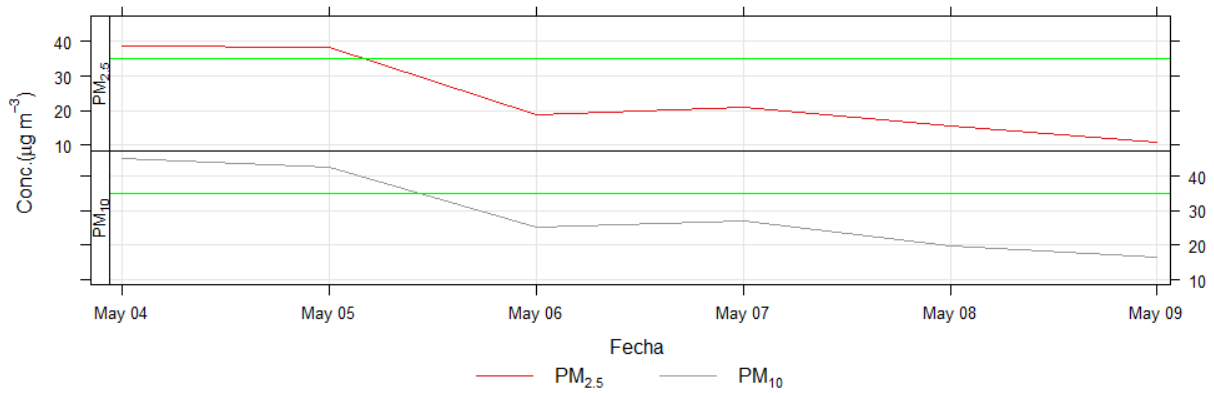
Anexo 11. Concentración con promedios horarios móviles de PM_{2.5} y SO₂ (en unidades de mg/m³ y ppb), Volcán Poás, del miércoles 24 de abril al jueves 02 de mayo 2024.



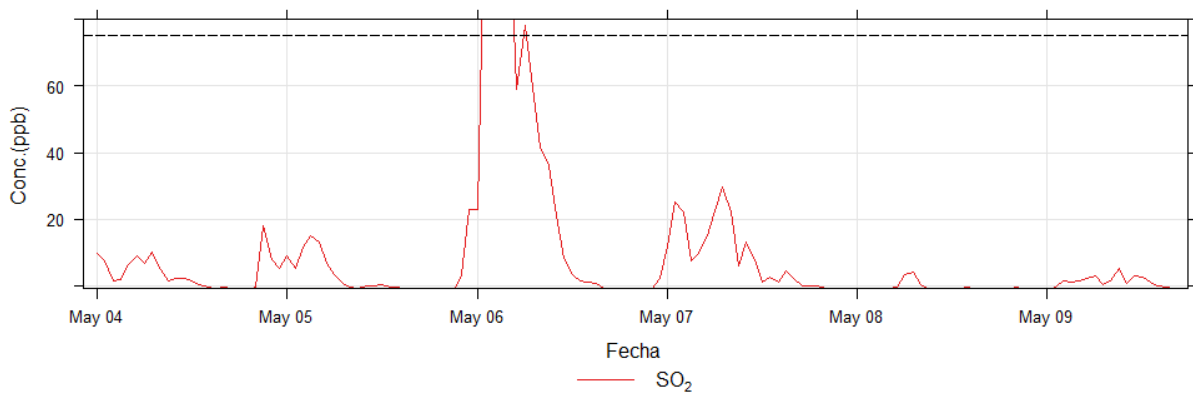
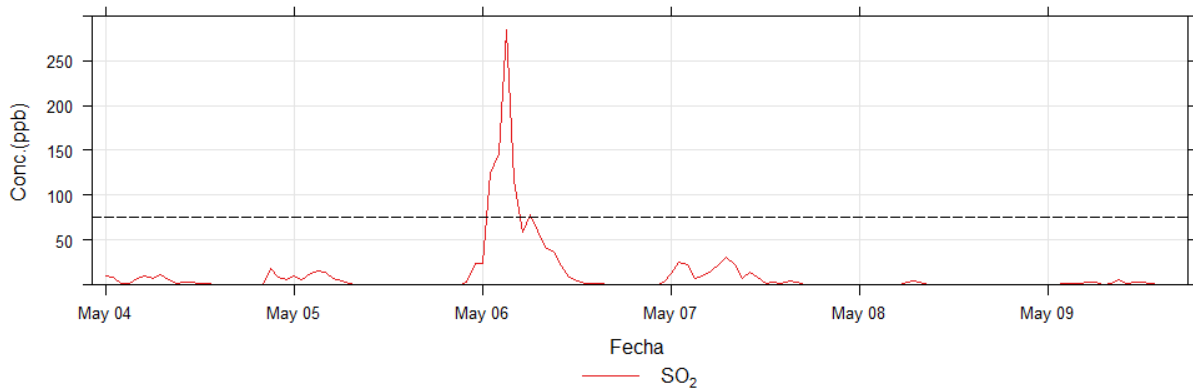
Anexo 12. Concentración con promedios horarios móviles de $PM_{2.5}$ y SO_2 (en unidades de mg/m^3 y ppb), Volcán Poás, del jueves 02 de mayo al sábado 04 de mayo 2024.



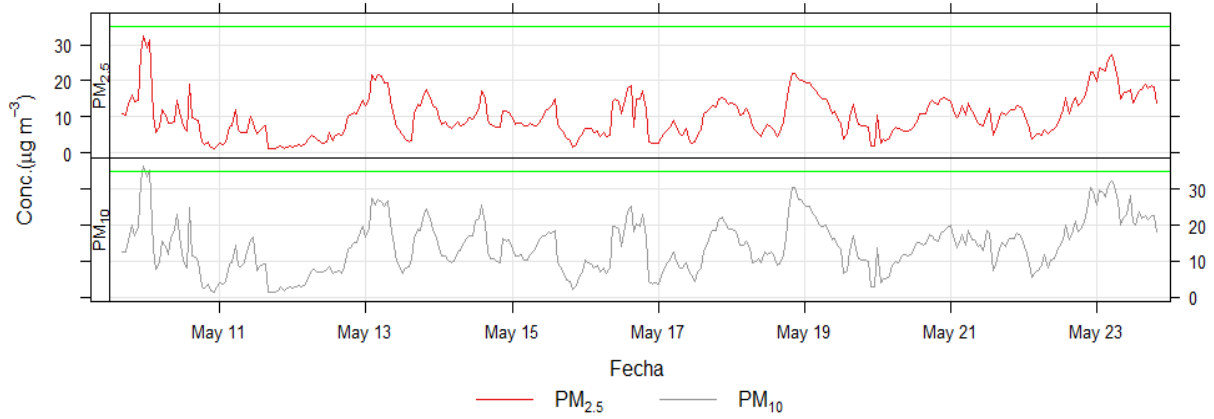
Anexo 13. Concentración diaria de $PM_{2.5}$ y PM_{10} (en unidades de mg/m^3), Volcán Poás, del sábado 04 de mayo del 2024 al jueves 09 de mayo 2024.



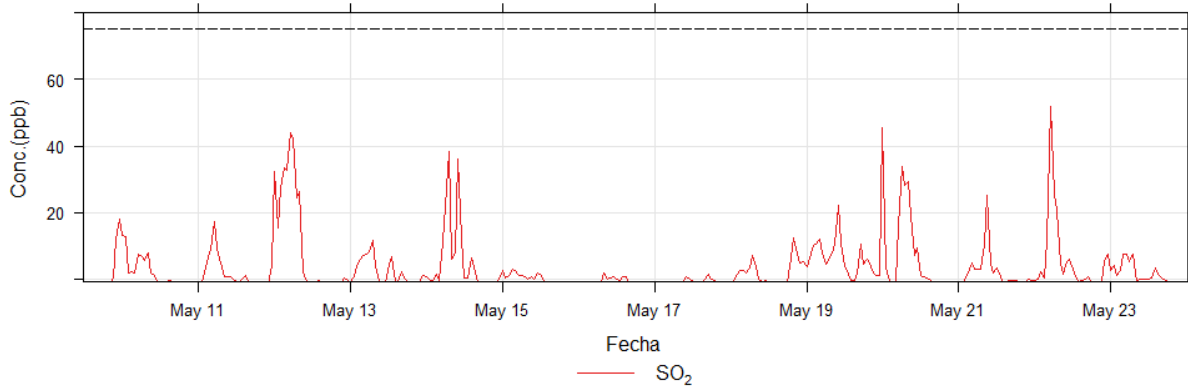
Anexo 14. Concentración con promedio de 24 horas de $PM_{2.5}$ y PM_{10} (en unidades de mg/m^3), Volcán Poás, del sábado 04 de mayo del 2024 al jueves 09 de mayo 2024.



Anexo 15. Concentración diaria de SO_2 (en unidades de ppb), Volcán Poás, del sábado 04 de mayo del 2024 al jueves 09 de mayo 2024.



Anexo 16. Concentración diaria de PM_{2.5} y PM₁₀ (en unidades de mg/m³), Volcán Poás, del jueves 09 de mayo del 2024 al 24 de mayo 2024.



Anexo 17. Concentración diaria de SO₂ (en unidades de ppb), Volcán Poás, del sábado 04 de mayo del 2024 al jueves 09 de mayo 2024.