



IX INFORME DE CALIDAD DEL AIRE GRAN ÁREA METROPOLITANA DE COSTA RICA 2021 – 2022



MINISTERIO
DE SALUD

GOBIERNO
DE COSTA RICA

UNA
UNIVERSIDAD
NACIONAL
COSTA RICA



RECOPE



SJD
VIVE!



Dra. Mary Denisse Munive Angermüller

Ministra de Salud

Máster Francisco González Alvarado

Rector de la Universidad Nacional

Máster Karla Montero Víquez

Presidente ejecutivo, Refinadora Costarricense de petróleo

Ing. Johnny Araya Monge

Municipalidad de San José

Ing. Horacio Alvarado Bogantes

Alcalde, Municipalidad de Belén

Arnoldo Barahona Cortés

Municipalidad de Escazú



MINISTERIO
DE SALUD

GOBIERNO
DE COSTA RICA



RECOPE



SJD
VIVE!



Grupo Técnico Encargado de la Elaboración del Informe

M.Sc. José Felix Rojas Marín
Coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental
Universidad Nacional

PhD. María Martines Cruz
OVSICORI
Universidad Nacional

M.Sc. Alejandra Gamboa Jiménez
Laboratorio de Análisis Ambiental
Universidad Nacional

Ing. Ana Villalobos Villalobos
Protección Radiológica y Salud Ambiental
Ministerio de Salud

Lic. David Antonio Carvajal Arroyo
Laboratorio de Análisis Ambiental
Universidad Nacional

Colaboradores en la operación de la red de monitoreo para el periodo 2021-2022

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 Escazú

Departamento de Gestión
Ambiental
Municipalidad de Belén

Dirección de Aseguramiento de la
Calidad
Refinadora Costarricense de Petróleo

Departamento de Servicios
Ambientales
Municipalidad de San José

Índice de Contenido

1. Resumen ejecutivo	1
2. Marco Teórico.....	3
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.....	9
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.....	11
3.2 Red Pasiva.....	15
3.3 Red Automática	19
3.4 Aseguramiento de la Calidad	20
4. Resultados	23
4.1 Concentración de PM_{10}	23
4.2 Concentración de $PM_{2.5}$	27
4.3 Concentración de NO_2	29
4.4 Red automática de Coronado	36
4.4.1 Material particulado PM_{10} , $PM_{2.5}$	36
4.4.2 Concentración de SO_2	37
4.5 Carbono negro.....	38
5. Conclusiones.....	41
6. Recomendaciones	43
7. Referencias Bibliográficas	44

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.	7
Figura 3. Esquema de un muestreador de alto volumen para PM ₁₀	12
Figura 4. Filtro colector de material particulado (a) antes del muestreo y (b) después de 24 horas.	13
Figura 5. Distribución espacial de la red de monitoreo automático y manual. Fuente: Elaboración propia	15
Figura 6. Distribución de puntos de la Red Pasiva en el Cantón de San José. Fuente: Elaboración propia.	17
Figura 7. Distribución de puntos de la Red Pasiva en el Cantón de Belén. Fuente: Elaboración propia...	18
Figura 8. Distribución de puntos de la Red Pasiva en el Cantón de Escazú. Fuente: Elaboración propia.	18
Figura 9. Concentración promedio de PM ₁₀ por año con los límites de la Organización Mundial de la Salud y el Decreto N° 39951-S.	26
Figura 10. Concentración promedio de PM ₁₀ por mes para el monitoreo 2021 y 2022.	27
Figura 11. Concentración promedio de PM _{2.5} por mes para el monitoreo 2021 y 2022 en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica.	29
Figura 12. Concentración de dióxido de nitrógeno por punto de monitoreo durante el 2021 en el cantón de Belén.	32
Figura 13. Concentración de dióxido de nitrógeno por punto de monitoreo durante el 2022 en el cantón de Belén.	32
Figura 14. Concentración de dióxido de nitrógeno por punto de monitoreo durante el 2021 en el cantón de Escazú.	33
Figura 15. Concentración de dióxido de nitrógeno por punto de monitoreo durante el 2022 en el cantón de Escazú.	33
Figura 16. Concentración de dióxido de nitrógeno por punto de monitoreo durante el 2021 en el cantón de San José.	34
Figura 17. Ubicación de puntos con mayor concentración de dióxido de nitrógeno el 2021 en el cantón de San José.	35
Figura 18. Concentración de dióxido de nitrógeno por mes de monitoreo durante el 2021 y 2022 en el cantón de San José.	36
Figura 19. Concentración de material particulado de PM ₁₀ , PM _{2.5} en la estación automática de Coronado, 2021 y 2022.	37
Figura 20. Concentración de SO ₂ en la estación automática de Coronado, años 2021 y 2022.	37
Figura 21. Concentración de carbono negro en ng/m ³ en la Gran Área Metropolitana durante el 2021. ...	39
Figura 22. Concentración de carbono negro en ng/m ³ en la Gran Área Metropolitana durante el 2022. ...	39

Índice de cuadros

Cuadro 1. Sitios de monitoreo de la red manual y automática 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.	21
Cuadro 4. Concentración promedio anual de PM ₁₀ según punto de monitoreo en la gran área metropolitana durante el 2021.	24
Cuadro 5. Concentración promedio anual de PM ₁₀ según punto de monitoreo en la gran área metropolitana durante el 2022.	25
Cuadro 6. Concentración promedio anual de PM _{2,5} según punto de monitoreo en la gran área metropolitana durante el 2021-2022.	28
Cuadro 7. Concentración de promedio en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de NO ₂ por ciudad durante el año 2021 y 2022.	31
Cuadro 8. Concentración de promedio en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de carbono negro durante el año 2021 y 2022.	38

1. Resumen ejecutivo

La contaminación del aire es una problemática ambiental a nivel mundial que ocasiona más de 7 millones de muertes al año, de acuerdo con estimaciones publicadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Recientemente, esta organización en 2021 actualizó las guías de calidad del aire que habían sido publicadas en el 2005, esto debido a la creciente evidencia científica del impacto que tiene la mala calidad del aire sobre la salud de las personas, principalmente grupos sensibles como niños, adultos mayores y personas con afecciones respiratorias y cardíacas. Los valores guía recomendados por la OMS para la mayoría de los contaminantes criterio han disminuido considerablemente, lo cual implica un mayor esfuerzo por parte de los países para lograr alcanzar estas recomendaciones en pro de la mejora de la calidad de vida de la población y disminuir los gastos en atención de enfermedades relacionadas a la contaminación del aire.

La Red de Monitoreo de la Calidad del Aire en Costa Rica, es un esfuerzo interinstitucional coordinado por el Ministerio de Salud, como ente rector del tema, y apoyado técnicamente por la Universidad Nacional, con la contribución de otras instituciones como RECOPE y algunos municipios. La red está orientada al estudio de la concentración de diversos contaminantes criterios entre los que destacan, el monóxido de carbono (CO), el dióxido de nitrógeno (NO₂), el dióxido de azufre (SO₂) y el material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}). El monitoreo se realiza mediante la ejecución de muestreos periódicos, ya sea de tipo manual o automáticos, en distintos puntos estratégicos dentro de la Gran Área Metropolitana. Los resultados de este monitoreo se comparan contra el Reglamento sobre Contaminantes Criterio (Decreto 39951-S) y las guías de la OMS.

Los resultados de la presente actualización muestran que el promedio de concentración de PM₁₀ durante el periodo de monitoreo 2021 en la gran área metropolitana (GAM) de Costa Rica fue de 17,4 µg/m³ mientras que para el 2022 fue de 15,3 µg/m³; ambos valores se encuentran por debajo del límite establecido Decreto N° 39951-S aunque superan el valor recomendado por la OMS el cual es más estricto. En cuanto al PM_{2.5} el promedio fue de 13,4 µg/m³ para el 2021 y 15,8 µg/m³ para el 2022, ambos resultados de concentración sobrepasan el límite sugerido por la OMS establecido en 5,0 µg/m³. La concentración de dióxido de nitrógeno registró un valor promedio general para la GAM de 32,2 µg/m³ para el 2021 y 28,6 µg/m³ para el 2022 con variaciones mínimas entre las tres ciudades evaluadas; la ciudad con mayores concentraciones fue San José mientras que Escazú fue la de la menor concentración media.

Los puntos de mayor riesgo por altas concentraciones de dióxido de nitrógeno en la GAM fueron los ubicados cerca del Centro Comercial Plaza Belén en la Ribera, el edificio del palacio municipal en Belén, frente a la empresa Firestone, la Plaza Asunción en Belén, el hospital San Juan de Dios en San José, al costado norte de Catedral, cerca de la Bomba la Castellana, en el AyA de la avenida San Martín, JAPDEVA, la Numar, el Abastecedor los Sauces y en el Walmart de San Sebastián.

Debido a la falta de recursos que han venido impactando la red de Monitoreo de calidad del aire, para el 2023 no se van a contar con datos de la red de monitoreo automática, además de una reducción en el alcance de monitoreo; lo que implica una reducción de la información necesaria para salvaguardar la salud de las personas. Es de suma importancia sensibilizar a las autoridades correspondientes para contar con los recursos necesarios, en tiempo y forma, para lograr la operatividad de la red de monitoreo de calidad del aire, con el fin de mitigar los efectos adversos de la contaminación del aire en la salud de la población.

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 de la Organización Mundial de la Salud (OMS), en 2016 el 91 % de la población mundial estuvo expuesta a respirar aire que excedía los límites estipulados por la OMS, lo cual generó importantes riesgos a la salud. La contaminación del aire también generó pérdidas económicas ligadas a la atención de problemas de salud, provocando costos de alrededor de 8.000 millones de dólares al día, de acuerdo a la OMS.

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.

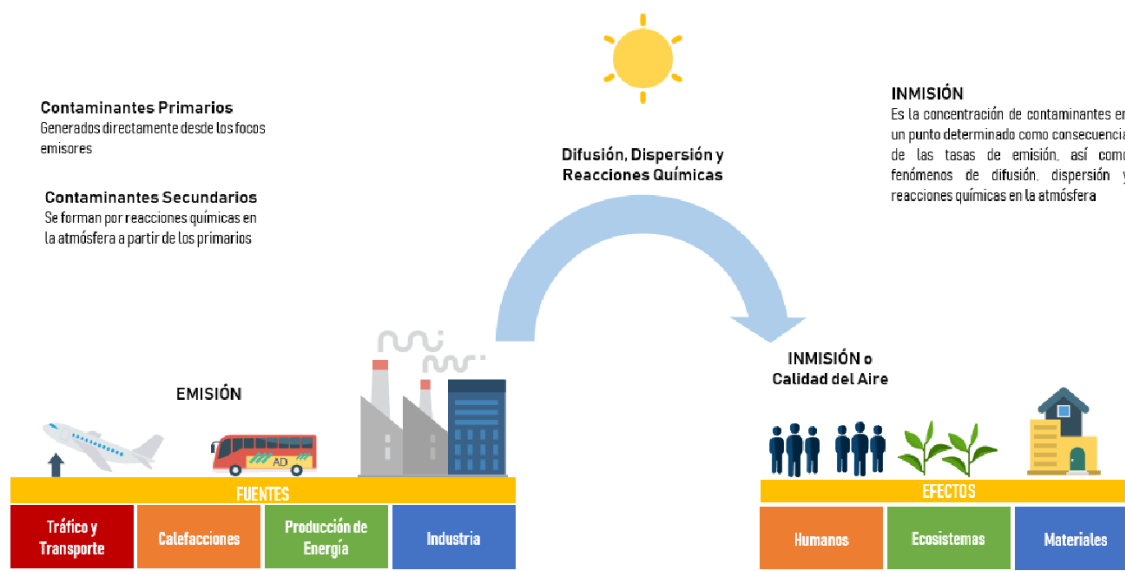


Figura 1. Dispersión y difusión química de contaminantes primarios y secundarios.

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 salud. Por ejemplo, metales pesados, compuestos orgánicos volátiles, compuestos orgánicos persistentes, 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 cardíacos (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 afectar la calidad del aire.

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.

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, 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 continuo de la calidad del aire se ejecuta 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) y dióxido de azufre (SO_2).

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 PM_{10} 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.

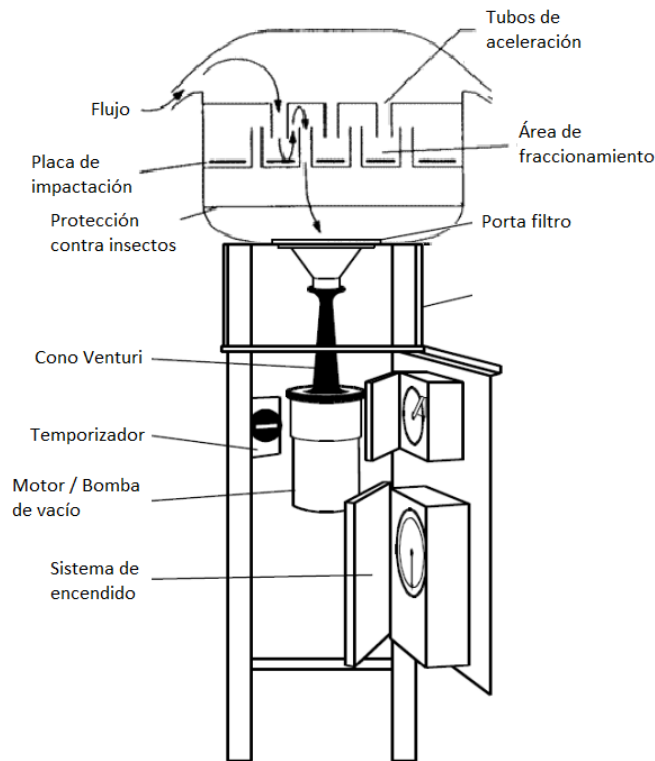
3.1 Red Manual

La determinación de la concentración de PM_{10} 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 8x10 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 $(1,13 \pm 10 \%) \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, brindándole al sistema una configuración de flujo

volumétrico (**Figura 3**). 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 ($> 10 \mu\text{m}$ o $> 2.5 \mu\text{m}$ 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 ($25 \text{ }^\circ\text{C}$ y 1 atm) de acuerdo con lo estipulado en el reglamento.



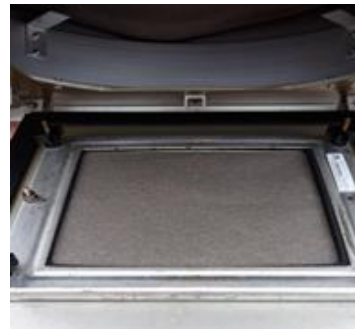
Fuente: Adaptado de www.tisch-env.com

Figura 3. Esquema de un muestreador de alto volumen para PM_{10} .

En la **Figura 4** se puede observar el proceso de instalación y recolección del filtro en el muestreador de alto volumen.



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Filtro colector de material particulado (a) antes del muestreo y (b) después de 24 horas.

Para los años 2021-2022, la red manual de monitoreo contaba con alrededor de trece sitios ubicados en las provincias de San José (6), Heredia (3), Escazú (2), Alajuela (1) y Cartago (1). En el **Cuadro 1** se muestra la ubicación de los equipos y el tipo de partícula monitoreado. La distribución espacial de los equipos se muestra en la Figura 5.

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 algunos municipios.

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

Red de monitoreo manual

Localización	Código	Contaminante
Catedral Metropolitana	SJ-01	PM ₁₀
Sección de Parques, Municipalidad de San José (MSJ)	SJ-02	PM ₁₀
Centro de Reciclaje MSJ, Hatillo	SJ-03	PM ₁₀
CNFL, La Uruca	SJ-04	PM ₁₀
Sede UTN, Alajuela	AL-01	PM ₁₀
La Ribera, Belén	BE-01	PM ₁₀
Estación del Ferrocarril, Cartago	CA-01	PM ₁₀
Municipalidad de Escazú ¹	ES-01	PM ₁₀
Policía Municipal San Antonio de Escazú	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.

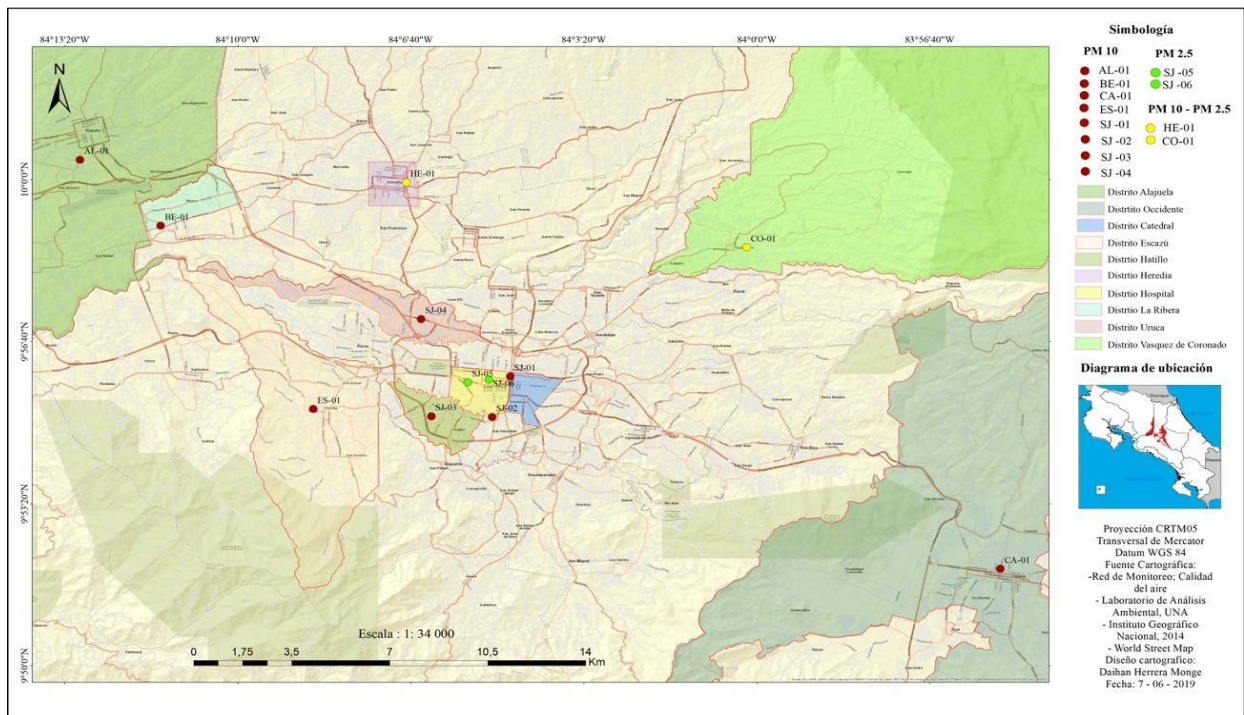


Figura 5. Distribución espacial de la red de monitoreo automático y manual. Fuente: Elaboración propia

3.2 Red Pasiva

El muestreo pasivo de dióxido de nitrógeno (NO₂) consiste 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 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Para la determinación de la concentración de SO_2 , los filtros absorbentes se tratan con una disolución extractora de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) 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 SO_2 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	

Monitoreo pasivo en el cantón de Escazú

Walmart Centro comercial Montealegre	EZ-01	Multicentro Paco	EZ-02
Centro Comercial Loma Real	EZ-03	Calle el Llano cruce Alajuelita	EZ-04
La Guaria	EZ-05	Urbanización Avellana	EZ-06
Zona de protección	EZ-07	El Jardín	EZ-08
Barrio Corazón de Jesús	EZ-09	Municipalidad de Escazú	EZ-10

Para la medición de NO₂ y SO₂ mediante los sistemas de difusión pasiva, el Laboratorio de Análisis Ambiental coordina con las Municipalidades de San José, Belén y Escazú para la colocación y retiro de los sistemas de muestreo. La red de monitoreo pasivo en el cantón de San José está conformada por 28 sitios, la de Belén por 11 y la de Escazú por 10. En las **Figuras 6, 7 y 8** se muestra la distribución de los sitios de monitoreo de la red pasiva en los cantones de San José, Belén y Escazú respectivamente.

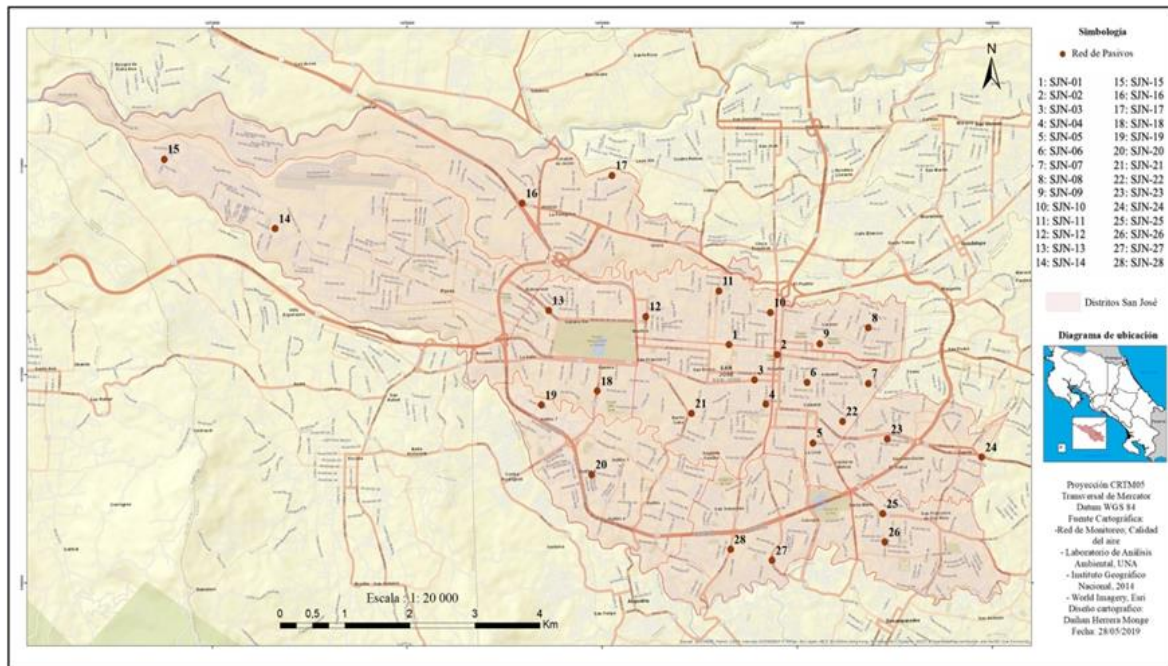


Figura 6. Distribución de puntos de la Red Pasiva en el Cantón de San José. Fuente: Elaboración propia.

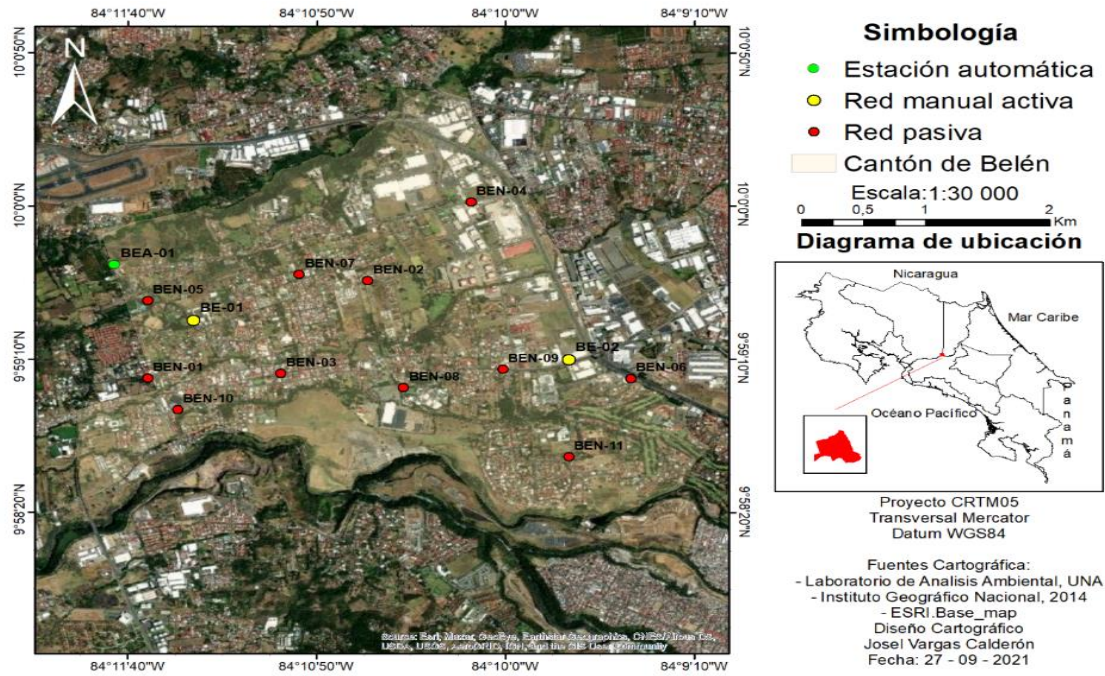


Figura 7. Distribución de puntos de la Red Pasiva en el Cantón de Belén. Fuente: Elaboración propia.

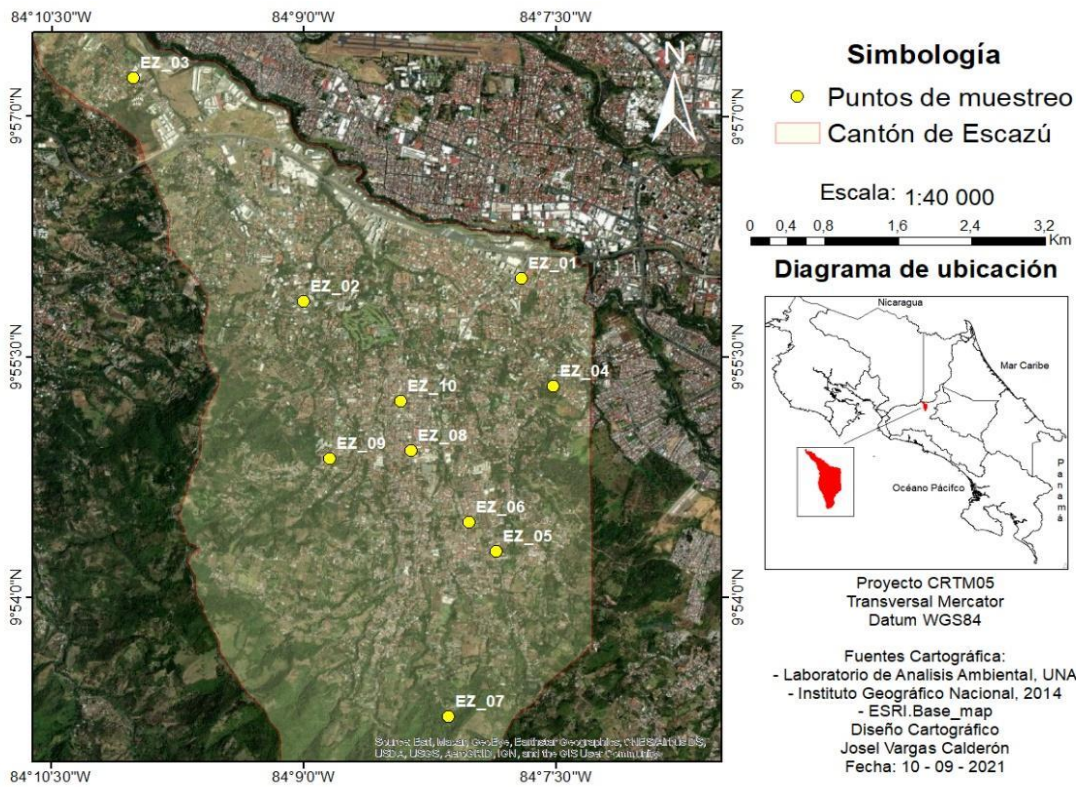


Figura 8. Distribución de puntos de la Red Pasiva en el Cantón de Escazú. Fuente: Elaboración propia.

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 2021-2022, 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 4 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 Concentración de PM₁₀

El promedio de concentración de PM₁₀ durante el periodo de monitoreo 2021 en la gran área metropolitana (GAM) de Costa Rica fue de 17,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ el cual se encuentra por debajo del límite recomendado Decreto N° 39951-S y por encima de lo recomendado por la OMS; sin embargo, este valor cumple con la meta intermedia 4 de la OMS. Este resultado indica que el riesgo por exposición de este contaminante fue bajo durante este año. Del total de puntos monitoreados dentro de la GAM el 100 % registró valores inferiores a 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por lo que se cumplió con los límites nacionales para este contaminante. Es importante considerar que durante el 2021 todavía se estaban implementando algunas medidas de restricción a la movilidad como parte de las restricciones impuestas durante la pandemia del COVID19.

Con respecto a los límites sugeridos por la OMS, en la GAM se registró que el 30 % de los puntos monitoreados presentaron una concentración media anual menor a los 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que el 70% superó este valor recomendado por la OMS. Con respecto a las metas intermedias, el 70 % de los sitios se mantuvieron por debajo de lo sugerido por la meta intermedia No.4 de la OMS (20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$); siendo los puntos con la mayor concentración promedio los cercanos a la compañía de Fuerza y Luz, Centro Comercial, La Ribera, Belén y la Municipalidad de San José (**Cuadro 4**).

Cuadro 4. Concentración promedio anual de PM₁₀ según punto de monitoreo en la gran área metropolitana durante el 2021.

Descripción			Concentración de PM ₁₀ (µg/m ³)				
Localización	Sitio de muestreo	Muestras	Promedio Anual	Desviación Estándar	Valor máximo	Valor anual Decreto N° 39951-S	Valor anual sugerido OMS
Catedral Metropolitana	SJ-01	57	14,3	6,7	44,6	30	15
Municipalidad de San José	SJ-02	98	20,1	7,0	70,0	30	15
Centro de Reciclaje MSJ, Hatillo	SJ-03	113	18,0	5,6	42,6	30	15
Compañía Nacional Fuerza y Luz	SJ-04	92	27,2	8,6	53,1	30	15
Municipalidad de Escazú	ES-01	92	12,7	4,8	25,2	30	15
Centro Comercial, La Ribera, Belén	BE-01	112	20,3	6,2	38,2	30	15
Ferretería EPA, Belén	BE-02	103	9,5	2,8	17,3	30	15
Universidad Nacional, Heredia	HE-01	95	17,1	9,0	41,1	30	15
Estación del Ferrocarril, Cartago	CA-01	82	18,2	7,3	50,0	30	15
Sede Universidad Técnica, Alajuela	AL-01	101	16,5	5,4	33,6	30	15

Durante el 2022 la concentración promedio de PM₁₀ fue de 15,3 µg/m³ siendo uno de los valores más bajos registrados en la GAM. El punto de mayor concentración en este año fue el mismo que durante el 2021 (en la Compañía Nacional de Fuerza y Luz) con una concentración de 23,9 µg/m³ (**Cuadro 5**). Este punto presenta alto tránsito vehicular por lo que es comprensible que sea de los puntos con la concentración media de PM₁₀ más alta. Para el 2022 todos los puntos cumplieron con el límite establecido en el Decreto N° 39951-S y solo el 50 % cumplió con lo sugerido por la OMS. No obstante, tanto el año 2021 como el 2022 fueron años atípicos debido a los efectos de las restricciones sanitarias impuestas por el gobierno para combatir la pandemia de COVID-19 y el lento retorno a la nueva normalidad.

Cabe mencionar que durante el 2022 el monitoreo, tanto de PM₁₀ como del PM_{2.5}, se redujo significativamente en la mayoría de los puntos. En este sentido, solo se monitorearon de manera completa en el año los puntos ubicados en Belén, Hatillo y Heredia. Por tanto, en los demás sitios la baja cantidad de muestras recolectadas impidió hacer comparaciones directas con los límites anuales, por lo que no representan de forma válida el comportamiento anual de estos. Por ejemplo, en el punto de la Catedral Metropolitana y la Municipalidad de San José solo se obtuvieron 9 muestras.

Cuadro 5. Concentración promedio anual de PM₁₀ según punto de monitoreo en la gran área metropolitana durante el 2022.

Descripción			Concentración de PM ₁₀ (µg/m ³)				
Localización	Sitio de muestreo	Muestras	Promedio Anual	Desviación Estándar	Valor máximo	Valor anual sugerido Decreto N° 39951-S	Valor anual sugerido OMS
Catedral Metropolitana	SJ-01	9	8,5	2,7	12,9	30	15
Municipalidad de San José	SJ-02	9	18,1	10,5	42,9	30	15
Centro de Reciclaje MSJ, Hatillo	SJ-03	104	15,0	7,0	50,1	30	15
Compañía Nacional Fuerza y Luz	SJ-04	8	23,9	5,1	35,3	30	15
Municipalidad de Escazú	ES-01	25	6,6	2,7	11,5	30	15
Centro Comercial, La Ribera, Belén	BE-01	98	18,1	6,5	42,4	30	15
Ferretería EPA, Belén	BE-02	115	12,2	10,1	97,6	30	15
Universidad Nacional, Heredia	HE-01	69	23,3	14,8	72,7	30	15
Estación del Ferrocarril, Cartago	CA-01	6	12,2	4,8	20,2	30	15
Sede Universidad Técnica, Alajuela	AL-01	8	15,5	5,4	20,1	30	15

En la **Figura 9** se muestra la comparación de las concentraciones promedio de 2021 y 2022 para los sitios de muestreo de partículas PM_{10} . Debido a la importante reducción en la cantidad de muestras para algunos sitios de muestreo durante el 2022, solo fue posible comparar SJ-03, BE-01, BE-02 y HE-01, para los cuales ambos años se presentaron concentraciones promedio muy similares.

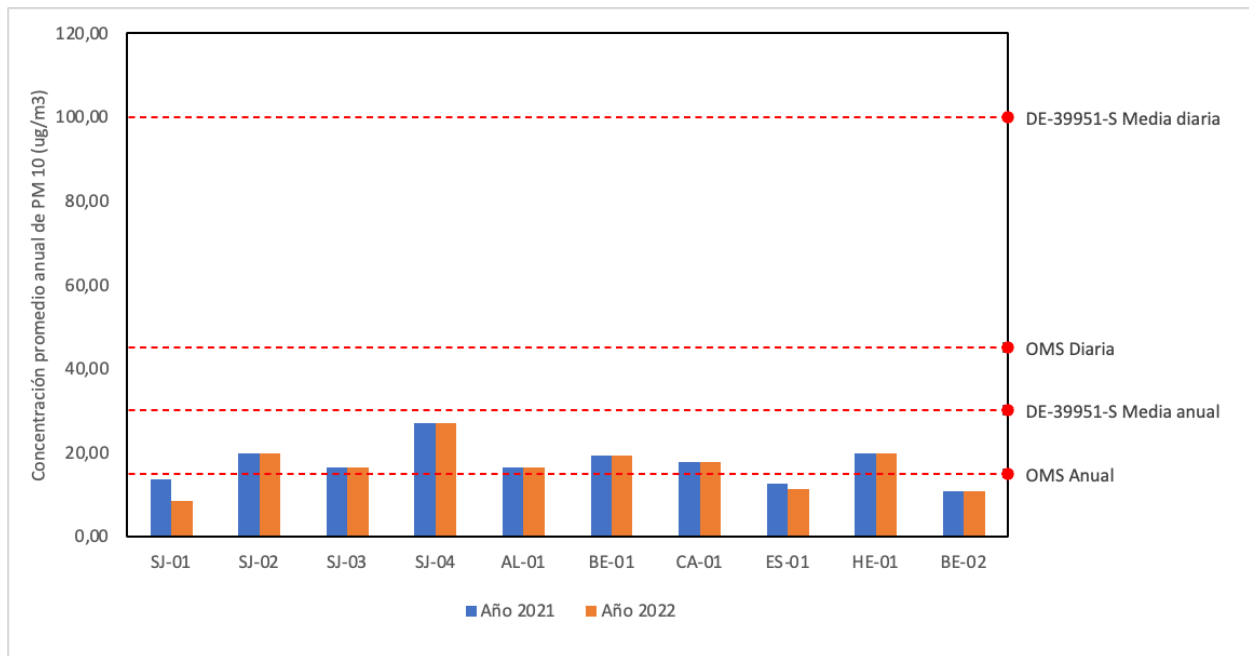


Figura 9. Concentración promedio de PM_{10} por año con los límites de la Organización Mundial de la Salud y el Decreto N° 39951-S.

En la **Figura 10** podemos observar el comportamiento mensual de la concentración promedio para todos los sitios de monitoreo de partículas PM_{10} en la GAM, tanto para el año 2021 como para el 2022. El comportamiento que usualmente se espera es que con el aumento de las lluvias se reduzca la concentración de PM_{10} debido al efecto de lavado, sin embargo, en la gráfica se observó que durante la época de transición y lluviosa las concentraciones son relativamente más altas que durante la época de verano (finales y principios de año). Esto podría deberse a los cambios en la velocidad de los vientos durante dichas épocas. En época de transición y lluviosa es usual que se presente una disminución en la velocidad de los vientos lo que genera un mayor tiempo de residencia de los contaminantes presentes en el aire del Valle Central.

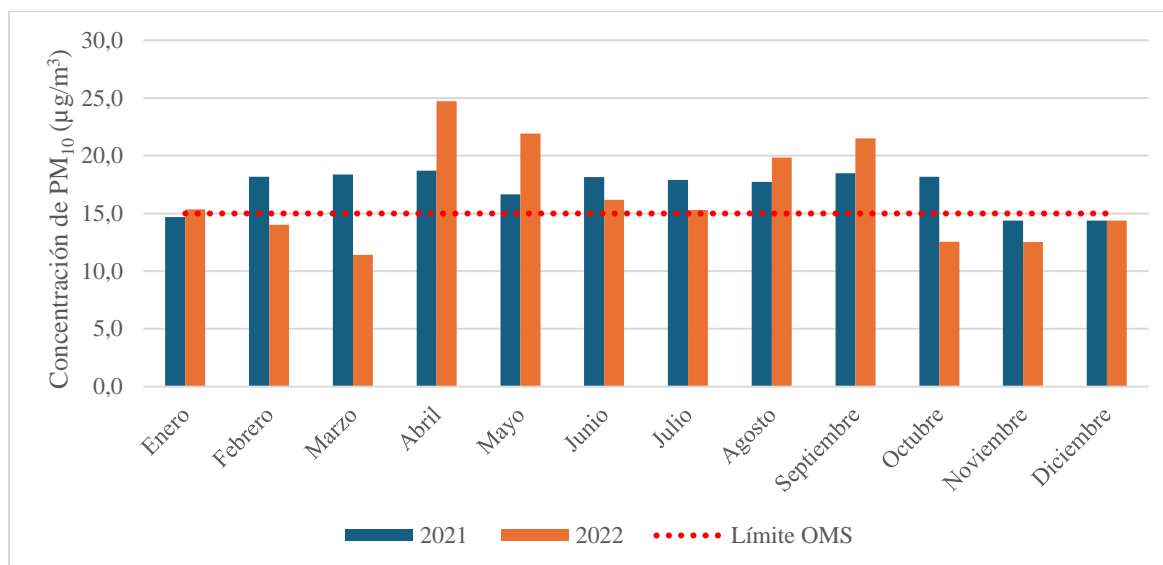


Figura 10. Concentración promedio de PM₁₀ por mes para el monitoreo 2021 y 2022.

4.2 Concentración de PM_{2.5}

La concentración promedio de PM_{2.5} fue de 13,4 µg/m³ para el 2021 y 15,8 µg/m³ para el 2022, ambos resultados de concentración superan el límite sugerido por la OMS establecido en 5,0 µg/m³ (**Cuadro 6**). Con respecto al Decreto N° 39951-S de Costa Rica en 2022 se superó el umbral establecido a nivel nacional mientras que en 2021 se mantuvo por debajo. Este comportamiento se debió a que durante el 2021 las restricciones sanitarias fueron más fuertes y limitaron la movilidad de la población mientras que durante el 2022 existió mayor flexibilidad en las restricciones sanitarias, principalmente en los últimos meses del año.

El punto de mayor concentración de PM_{2.5} fue el ubicado cerca de la Universidad Nacional en Heredia el cual alcanzó un promedio de 18,2 µg/m³, sin embargo, fue cerca de la ferretería EPA en Belén donde se registraron los valores máximos observados en los periodos de monitoreo. En este sentido, en EPA se registraron valores máximos diarios de hasta 97,6 µg/m³ aunque el valor promedio fue de los menores durante el 2022.

Cuadro 6. Concentración promedio anual de PM_{2.5} según punto de monitoreo en la gran área metropolitana durante el 2021-2022.

Concentración de PM_{2.5} (µg/m³)

Localización	Sitio de muestreo	Muestras	Promedio Anual	Desviación Estándar	Valor máximo	Valor anual sugerido Decreto N° 39951-S	Valor anual sugerido OMS
2021							
Universidad Nacional, Heredia	HE-01	190	12,8	7,54	31,1	15	5
Ministerio de Salud, San José	SJ-05	112	14,2	3,48	23,6	15	5
2022							
Universidad Nacional, Heredia	HE-01	132	18,2	11,2	41,2	15	5
Ferretería EPA, Belén	BE-02	115	12,2	10,1	97,6	15	5
Ministerio de Salud, San José	SJ-05	81	17,1	7,0	38,0	15	5

En cuanto al comportamiento mensual, se registraron diferencias entre los meses de mayores concentraciones entre el 2021 y el 2022 siendo los meses de junio y octubre los de mayor concentración media de PM_{2.5} para el 2021 mientras que para el 2022 los meses con los valores más altos fueron abril, agosto y setiembre. Una de las razones de que se presente un aumento en la concentración en el mes de agosto y setiembre fue el efecto del ingreso de los polvos del Sahara al país. Para el 2022 el Instituto meteorológico Nacional reportó la influencia de este fenómeno a finales del mes de agosto e inicios de setiembre (Mena, 2022). Durante estos meses la concentración media mensual del PM_{2.5} aumentó en un 64% con respecto al mes de enero (**Figura 11**). Los meses de menor exposición en la GAM fueron dados en el primer trimestre (enero, febrero y marzo) de cada año, y los meses finales.

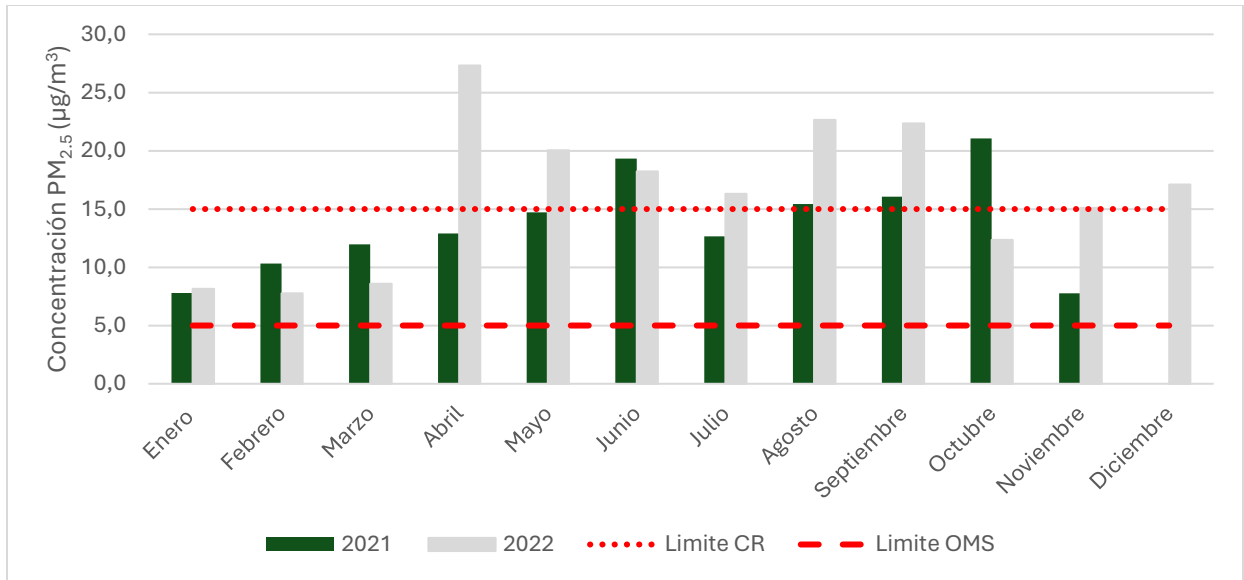


Figura 11. Concentración promedio de PM_{2.5} por mes para el monitoreo 2021 y 2022 en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica.

El informe de calidad del aire del área metropolitana de Costa Rica 2013-2015 (UNA, MINAE, MS, MOPT & MSJ, 2016) señala que contrario a lo esperado, el material particulado tiende a incrementar durante la época lluviosa en comparación con la seca, pese al efecto de lavado atmosférico que ocasionan las precipitaciones. De igual manera, Pacsi (2016) señala que, para la región de Lima Metropolitana, pese a las diferencias estacionales con las regiones tropicales, los valores más altos de PM_{2.5} se presentaron durante el otoño, época caracterizada por una mayor frecuencia en las lluvias y los mínimos se observaron en verano que corresponden a los meses más secos. El comportamiento observado para el PM_{2.5} en las estaciones de la GAM para el 2022 se adecúa a los descrito por los autores citados, ya que en el primer trimestre del año que corresponde a meses secos se observan concentraciones promedio mensuales bajas (enero, febrero y marzo).

4.3 Concentración de NO₂

En cuanto a la concentración de dióxido de nitrógeno se registró un valor promedio general para la GAM de 32,2 µg/m³ para el 2021 y 28,6 µg/m³ para el 2022 con variaciones mínimas entre las tres ciudades evaluadas. La ciudad con mayores concentraciones fue San José mientras que Escazú fue la de la menor concentración media. En comparativa, Escazú registro un 31 % menos de

concentración de NO₂ con respecto a San José mientras que Belén registró un 15 % menos **(Cuadro 7)**.

El límite anual establecido en el Reglamento de calidad del aire para Costa Rica es de 100 µg/m³ mientras que para la OMS el límite de la media anual es de 10 µg/m³ con una primera meta intermedia de 40 µg/m³, una segunda de 30 µg/m³, una tercera de 20 µg/m³. La diferencia tan amplia entre lo sugerido por las autoridades de salud en Costa Rica y lo recomendado por la OMS hace que los resultados de este contaminante tengan dos interpretaciones. En el caso del Decreto N° 39951-S, todos los promedios anuales obtenidos en los puntos monitoreados dentro de la GAM permanecen por debajo de los 100 µg/m³ mientras que con respecto a la OMS ninguna ciudad está por debajo de los 10 µg/m³. No obstante, con respecto a las metas intermedias de la OMS algunos puntos presentan cumplimiento de dichas metas. Esto sugiere la necesidad de revisar los valores límite establecidos en el decreto.

En Escazú la concentración media anual de NO₂ cumplió con la segunda meta de la OMS obteniendo un promedio anual inferior a los 30 µg/m³ mientras que en los puntos de monitoreo en Belén y San José se cumple con la primera meta con valores promedio anuales inferiores a los 40 µg/m³. Por tanto, al tomar como referencia los límites de la OMS se puede indicar que el riesgo de efectos adversos a la salud como: irritaciones respiratorias, agravamiento de enfermedades respiratorias crónicas, aumento del riesgo de infecciones respiratorias, efectos negativos cardiovasculares y efectos en el desarrollo pulmonar de niños; es distinto entre los cantones monitoreados.

Cuadro 7. Concentración de promedio en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de NO_2 por ciudad durante el año 2021 y 2022.

Cantón	Año	2021	2022	Promedio
Escazú	Promedio	25,56	25,55	25,55
	Mediana	26,70	26,20	26,45
	Desviación estándar	10,25	11,90	11,07
	Mínimo	3,80	60,10	31,95
	Máximo	48,80	1,60	25,20
Belén	Promedio	32,02	31,19	31,60
	Mediana	33,50	32,00	32,75
	Desviación estándar	12,49	12,69	12,59
	Mínimo	3,80	10,60	7,20
	Máximo	62,00	78,60	70,30
San José	Promedio	37,17	-	37,17
	Mediana	36,10	-	36,10
	Desviación estándar	13,30	-	13,30
	Mínimo	10,60	-	10,60
	Máximo	74,30	-	74,30
GAM	Promedio	32,21	27,99	30,10
	Mediana	32,00	28,20	30,10
	Desviación estándar	13,16	11,89	12,53
	Mínimo	1,60	1,60	1,60
	Máximo	78,60	78,60	78,60

En el cantón de Belén la concentración promedio fue de $32,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el 2021 y $31,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el 2022 y como se mencionó anteriormente se encuentran por encima del límite sugerido en las Directrices de Calidad del Aire (DCA) por la OMS. Además, hay puntos de monitoreo que no cumplen ni con la primera meta sugerida por la OMS establecida en $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Figura 12 y 13**). En este sentido, los puntos con una concentración superior a los $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Belén fueron los cercanos a el centro comercial Plaza Belén en la Ribera (BEN-01), el edificio del palacio municipal (BEN-03), a la empresa Firestone (BEN-04) y cerca de la Plaza Asunción.

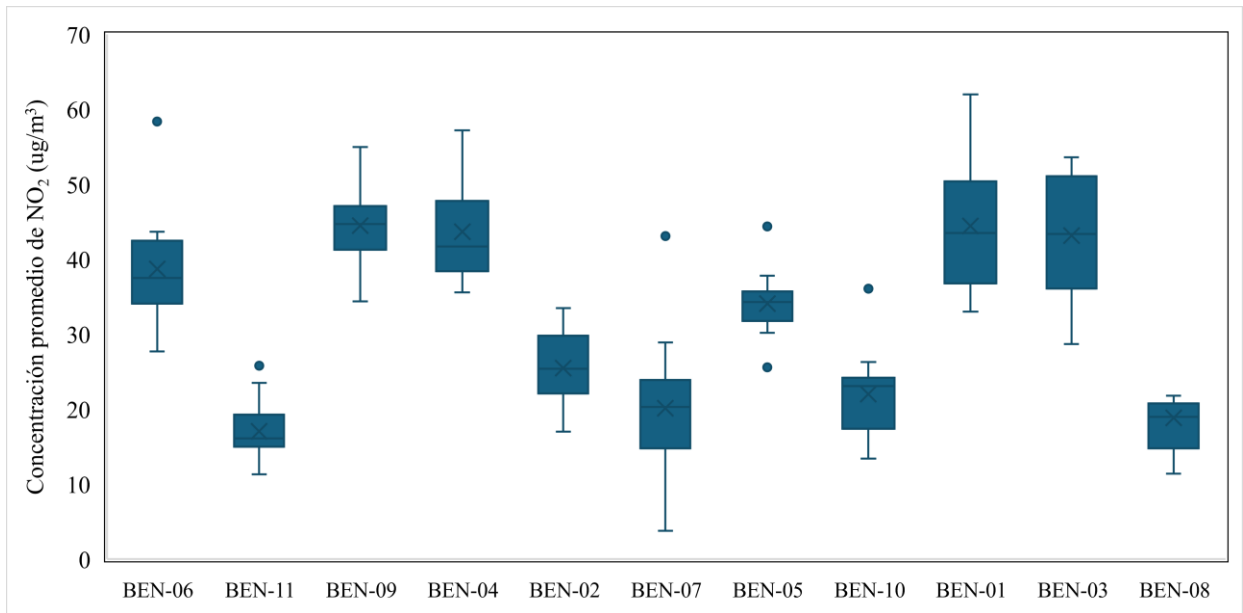


Figura 12. Concentración de dióxido de nitrógeno por punto de monitoreo durante el 2021 en el cantón de Belén.

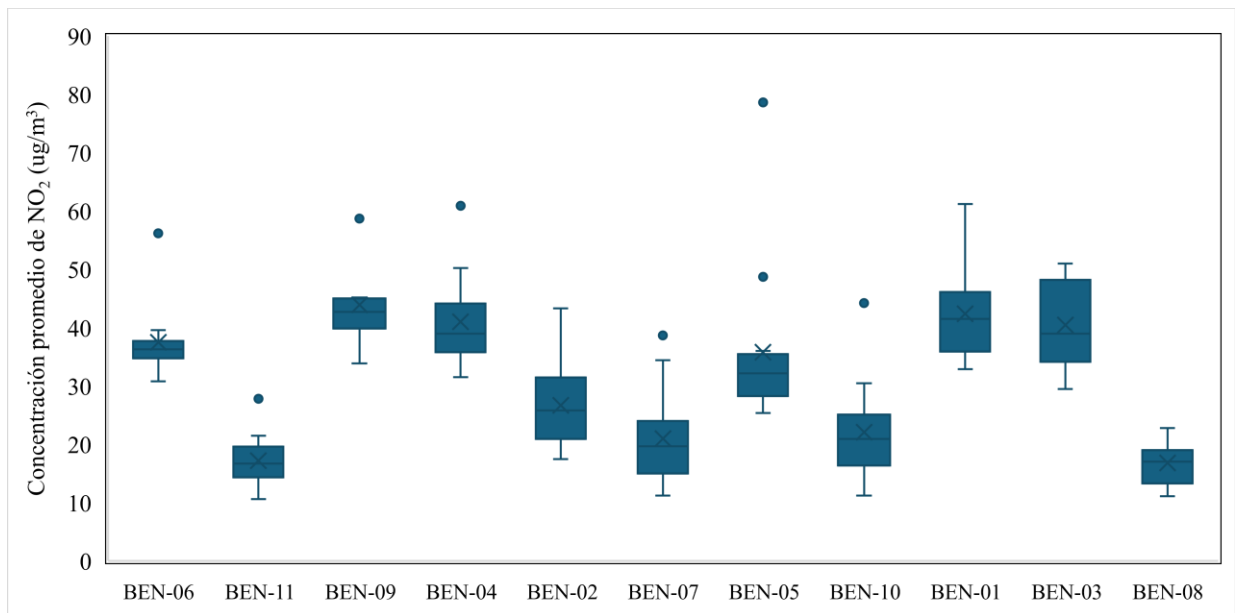


Figura 13. Concentración de dióxido de nitrógeno por punto de monitoreo durante el 2022 en el cantón de Belén.

En el caso del cantón de Escazú solo hubo un registro que presentó una concentración media inferior al límite establecido por la OMS. Lo valores más bajos de concentración fueron en el punto

EZ-07 cercano a la zona de protección tanto en 2021 como en el 2022, lo cual es de esperarse al estar alejado de fuentes antropogénicas directas.

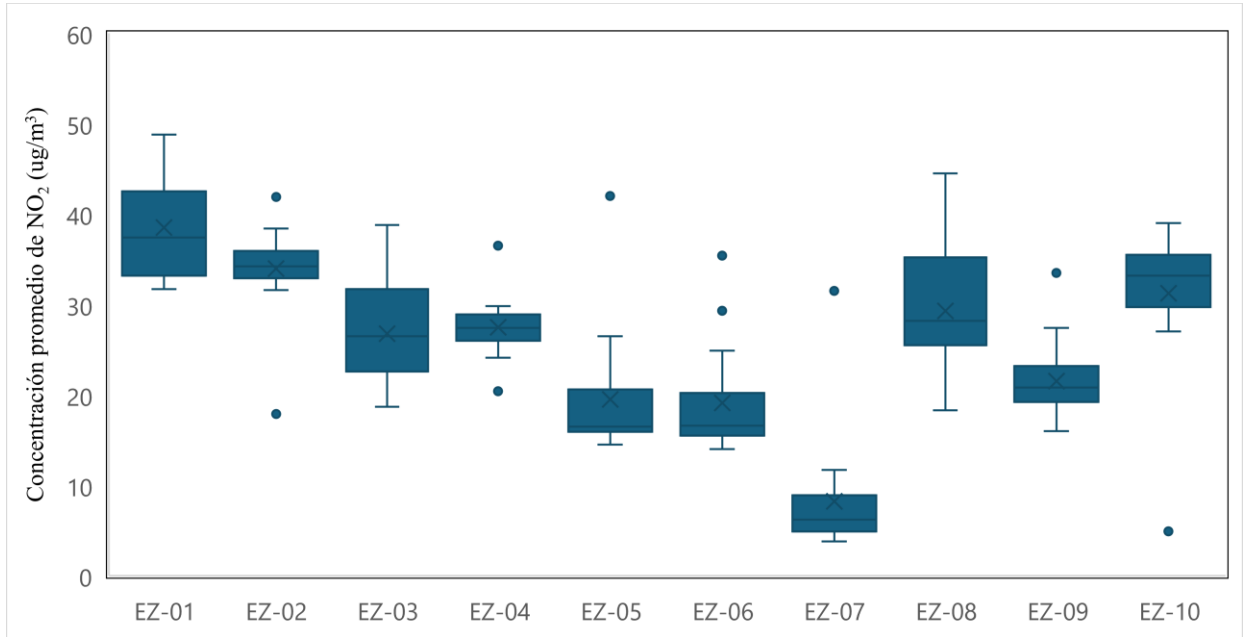


Figura 14. Concentración de dióxido de nitrógeno por punto de monitoreo durante el 2021 en el cantón de Escazú.

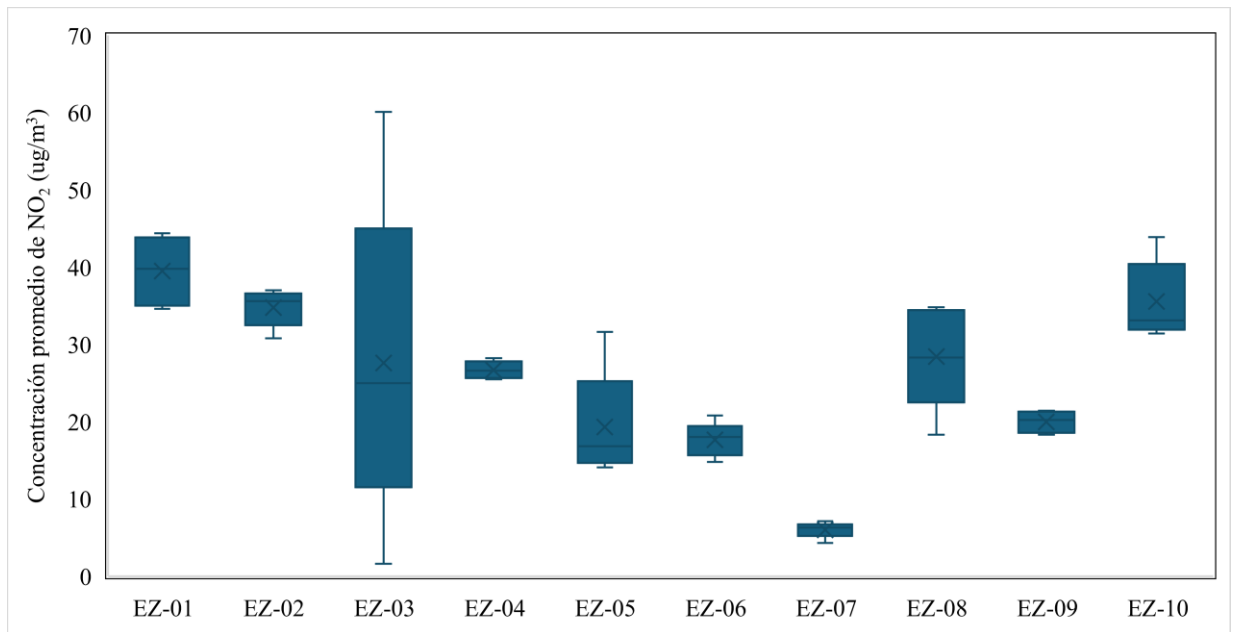


Figura 15. Concentración de dióxido de nitrógeno por punto de monitoreo durante el 2022 en el cantón de Escazú.

En el cantón de San José el 28,5 % de los puntos monitoreados en 2021 presentaron una concentración media superior a los $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecidos como meta intermedia número uno por la OMS (**Figura 16**). En 2022 no hay registros debido a que no se realizaron las mediciones correspondientes a ese año por falta de apoyo en el monitoreo.

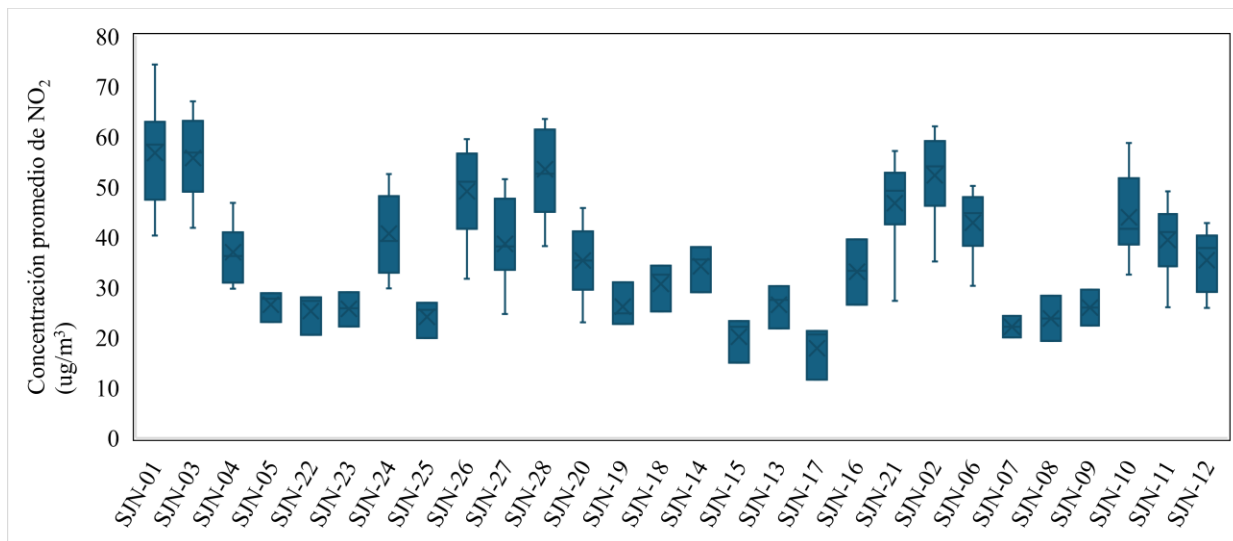


Figura 16. Concentración de dióxido de nitrógeno por punto de monitoreo durante el 2021 en el cantón de San José.

Los ocho puntos que superan el límite de la primera meta intermedia 1 en San José y que presentan las mayores concentraciones de NO_2 son los ubicados cerca del hospital San Juan de Dios, al costado norte de Catedral, cerca de la Bomba la Castellana, en el AyA de la avenida Sana Martín, JAPDEVA, la Numar, el abastecer los Sauces y en el Walmart de San Sebastián. Entre estos puntos la concentración varió entre $40,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $53,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ superando el límite de la primera meta de la OMS hasta en un 35 %.

Para el caso de San José en el 2021, al contar con un mayor número de puntos de muestreo, se elaboró un mapa de interpolación (**Figura 17**) para mostrar la posible distribución espacial de las concentraciones promedio de dióxido de nitrógeno, utilizando el modelo de Distancia Inversa Ponderada (IDW). Es importante mencionar que esto representa una aproximación de lo que realmente está ocurriendo. Tal y como se esperaba, las concentraciones más altas se dieron en los puntos de mayor tránsito y congestión vial.

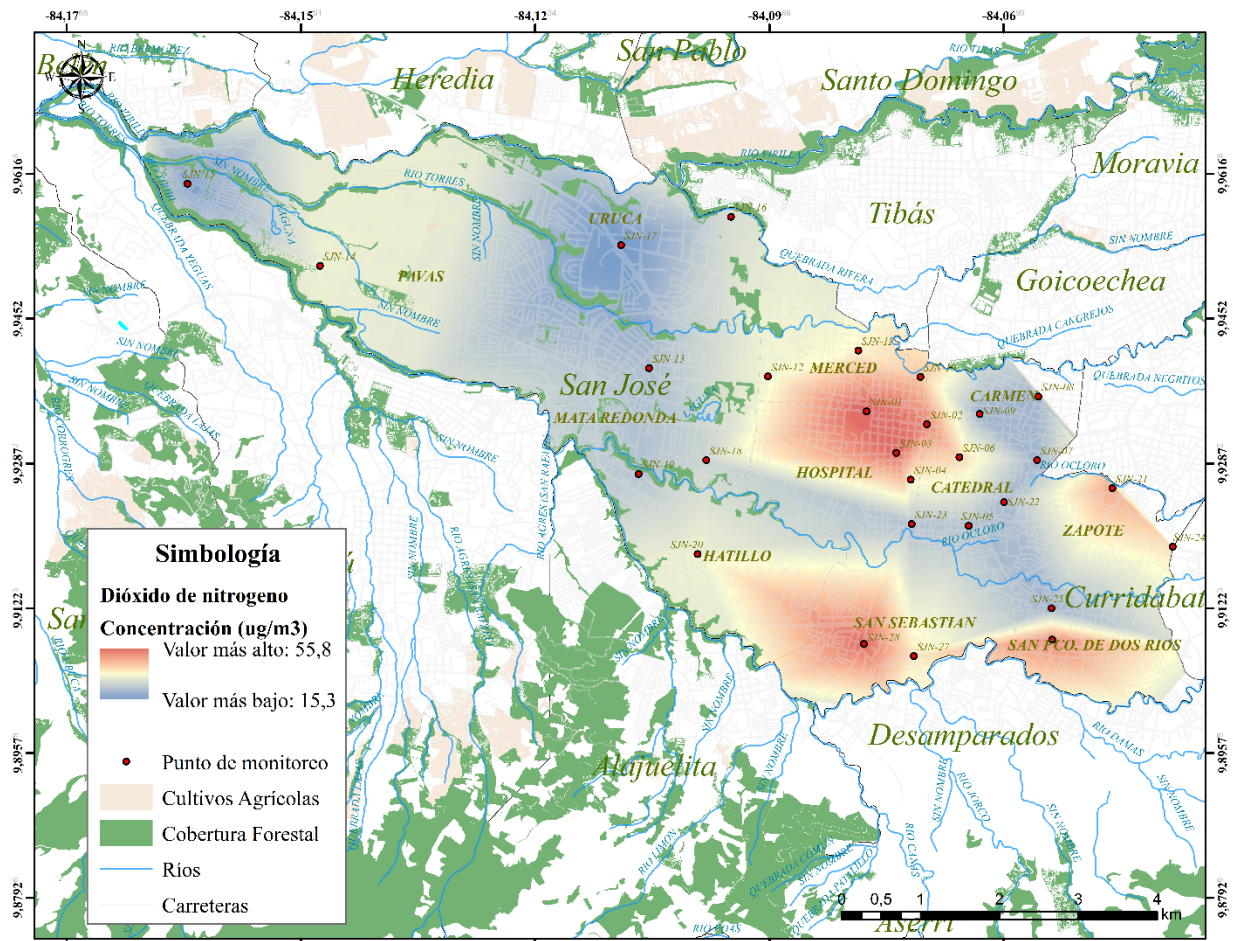


Figura 17. Ubicación de puntos con mayor concentración de dióxido de nitrógeno el 2021 en el cantón de San José.

No fue posible construir un mapa de San José para el año 2022, debido a la suspensión del monitoreo que se realizaba con el municipio.

Al realizar un análisis temporal considerado el promedio de cada mes por ciudad se observó que los meses de mayor concentración de NO_2 fueron agosto y setiembre (época lluviosa) mientras que en los meses de enero y febrero (época seca) los valores fueron más bajos (**Figura 18**). Este comportamiento está directamente relacionado con las condiciones atmosféricas propias de cada época como anteriormente fue explicado para otros contaminantes.

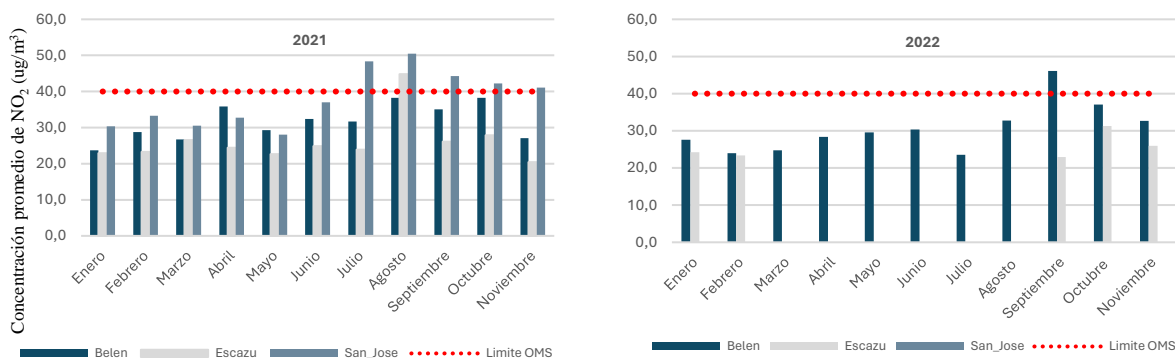


Figura 18. Concentración de dióxido de nitrógeno por mes de monitoreo durante el 2021 y 2022 en el cantón de San José.

4.4 Red automática de Coronado

En la red de monitoreo automática de Coronado se obtuvieron resultados de PM₁₀, PM_{2.5} y la concentración de dióxido de azufre (SO₂), Cabe señalar que esta es la única estación en funcionamiento para dichas fechas debido a que las demás requieren de una inversión económica para dar mantenimiento y reactivarse. En términos generales, el riesgo a la salud de las personas que transitan por el punto de monitoreo es muy bajo debido a que las concentraciones medias anuales registradas no superan lo recomendado por la OMS y el Decreto N° 39951-S de Costa Rica. Esto se debe a que la estación está ubicada en una zona residencial en las afueras del casco central de la ciudad San Isidro de Coronado, alejado de actividades antropogénicas significativas. Solamente se ocurre un tránsito vehicular leve en los alrededores del sitio de muestreo.

4.4.1 Material particulado PM₁₀, PM_{2.5}

El promedio anual de PM₁₀ para el 2021 fue de 5,9 µg/m³ mientras que en 2022 fue similar con un valor promedio de 5,99 µg/m³. En cuanto al PM_{2.5} el promedio para 2021 fue de 4,6 µg/m³ y en el año 2022 fue de 4,7 µg/m³ (**Figura 19**). Estos resultados son inferiores tanto a los valores sugeridos para material particulado por la OMS como por Decreto N° 39951-S de Costa Rica. Cabe señalar que algunos valores fueron descartados de la base de datos debido a que no se logró obtener el 75 % de los datos.

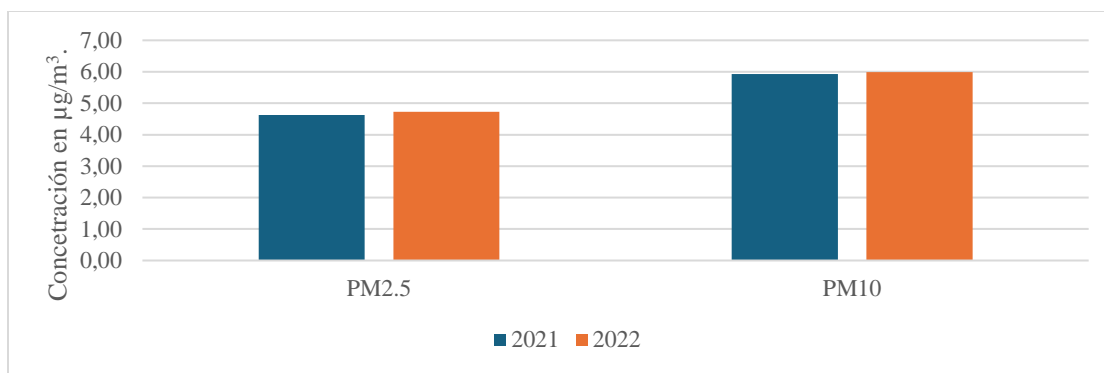


Figura 19. Concentración de material particulado de PM₁₀, PM_{2.5} en la estación automática de Coronado, 2021 y 2022.

4.4.2 Concentración de SO₂

Con respecto al dióxido de azufre en Coronado los resultados muestran una concentración media anual de 1,01 ppb en el 2021 y 0,6 ppb, siendo valores promedio muy bajo en comparación con el límite anual sugerido por la OMS. Se puede asegurar que este contaminante atmosférico, para dichos años, no representó ningún problema hacia la salud de las personas que viven en los alrededores del sitio de muestreo. En términos mensuales existe muy poca variabilidad en los datos siendo el mes de marzo el que presentó el mayor promedio anual de concentración (**Figura 20**).

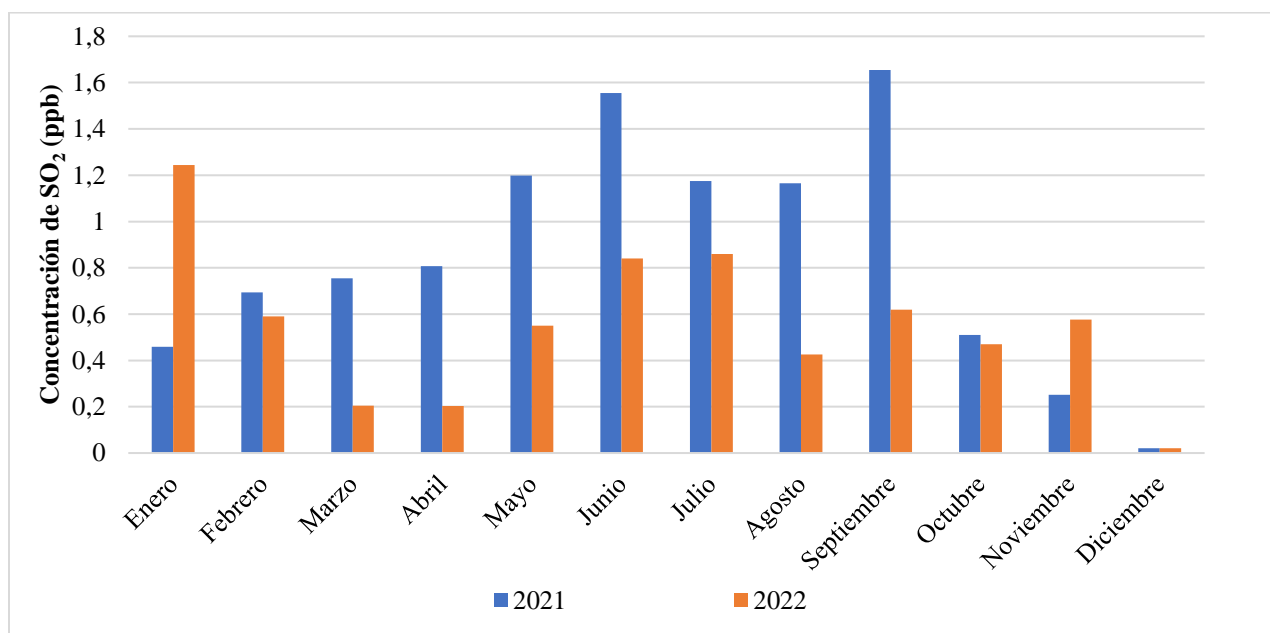


Figura 20. Concentración de SO₂ en la estación automática de Coronado, años 2021 y 2022.

4.5 Carbono negro

El carbono negro es un contaminante atmosférico, en forma de partículas, que puede permanecer suspendido en el aire durante largos períodos de tiempo, contribuyendo a la contaminación del aire en áreas urbanas y regiones afectadas por la quema de biomasa y combustibles fósiles pesados. Adicionalmente, es considerado un contaminante climático de vida corta (CCVC) porque a su vez juega un papel importante en el calentamiento global, así como sobre la salud humana. Durante el 2021 y 2022 se hicieron mediciones en tiempo real en la estación automática ubicada en Hatillo, San José. Los resultados obtenidos en 2021 indicaron un promedio de 2,96 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que para el 2022 fue de 1,65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, los cuales fueron menores a los reportados en Bogotá en Colombia y a los reportados en Uruguay (Franco & Iglesias, 2022; Alcaldía Mayor de Bogotá, 2022). En este sentido, en Uruguay la concentración promedio fue de 9,00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2022 el cual es un 5 veces más alto que el reportado en Costa Rica en ese mismo año (**Cuadro 8**). En el Reino Unido se ha registrado la concentración de este contaminante en 2019, con un valor que es menor al de Costa Rica y otros países de América (Ciupek, y otros, 2021).

Cuadro 8. Concentración de promedio en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de carbono negro durante el año 2021 y 2022.

Promedio anual de carbono negro ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
País	2019	2021	2022
Costa Rica	-	2,96	1,65
Uruguay	-	-	9,00
México	2,40	-	-
Reino Unido*	0,94	-	-
Bogotá, Colombia*	6,88	4,29	-

Es importante considerar que el tiempo de monitoreo en 2022 fue menor al del 2021 debido a limitaciones con los equipos de medición. En este sentido, para el 2021 se cuentan con datos desde julio hasta diciembre mientras que en 2022 se tienen para enero y febrero. Las concentraciones mensuales en 2021 señalan que en los meses de agosto y setiembre fueron los de mayor concentración promedio mientras que los de menor concentración fueron en noviembre y diciembre (**Figura 21**). En agosto y setiembre el promedio de carbono negro fue de 3,46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que en noviembre y diciembre los valores fueron de 2,65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. 2021. En 2022 el mes de mayor concentración fue febrero con 2,14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que en febrero fue de 1,61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (**Figura 22**).

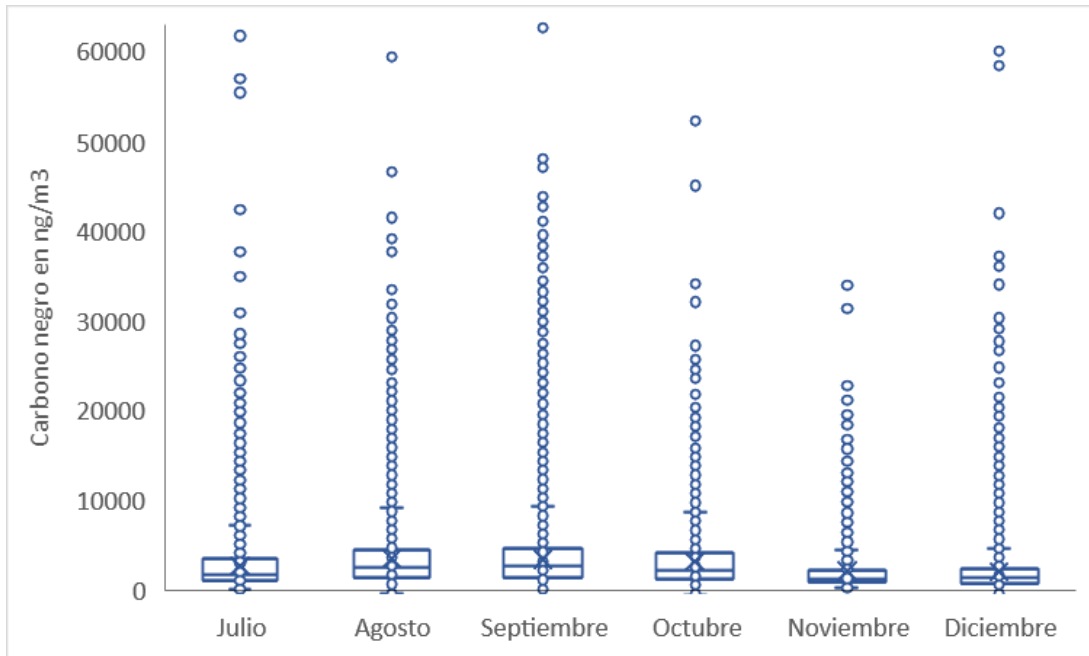


Figura 21. Concentración de carbono negro en ng/m^3 en la Gran Área Metropolitana durante el 2021.

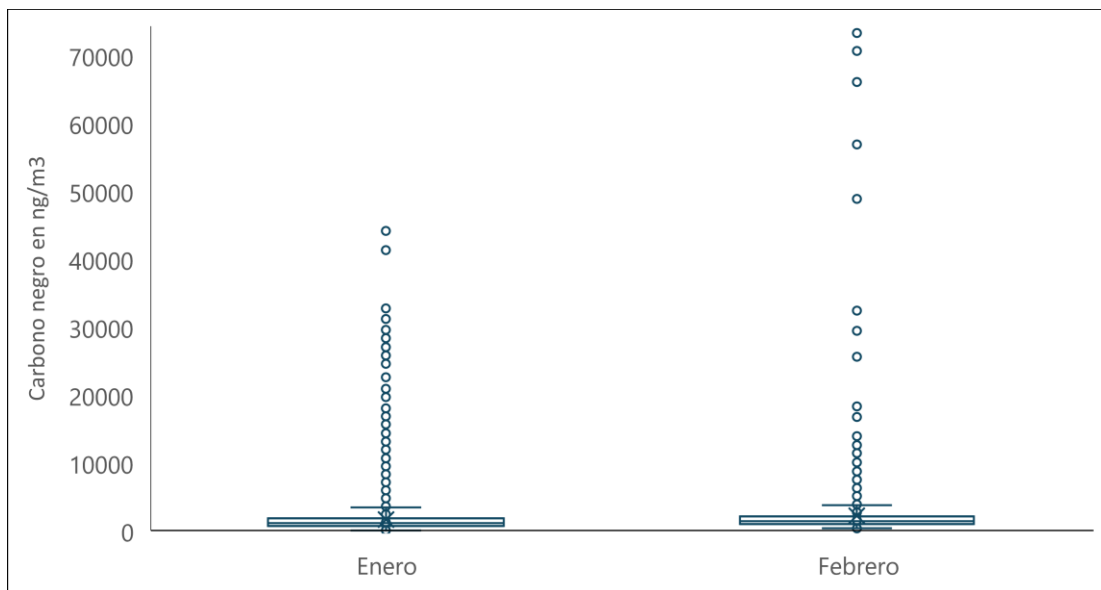


Figura 22. Concentración de carbono negro en ng/m^3 en la Gran Área Metropolitana durante el 2022.

Cabe señalar que las mediciones de concentración de carbono negro presentan una muy alta variabilidad con valores muy altos en momentos específicos, alcanzando en 2022 los $73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y los $127 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el 2021. Es importante recordar que la estación se encuentra relativamente cerca de la carretera de circunvalación, la cuál presenta un alto tránsito vehicular durante todo el año.

Además de la problemática asociada a la salud de este contaminante atmosférico existe un impacto negativo de este en el efecto invernadero y el cambio climático. Esto debido a que tiene la capacidad de absorber la luz solar, lo que aumenta la temperatura atmosférica y contribuye al calentamiento global. Además, al depositarse en superficies reduce su reflectividad (albedo) y aumenta la absorción de energía radiante. Adicionalmente, la deposición en suelos y cuerpos de agua puede afectar la calidad del suelo y del agua, así como la vida acuática y terrestre.

5. Conclusiones

- El promedio de concentración de PM₁₀ durante el periodo de monitoreo 2021 en la gran área metropolitana (GAM) de Costa Rica fue de 17,4 µg/m³ mientras que para el 2022 fue de 15,3 µg/m³; ambos valores se encuentran por debajo del límite establecido Decreto N° 39951-S y por debajo de la meta intermedia cuatro que sugiere la OMS. Este resultado indica que el riesgo por exposición de este contaminante fue bajo durante estos años.
- El punto de mayor concentración de PM₁₀ dentro de la GAM fue el ubicado cerca de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz en la Uruca el cual registró una concentración media anual de este contaminante atmosférico de 27,2 µg/m³ y 23,9 µg/m³. Estas concentraciones sobrepasan el límite sugerido por la OMS de menor riesgo para la salud de los ciudadanos.
- La concentración promedio de PM_{2.5} fue de 13,4 µg/m³ para el 2021 y 15,8 µg/m³ para el 2022, ambos resultados de concentración superan el límite sugerido por la OMS establecido en 5,0 µg/m³. Con respecto al Decreto N° 39951-S de Costa Rica en 2022 se superó el umbral establecido a nivel nacional mientras que en 2021 se mantuvo por debajo.
- El punto de mayor concentración de PM_{2.5} fue el ubicado cerca de la Universidad Nacional en Heredia el cual alcanzó un promedio de 18,2 µg/m³ mientras que en EPA se registró el valor promedio más bajo.
- Todos los puntos monitoreados en la GAM, excepto en San Isidro de Coronado, sobrepasaron el límite de concentración media anual de PM_{2.5} que establece la Organización Mundial de la Salud como umbral para que no existan efectos adversos en la salud de los ciudadanos. Con respecto al límite establecido por el reglamento de calidad del aire en Costa Rica tres de los cinco puntos se encuentran por debajo del límite.
- La concentración de dióxido de nitrógeno registró un valor promedio general para la GAM de 32,2 µg/m³ para el 2021 y 28,6 µg/m³ para el 2022 con variaciones mínimas entre las tres ciudades evaluadas; la ciudad con mayores concentraciones fue San José mientras que Escazú fue la de la menor concentración media.
- Los puntos de mayor riesgo por altas concentraciones de dióxido de nitrógeno en la GAM son los ubicados cerca de centro comercial Plaza Belén en la Ribera, el edificio del palacio municipal en Belén, la empresa Firestone, la Plaza Asunción en Belén, el hospital San Juan de Dios en San José, al costado norte de Catedral, cerca de la Bomba la Castellana, en el

AyA de la avenida San Martín, JAPDEVA, la Numar, el abastecedor los Sauces y en el Walmart de San Sebastián.

- Los meses de mayor concentración de NO₂ fueron agosto y setiembre (época lluviosa) mientras que en los meses de enero y febrero (época seca) los valores fueron más bajos; este comportamiento está directamente relacionado con las condiciones atmosféricas propias de cada época y las actividades antropogénicas que generan emisiones de este contaminante atmosférico, favoreciendo un estancamiento de la atmósfera al disminuir la velocidad de los vientos
- A lo largo de los dos años de análisis se presentaron diferentes fenómenos naturales que afectan la calidad del aire, como erupciones volcánicas y la influencia de los polvos del Sahara, sin embargo, sus efectos no fueron tan distinguibles como en otros años.
- La concentración promedio de carbono negro en Costa Rica fue de 2,96 µg/m³ en 2021 mientras que para el 2022 fue de 1,65 µg/m³, los cuales son menores a los reportados en Bogotá en Colombia y a los reportados en Uruguay.
- Debido a la falta de recursos económicos y humanos que ha venido afectando la Red de Monitoreo de Calidad del Aire, para el 2023 no se van a contar con datos de la red de monitoreo automática; además de una reducción en el alcance de la red de monitoreo manual y pasivo, lo que implica una reducción de la información necesaria para salvaguardar la salud de las personas.

6. Recomendaciones

- Sensibilizar a las autoridades correspondientes para contar con los recursos necesarios, en tiempo y forma, para lograr la operatividad de la red de monitoreo de calidad del aire, con el fin de mitigar los efectos adversos de la contaminación del aire en la salud de la población.
- Fomentar el apoyo de los gobiernos locales en la vigilancia y protección de la calidad del aire.
- Solicitar datos al Instituto Meteorológico Nacional para el próximo informe 2023-2024 con el propósito de realizar un análisis completo de correlaciones de concentración tanto de PM_{10} , $PM_{2.5}$, SO_2 y NO_2 con respecto a variables como radiación, precipitación, temperatura, humedad relativa, entre otras variables.
- Hacer señalamientos de los focos de contaminación atmosférica por material particulado, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre, para advertir a la población de los puntos críticos de contaminación que les permita a los ciudadanos tomar medidas de precaución.
- Garantizar los recursos necesarios que permitan una mejor comunicación de la situación de la calidad del aire a la población.
- Realizar las gestiones necesarias para obtener variables explicativas del comportamiento de los agentes químicos medidos tales como: flujo vehicular, temperatura, precipitación y demás variables meteorológicas, para la generación de modelos de correlaciones y dispersión de contaminantes que permitan explicar los comportamientos observados.
- Por muchos años la red de monitoreo de calidad del aire se ha enfocado en la medición de la concentración y caracterización de partículas a través de la utilización de equipos manuales para la toma de muestras. Es por esta razón que se recomienda fortalecer el monitoreo de partículas por medio de la incorporación de equipos automáticos que permitan complementar la red manual, permitiendo la adquisición de una mayor cantidad de datos, con una mejor resolución y con un menor tiempo de respuesta, facilitando así la elaboración de perfiles de concentración para un mejor entendimiento y toma de decisiones.

7. Referencias Bibliográficas

- AirNow. (2016). *Air Quality Index Basics*. Recuperado el 17 de agosto de 2021, de AirNow: <https://www.airnow.gov/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., Reinos-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. *Vid supra 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>
- Ciuppek, 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 en 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*.
- Molina, F. (2016). *Monitoreando 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 PM2.5 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*. Ciudad de México: Limusa Noriega Editores.