



INFORME INTEGRAL DE ACTUALIZACIÓN 2022

Contratación de Vinculación Externa entre la Universidad Nacional
y la Municipalidad de Belén, para el establecimiento del Programa
de Observatorio Ambiental en el cantón de Belén

Elaborado para la Municipalidad de Belén



Elaborado por:

Laboratorio de Análisis Ambiental
Escuela de Ciencias Ambientales
Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar

Setiembre, 2023

Heredia, Costa Rica

Índice General

	1
Índice General	1
Índice de Figuras	3
Índice de Cuadros	4
Presentación	5
1. Introducción	7
2. Marco Teórico	10
2.1. Contaminación atmosférica	11
2.1.1. Dióxido de Nitrógeno	11
2.1.2. Dióxido de Azufre	12
2.1.3. Material Particulado	13
2.2. Calidad del aire	13
2.3. Métodos de Muestreo de Contaminantes Atmosféricos	15
2.3.1 Método Pasivo	15
2.3.2. Método Activo	16
2.3.3. Método Automático	17
3. Metodología	18
3.1. Descripción de Sitios de Muestreo	19
3.1. Métodos de Muestreo	21
3.2. Métodos de Análisis	23
4. Resultados	25
4.1. Red de Monitoreo Activa: Contaminante PM ₁₀ y PM _{2.5}	26
4.1.1. Análisis de PM ₁₀ en La Ribera de Belén	26
4.1.2. Análisis de PM _{2.5} en el sitio ubicado en EPA de Belén	29
4.2. Red de Monitoreo Pasiva: Contaminante NO ₂	32
4.3. Red de Monitoreo Pasiva: Contaminante SO ₂	39
5. Conclusiones y recomendaciones	44
5.1. Conclusiones	45
5.2. Recomendaciones	46
6. Bibliografía	48
7. Anexos	54

Índice de Figuras

Figura 1. Distribución espacial de los sitios de monitoreo de la red manual activa, pasiva y automática en el cantón de Belén	19
Figura 2. Esquema de un medidor de alto volumen.....	21
Figura 3. Muestreadores de alto volumen ubicados en (a) La Ribera y (b) EPA del cantón de Belén	22
Figura 4. Portatubos de muestreo pasivo ubicados en el cantón de Belén	23
Figura 5. Filtro colector de material particulado (a) antes del muestreo y (b) después de 24 horas.	24
Figura 6. Concentraciones de PM ₁₀ según fecha de muestreo para el año 2021 en el sitio ubicado en La Ribera, Belén.....	26
Figura 7. Concentraciones promedio mensuales de PM ₁₀ para el año 2021 en el sitio ubicado en La Ribera de Belén.	27
Figura 8. Comparación de las concentraciones promedio mensuales de PM ₁₀ entre los años 2019, 2020 y 2021 en el sitio ubicado en La Ribera de Belén.	28
Figura 9. Concentraciones de PM _{2.5} acomodadas por fecha para el año 2022 en el sitio ubicado en EPA de Belén.	29
Figura 10. Concentraciones promedio mensuales de PM _{2.5} para el año 2022 en el sitio ubicado en EPA de Belén.	31
Figura 11. Comparación de las concentraciones promedio mensuales de PM _{2.5} entre los años 2020, 2021 y 2022 en el sitio ubicado en EPA de Belén.	32
Figura 12. Comparación de la concentración de NO ₂ por sitio de muestreo para las campañas del 2022 en el cantón de Belén.	35
Figura 13. Comparación de la concentración media de dióxido de nitrógeno por campaña según año de monitoreo.	37
Figura 14. Concentración promedio de dióxido de nitrógeno (en unidades de µg/m ³) por punto de muestreo según año de monitoreo	38
Figura 15. Comparación de la concentración de SO ₂ por sitio de muestreo para las campañas del 2022 en el cantón de Belén.	40
Figura 16. Comparación de la concentración media de dióxido de azufre por campaña según año de monitoreo.	42
Figura 17. Concentración promedio de dióxido de azufre (en unidades de µg/m ³) por punto de muestreo según año de monitoreo.	43

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Sitios de muestreo manual activo de material particulado (PM ₁₀ y PM _{2.5}) y automático, Belén.....	20
Cuadro 2. Sitios de muestreo de la red de contaminantes por difusión pasiva, Belén	20
Cuadro 3. Concentración de NO ₂ y concentración promedio anual registradas por campaña y sitio de muestreo durante el año 2022.	33
Cuadro 4. Principales resultados del análisis de Tukey al considerar los puntos de muestreo como factor de agrupación para la concentración de NO ₂	36
Cuadro 5. Concentración de SO ₂ y concentración promedio anual registradas por campaña y sitio de muestreo durante el año 2022.	39
Cuadro 6. Principales resultados del análisis de Tukey al considerar los puntos de muestreo como factor de agrupación para la concentración de SO ₂	41

Presentación

Los planes de monitoreo son parte del quehacer de los gobiernos en sus diferentes niveles, los cuales se orientan al diseño e implementación de medidas que busquen la mejora de la calidad ambiental (Lovett et al., 2007). Bajo este contexto, la Municipalidad de Belén desde el 2007 cuenta con un Observatorio Ambiental, que establece una serie de muestreos en la matriz aire con el objetivo de caracterizar la línea base de diferentes agentes contaminantes.

La Municipalidad de Belén, mediante la asistencia técnica del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional, gestiona dos tipos de redes de monitoreo manuales: una activa para Material Particulado en sus dos fracciones (PM_{10} y $PM_{2,5}$) y otra pasiva para dióxido de nitrógeno (NO_2) y dióxido de azufre (SO_2). La red manual gravimétrica está integrada por dos puntos de estudio, en los cuales se instalaron equipos de alto volumen para el desarrollo de un muestreo activo de 24 h. Por su parte, la red manual pasiva, incluye tres campañas de muestreo en 11 sitios del cantón, donde en cada punto se dispuso de un sistema de tubos captadores durante un período de 21 días.

Los resultados de concentración del PM_{10} en 2022 mostraron un promedio de $19,95 \mu g m^{-3}$ siendo inferior a los límites máximos permitidos en Costa Rica y recomendaciones internacionales. Para PM_{10} todos los días se encuentran por debajo de los límites definidos, tanto por la OMS ($45 \mu g m^{-3}$), la Unión Europea ($50 \mu g m^{-3}$) y el decreto el Decreto No. 39951-S de Costa Rica ($100 \mu g m^{-3}$). Las concentraciones de estas partículas aumentan en el aire durante la época lluviosa siendo los meses de agosto y setiembre los de mayor magnitud. Las partículas de $PM_{2,5}$ tuvieron una concentración media anual de $12,96 \mu g m^{-3}$ lo cual es inferior a los límites establecidos por decreto en Costa Rica y al límite recomendado por la OMS que fija su valor en $15 \mu g m^{-3}$. No obstante, existieron 24 días en que se superó el límite determinado por la OMS y dos días en que se superó el límite establecido por decreto en Costa Rica.

Con respecto a la red pasiva y las concentraciones de NO_2 el cantón de Belén registra para 2022 un promedio anual de $31,20 \mu g m^{-3}$ que supera el límite máximo establecido por la OMS sobre este contaminante en el aire ($10 \mu g m^{-3}$). Las concentraciones de este

contaminante tienden a aumentar en promedio durante la época lluviosa y a disminuir en época seca. En cuanto a las metas de reducción de la OMS el cantón cumple con la meta número 1 y se encuentra muy cerca de cumplir la número 2 que se ubica en menos de 30 $\mu\text{g m}^{-3}$. Los puntos con mayor severidad de contaminación del aire por NO_2 se ubican cerca del Palacio Municipal, la Plaza Asunción, Plaza Belén y la Firestone.

Por su parte, las concentraciones de SO_2 fueron en promedio de 25,11 $\mu\text{g m}^{-3}$, siendo el punto de la Firestone (106,92 $\mu\text{g m}^{-3}$) el de mayor contaminación con valores que superan el límite máximo establecido por la OMS (80 $\mu\text{g m}^{-3}$). El resto de los puntos no superan este límite, por lo que en términos generales el cantón no se encuentra con un alto riesgo por exposición ante este contaminante. Contrario a el NO_2 , durante la época seca, la severidad de la concentración de este contaminante es mayor en todos los puntos de muestreo mientras que para la época lluviosa las concentraciones disminuyen. Históricamente, el sitio ubicado en la Firestone ha presentado los valores de concentración de SO_2 más altos con una variación promedio de 214,66 $\mu\text{g m}^{-3}$ para el 2019 y 141,42 $\mu\text{g m}^{-3}$ para el 2022.

Por último, se recomienda establecer puntos de muestreos a la entrada y salida de los vientos para determinar el movimiento de contaminantes que predominan a nivel local. De manera complementaria, ampliar el monitoreo a otros agentes químicos como el ozono debido a su influencia con el dióxido de nitrógeno, y compuestos con potencial odorífero producto de las actividades productivas a nivel del cantón.

Laboratorio de Análisis Ambiental
Escuela de Ciencias Ambientales
Universidad Nacional



1. Introducción

El planeta se enfrenta a una serie de crisis ambientales que se han generado como resultado de la relación estrecha entre el ambiente y las acciones humanas. La calidad ambiental se ha deteriorado por el crecimiento exponencial de la población y el crecimiento económico. Por ello, los ecosistemas, aunque cuenten con la capacidad de autoregenerarse, no pueden hacerlo al ritmo en que se extraen sus recursos, lo que conlleva a su deterioro (Mercado-Maldonado & Ruiz-González, 2006).

El crecimiento económico acelerado y la globalización han generado la aparición de problemáticas a nivel social y ambiental a diferentes escalas: mundial, regional y local (Vargas-Marcos, 2005). Debido a esta situación, tanto entes internacionales como nacionales en diferentes partes del mundo han identificado que la única forma sensata de progreso consiste en el desarrollo sostenible. Lo anterior porque los modelos ejecutados durante décadas pasadas han generado grandes consecuencias, conllevando no solo la pérdida de especies, sino un impacto directo sobre la salud de las personas (UNEP, 2017).

La contaminación ambiental continúa siendo una gran problemática que se agrava con los cambios en los patrones de consumo de la población. Los contaminantes, especialmente los productos químicos sintéticos, las emisiones antropogénicas y la generación de residuos sólidos, degradan la calidad del aire, el recurso hídrico y el suelo; este deterioro limita cada día más la disponibilidad de recursos (UNEP, 2017).

La “Curva Ambiental de Kuznets” es una hipótesis propuesta por científicos que explora la relación entre el crecimiento económico y la calidad ambiental. Esta hipótesis lo que plantea es que, al aumentar los ingresos económicos, se produce un incremento en el deterioro ambiental hasta un punto a partir del cual la calidad empieza a crecer nuevamente debido a que los países invierten en tecnologías de menor impacto y empiezan a considerar el factor ambiental como uno de los ejes del desarrollo (CEPAL, 2003).

Según Palacios-Anzules y Moreno-Castro (2022) las principales problemáticas ambientales que han sido enlistadas por los organismos internacionales son: la deforestación de bosques, la contaminación del recurso hídrico, la contaminación de costas y mares, la

sobreexplotación de mantos acuíferos, la erosión de suelos, la destrucción de la capa de ozono y el calentamiento global.

El monitoreo ambiental se define como una serie de mediciones de variables físicas, químicas y biológicas diseñadas para cuantificar a los cambios que han existido en el ambiente (Lovett et al., 2007), y es mediante el monitoreo ambiental que se puede saber con certeza si existen cambios en la calidad ambiental de las diferentes matrices (CEPIS, OPS & OMS, 1999). Este proporciona la información base para formular políticas ambientales, y a su vez un monitoreo constante permite evaluar los resultados de la implementación de estas políticas. Por lo tanto, los gobiernos requieren los planes de monitoreo ambiental para el diseño e implementación de medidas que busquen la mejora de la calidad ambiental (Lovett et al, 2007).

Reducir la contaminación es fundamental para proteger los ecosistemas de los que dependen los seres humanos y toda forma de vida del planeta; la responsabilidad de impulsar el cambio en un frente tan amplio debe repartirse entre todas las naciones, involucrando los diferentes sectores y a la población en general (UNEP, 2017). Para ello se debe de contar con un monitoreo sistemático que contribuya a tomar medidas urgentes para prevenir y proteger la calidad de los recursos naturales (Romeu-Álvarez et al., 2015).

La Municipalidad de Belén como ente gubernamental del cantón, busca monitorear la calidad del aire a través del Observatorio Ambiental establecido en conjunto con el Laboratorio de Análisis Ambiental (LAA) de la Universidad Nacional (UNA). Tal alianza establece un sistema de monitoreo ambiental que permite cuantificar el grado de contaminación con el fin de obtener insumos para la formulación de estrategias de mitigación y remediación ambiental.



2. Marco Teórico

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). Los contaminantes primarios son los que se emiten directamente a la atmósfera y dentro de los cuales se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2) y material particulado (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 dióxido de nitrógeno (NO_2) producto de la oxidación del monóxido de nitrógeno (NO) o el ozono (O_3) producto de reacciones fotoquímicas (Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, s.f.).

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 $\text{PM}_{2.5}$) y plomo (Pb) (Comisión federal para la protección contra riesgos sanitarios, 2017).

Dado que los contaminantes de mayor interés por sus efectos sobre la salud son los contaminantes criterio, se procede a explicar las características de los más relevantes.

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 derivado 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 NO_2 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 NO_2 reacciona con el agua presente en la atmósfera formando ácido nítrico y nitroso que genera la lluvia ácida, la cual ocasiona 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 material particulado (Environmental Protection Agency, 2017).

2.1.2. Dióxido de Azufre

El dióxido de azufre (SO_2) 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). Principalmente 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 es bastante bajo (Environmental Protection Agency, 2019; Skiba & Parra-Guevara, 2011).

Los efectos a la exposición del SO_2 varían según concentración y duración, 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 SO_2 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 SO_2 con agentes atmosféricos producen nieblas que obstaculizan la visibilidad (Environmental Protection Agency, 2019).

2.1.3. Material Particulado

El material particulado consiste en una mezcla de entidades sólidas y pequeñas gotas de líquidos que se mantienen suspendidos en el aire. Se puede clasificar de acuerdo con el diámetro aerodinámico que se considera como límite. 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 $\text{PM}_{2.5}$ 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 puede ser emitido directamente como un contaminante primario o bien como secundario, como cuando reacciona con los agentes atmosféricos como es el caso de muchos aerosoles. 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).

Se selecciona estos diámetros, porque a partir de las 10 μm puede 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

La concentración de contaminantes en el aire se relaciona con su calidad. 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 correlaciona 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 que puede tomar para reducir su exposición a la contaminación del aire (AirNow, 2016).

La calidad del aire puede verse afectada las emisiones, las cuales corresponden a gases y partículas contaminantes liberadas a la atmósfera y que pueden ser antropogénicas o naturales como las erupciones volcánicas y el polvo arrastrado por el viento. Otros factores como las condiciones meteorológicas y la topografía juegan un papel importante en la calidad del aire (Molina, 2016). Así la primera influye en el transporte y concentración de contaminantes en un lugar determinado debido por ejemplo a los patrones atmosféricos de los 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 uso y su desarrollo no se ha podido llevar a cabo, 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 los tres principales métodos para cuantificar las concentraciones de contaminantes en un sitio.

2.3.1 Método Pasivo

Es un procedimiento que no utiliza ninguna fuente eléctrica y el aire es captado de forma natural. La captación de muestras se basa en la difusión de los contaminantes hacia la superficie del muestreador y tiene su fundamento en los fenómenos de absorción o adsorción en un sustrato químico, usualmente una membrana impregnada con el agente absorbente, la cual se expone por un tiempo definido al aire en el sitio que se desea muestrear y en la cual se captura el contaminante de interés cuya concentración en el aire es proporcional a la difusión de este por la membrana del muestreador. Así, una vez

recolectada la muestra, se puede realizar la desorción del contaminante en un laboratorio 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 de comisión de errores personales y no ser necesarias actividades de mantenimiento y calibración de bombas de aire, que a su vez hacen de este un método 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, Reinosavalladares, Ordoñez-Sánchez, & Hernández-Garcés, 2017).

2.3.2. Método Activo

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

Existen diferentes tipos de muestreadores activos: los captadores de gases y partículas que funcionan con volúmenes pequeños 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, que suelen usarse para la determinación gravimétrica de partículas en suspensión de tamaños superiores a 0,1 micras, 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 y los cuales operan de manera similar a los otros muestreadores activos, variando el medio colector que para este caso corresponde a un tubo de carbón activado el cual es capaz de captar 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 24 horas (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2010)

2.3.3. Método Automático

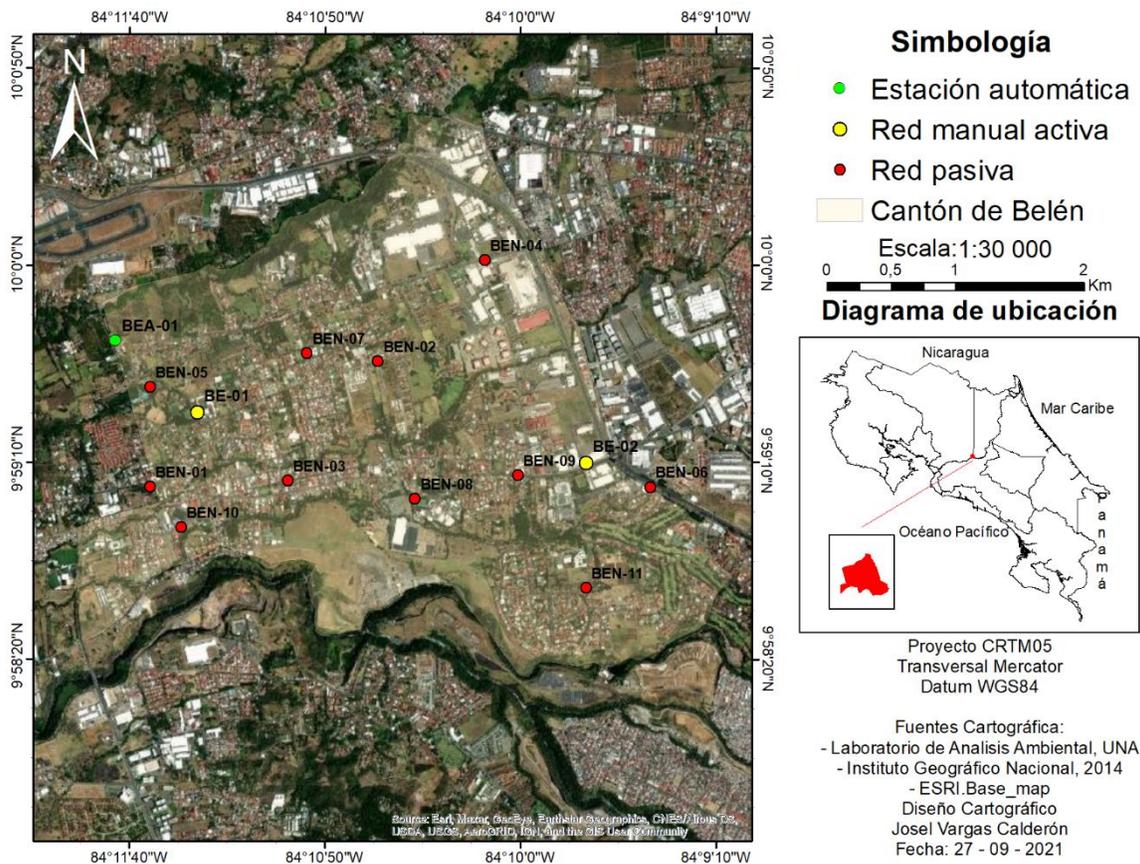
Es el mejor en términos de resolución en sus mediciones ya que las muestras son tomadas y analizadas en tiempo real, permitiendo llevar un monitoreo continuo de concentraciones horarias y menores. Una de las ventajas que presentan estos sistemas es que pueden medir una gran variedad de contaminantes de manera simultánea. Usualmente utilizan 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

3.1. Descripción de Sitios de Muestreo

La labor de monitoreo continuo de la calidad de aire se ejecuta mediante distintos métodos, entre los cuales están el muestreo manual de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ así como el muestreo con tubos captadores mediante difusión pasiva para dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre. La **Figura 1** muestra la distribución espacial de los puntos de muestreo para las redes manual activa y pasiva. Por su parte, los Cuadros 1 y 2 indican los sitios de monitoreo de las redes anteriores presentes en el Cantón de Belén.



Fuente: Elaboración propia

Figura 1. Distribución espacial de los sitios de monitoreo de la red manual activa, pasiva y automática en el cantón de Belén

Cuadro 1. Sitios de muestreo manual activo de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) y automático, Belén

Localización	Sitio de muestreo
La Ribera, Belén	BE-01
EPA, Belén	BE-02
Apartotel Los Sueños	BEA-01

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 2. Sitios de muestreo de la red de contaminantes por difusión pasiva, Belén

Ubicación del sitio	Código	Tipo de sitio	Ubicación del sitio	Código	Tipo de sitio
Frente a Centro Comercial Plaza Belén	BEN-01	Comercial	Centro Pedagógico Belén, frente al Hotel Marriot	BEN-02	Comercial
Costado norte de la Municipalidad de Belén	BEN-03	Comercial	Costado norte de la Firestone	BEN-04	Industrial
Parque Recreativo Ojo de Agua	BEN-05	Comercial	Antiguo Hotel Herradura	BEN-06	Comercial
Frente a iglesia católica de La Ribera	BEN-07	Residencial	Frente al Colegio Técnico Profesional Privado CIT	BEN-08	Residencial
50 m este de la plaza La Asunción	BEN-09	Comercial	Polideportivo Belén	BEN-10	Residencial
Residencial Cariari Rotonda	BEN-11	Residencia			

Fuente: Elaboración propia

En relación con las jornadas de muestreo para el año de referencia, se establece que la frecuencia asociada con la red manual activa corresponde a tres veces por semana contemplando un tiempo de muestreo de (24±1) h. Por su parte, la red de contaminantes por difusión pasiva implica campañas acumuladas en el tiempo requiriéndose como mínimo 21 días de muestreo en los puntos receptores para completar una campaña.

3.1. Métodos de Muestreo

Para la medición de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la red manual de monitoreo se utiliza un muestreador de aire de alto volumen. En este dispositivo un motor ejecuta una succión de aire ambiente a través de la parte superior, el aire atraviesa las boquillas y los tubos de ventilación donde se hace una separación de partículas gruesas. Luego se continúa acarreado a través de la cámara de impactación únicamente las partículas PM_{10} o $PM_{2.5}$ (para este último el cabezal funciona bajo el mismo principio, pero el tamaño de las boquillas y tubos de ventilación son diferentes para asegurar la separación del material con diámetro mayor a $2,5 \mu m$).

Pasada la cámara de impactación, el aire atraviesa transversalmente el filtro, y todas las partículas que vienen arrastradas por él son retenidas en este medio. Finalmente, el aire sale por la parte inferior del motor, y se mezcla nuevamente con el aire ambiente. La Figura 2 muestra un esquema del muestreador de alto volumen donde se señalan sus partes principales detalladas anteriormente. Además, en la Figura 3, se puede observar los equipos de alto volumen ubicados en el cantón de Belén.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Esquema de un medidor de alto volumen



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Muestreadores de alto volumen ubicados en (a) La Ribera y (b) EPA del cantón de Belén

Para la medición de NO_2 y SO_2 en la red pasiva, el laboratorio coordina con la Municipalidad de Belén para la definición de las campañas de muestreo y la colocación de los tubos. En este caso, el procedimiento seguido consiste en que se colocan tubos con mallas tratadas con una mezcla de trietanolamina/acetona para NO_2 y carbonato de sodio para SO_2 que permite la fijación de los contaminantes de interés que entran en el tubo. Los tubos se colocan en campo por 21 días, permitiendo la permeación del NO_2 y SO_2 en las mallas tras lo cual son retirados y transportados al laboratorio para su análisis. La Figura 4 muestra los portatubos ubicados en el cantón de Belén en donde se encuentran los tubos en los cuales se recolectan las muestras de NO_2 y de SO_2 .



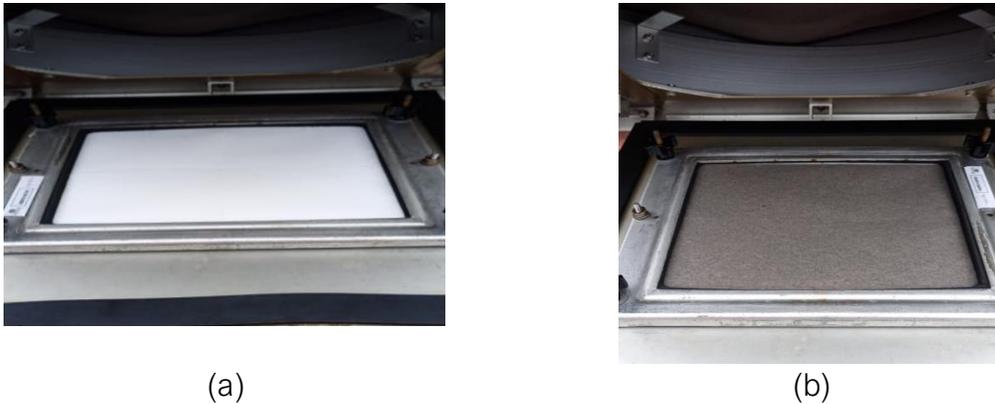
Fuente: Elaboración propia

Figura 4. Porta tubos de muestreo pasivo ubicados en el cantón de Belén

3.2. Métodos de Análisis

Para la determinación de la concentración material particulado, primero se preparan los filtros mediante una etapa de acondicionamiento en una desecadora por 24h para reducir la cantidad de humedad y transcurrido este tiempo se pesan en balanza analítica. Luego los filtros son transportados a campo y colocados en el muestreador de alto volumen operando con un flujo de aire de $(1,13 \pm 10 \%) \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ durante $(24 \pm 1) \text{ h}$.

Transcurrido el tiempo de muestreo, se recolectan los filtros los cuales son transportados al laboratorio donde se vuelven a colocar en una desecadora por 24 h y se pesan en balanza analítica, de modo que por diferencia se conozca la masa colectada en cada uno, y con el volumen de muestreo se estima la concentración de partículas. En la Figura 5 se ejemplifica la ganancia de masa de partículas, donde se puede observar el filtro de muestreo cuándo se coloca en el muestreador de alto volumen y el mismo filtro cuando se retira del equipo.



Fuente: Elaboración propia

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

Para el caso de las muestras de NO_2 pasivo, las mallas se procesan con el reactivo de Griess-Saltzman para analizar la concentración de nitritos por la técnica de espectrofotometría ultravioleta-visible utilizando una longitud de onda de 543 nm. Una vez conocidas las concentraciones de nitritos en las muestras analizadas se utiliza el volumen de reactivo utilizado, el tiempo de muestreo y el coeficiente de difusión del gas para estimar su concentración en el aire.

Para el SO_2 pasivo, las mallas se procesan con una disolución extractora de H_2O_2 y posteriormente se determina la concentración de sulfato mediante cromatografía de iones. Una vez conocida la concentración de sulfato de las muestras, se utiliza esto junto con el volumen de aforo de la muestra, el factor gravimétrico para $\text{SO}_2/\text{SO}_4^{2-}$, el tiempo de muestreo y el coeficiente de difusión del gas para estimar su concentración en el aire.



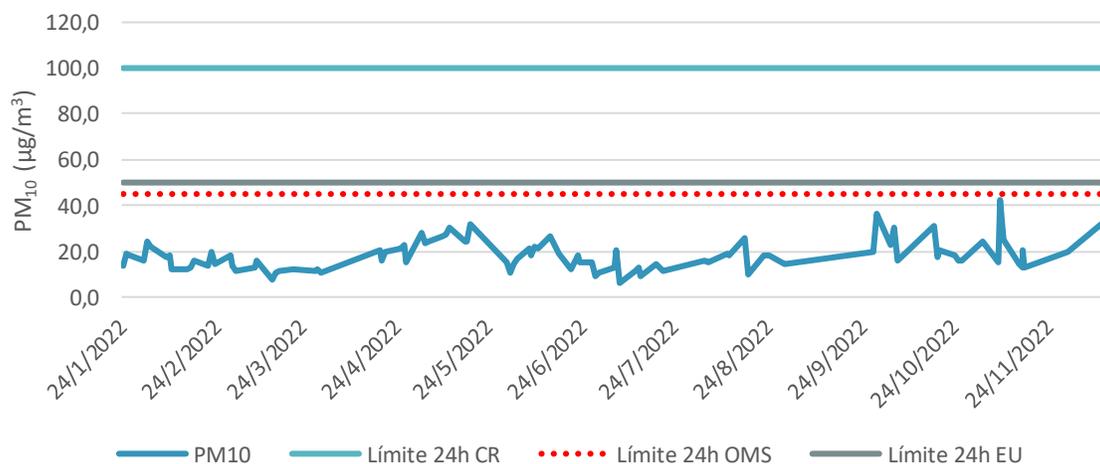
4. Resultados

4.1. Red de Monitoreo Activa: Contaminante PM₁₀ y PM_{2.5}

Como parte del control de la calidad del aire, la Municipalidad de Belén cuenta con dos muestreadores de alto volumen ubicados en La Ribera para la medición de PM₁₀ y otro en La Asunción, ferretería EPA para la medición de PM_{2.5}, ambos midiendo de forma continua a lo largo del año. Los Anexos 1 y 2 muestran los resultados y promedio anual para PM₁₀ y PM_{2.5} respectivamente durante el período 2022.

4.1.1. Análisis de PM₁₀ en La Ribera de Belén

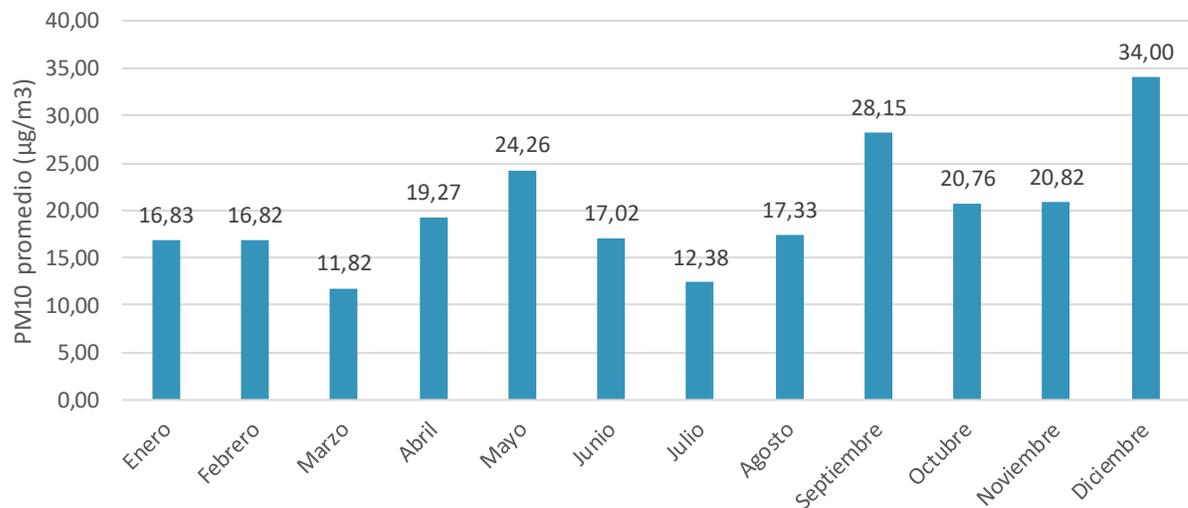
El valor anual promedio del PM₁₀ en el 2022 fue de 19,95 $\mu\text{g m}^{-3}$ siendo inferior a los límites máximos permitidos en Costa Rica y recomendaciones internacionales. Para PM₁₀ todos los días se encuentran por debajo de los límites definidos, tanto por la OMS (45 $\mu\text{g m}^{-3}$), la Unida Europea (50 $\mu\text{g m}^{-3}$) y el decreto el Decreto No. 39951-S (2016) de Costa Rica (100 $\mu\text{g m}^{-3}$). De manera generalizada, no se registró un valor puntual de concentración superior a los 42,4 $\mu\text{g m}^{-3}$ para el 2022 tal y como se muestra en la Figura 6. Lo anterior representa un buen indicativo de la calidad del aire con respecto al PM₁₀ y a su vez una baja exposición diaria a este contaminante por parte de la población que transita por el Belén (Tribunal de Cuentas Europeo, 2018).



Fuente: Elaboración propia

Figura 6. Concentraciones de PM₁₀ según fecha de muestreo para el año 2022 en el sitio ubicado en La Ribera, Belén.

En años anteriores las concentraciones del PM₁₀ han aumentado debido a la influencia del polvo del Sahara principalmente en junio, no obstante, para el 2022 el IMN 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 PM₁₀ aumentó en un 15% (agosto) y 85% (setiembre) con respecto a al mes de julio (ver **Figura 7**). El mes con los valores más altos registrados fue diciembre con valores promedios de 34,0 $\mu\text{g m}^{-3}$ mientras que en marzo (época seca) se registró la menor concentración promedio (11,8 $\mu\text{g m}^{-3}$). De manera específica, los meses con menores concentraciones de PM₁₀ fueron enero, febrero, marzo y julio.



Fuente: Elaboración propia

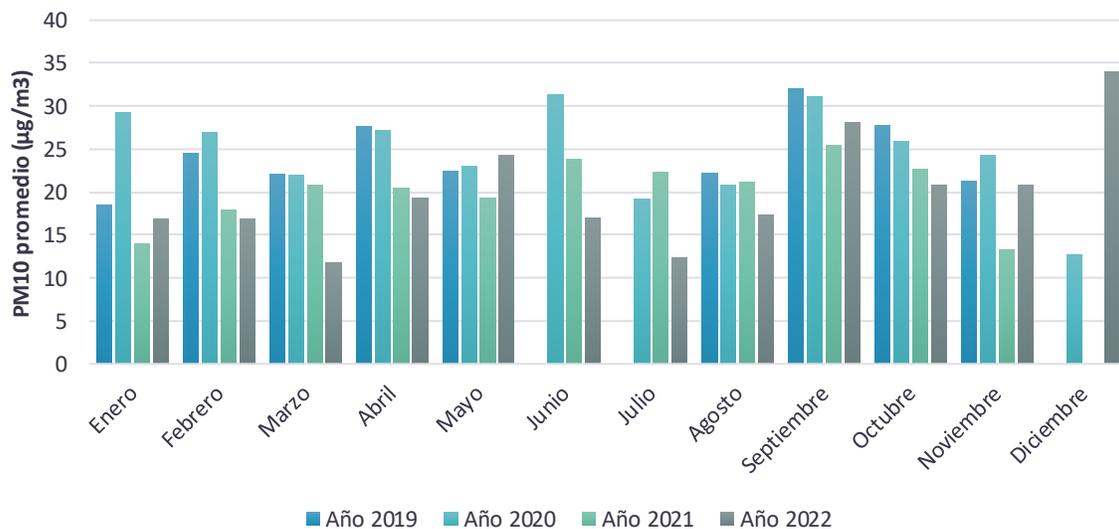
Figura 7. Concentraciones promedio mensuales de PM₁₀ para el año 2022 en el sitio ubicado en La Ribera de Belén

La tendencia de las concentraciones de PM₁₀ a lo largo del año es a levemente creciente; si bien los valores diarios muestran oscilaciones propias de la variabilidad asociada con este tipo de parámetros, la recta de mejor ajuste de los datos corresponde a una línea con una ligera pendiente positiva de 0,0179 que inicia cerca de 18 $\mu\text{g m}^{-3}$ a inicio de año y finaliza cerca de 20 $\mu\text{g m}^{-3}$ hacia final de año, mostrando una tendencia de incremento anual de 2 $\mu\text{g m}^{-3}$ para el año de referencia.

Al analizar el comportamiento histórico de estas partículas en el cantón es importante señalar que el 2022 registra valor más bajo de concentración desde el 2019; mostrando una

reducción de un 18 % con respecto al 2019. La comparación entre estos últimos cuatro años es de interés debido a que por la crisis sanitaria ocasionada por el COVID-19 a nivel mundial, en Costa Rica como medida para evitar la propagación del virus se implementaron restricciones de movilización, siendo el 2020 donde esta medida se implementó de manera más estricta.

Los resultados indican que la reducción o el aumento de la flota vehicular en el punto de la Ribera no es el principal responsable del aumento o disminución de las partículas de PM₁₀. Esto debido a que en la mayoría de los meses no hay diferencias significativas entre el 2019 (previo a las restricciones por COVID-19) y el 2020 (durante las restricciones). La concentración promedio en 2019 fue de 24,26 $\mu\text{g m}^{-3}$ mientras que en 2020 la concentración fue de 24,47 $\mu\text{g m}^{-3}$. En ambos años los mayores picos se registraron en setiembre con valores muy similares de 32 $\mu\text{g m}^{-3}$ y 31 $\mu\text{g m}^{-3}$ respectivamente.



Fuente: Elaboración propia

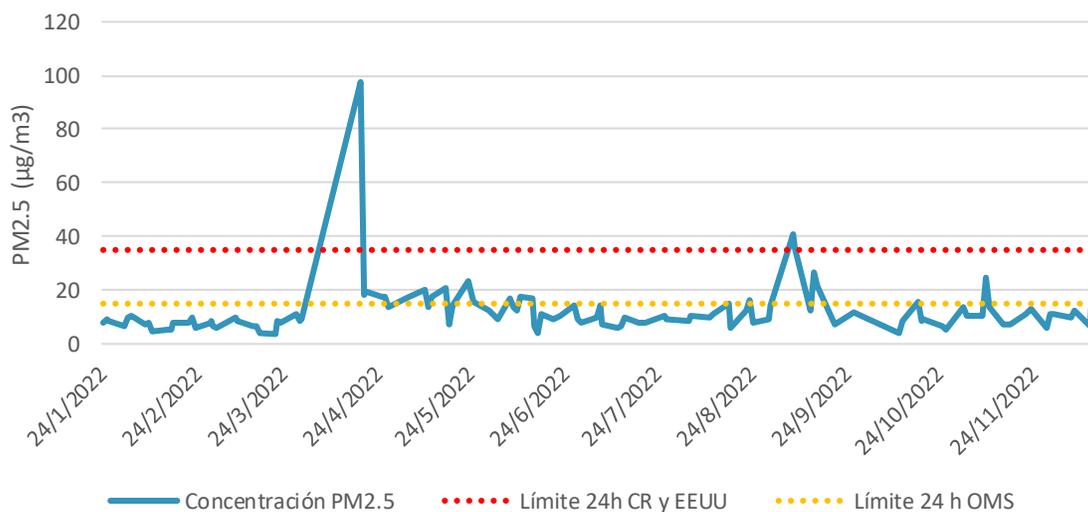
Figura 8. Comparación de las concentraciones promedio mensuales de PM₁₀ entre los años 2019, 2020, 2021 y 2022 en el sitio ubicado en La Ribera de Belén.

Con relación a la comparación 2021-2022 se observa una situación similar ya que el promedio anual de concentración es muy consistente para ambos períodos. Considerando que ya para el 2022 las medidas de restricciones no estaban implementadas, se observa que los niveles de concentración entre 2019 y 2022 son similares con una ligera tendencia

de reducción mensual para el 2022. Lo anterior descrito indica que, si bien los vehículos son una de las fuentes de generación de material particulado, otras fuentes y mecanismos de generación de material particulado intervinieron para la obtención de esas concentraciones presentadas en las series anteriores. Particularmente, el mes de diciembre en 2022 ha sido el registro histórico más alto desde el inicio del monitoreo en 2019 seguido por setiembre de 2021 y junio del 2020. Se aclara que no se cuentan con registros para comparar el comportamiento de diciembre en 2021 y 2019.

4.1.2. Análisis de PM_{2.5} en el sitio ubicado en EPA de Belén

En lo que respecta a las concentraciones de PM_{2.5} en el Anexo 2 y Figura 9 se observa que la mayoría de los días en que se realizó el monitoreo se encuentran por debajo de los 35 $\mu\text{g m}^{-3}$ definidos como límite máximo para concentraciones de PM_{2.5} en 24 horas según el Decreto No. 39951-S (2016). Particularmente, se registraron dos días con concentraciones de PM_{2.5} atípicas en el mes de abril y setiembre. De manera específica, para el 18 de abril se obtuvo una concentración de 97,55 $\mu\text{g m}^{-3}$ lo cual es muy atípico representando una concentración 2,8 veces mayor al umbral anterior (ver Figura 9).



Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Concentraciones de PM_{2.5} acomodadas por fecha para el año 2022 en el sitio ubicado en EPA de Belén

En promedio la concentración de $PM_{2.5}$ durante el 2022 fue de $12,96 \mu\text{g m}^{-3}$ siendo inferior los límites establecidos por decreto en Costa Rica y al límite recomendado por la OMS ($15 \mu\text{g m}^{-3}$) (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2021). No obstante, en 24 de los 365 días del año este límite se superó lo cual advierte de una exposición a la población. Además, es importante resaltar que este monitoreo no es continuo por lo que la proporción de días dada anteriormente puede estar subestimada. Las exposiciones a corto plazo si bien tienen implicaciones, es trascendental dar seguimiento a la exposición prolongada ya que puede desencadenar consecuencias en la salud de las personas (Tribunal de Cuentas Europeo, 2018 & Environmental Protection Agency, 2019b).

Con los resultados obtenidos se señala de manera general que durante el 2022 hubo una baja exposición diaria a este contaminante en cualquiera de los dos escenarios, pero al mismo tiempo evidencia la importancia que tiene considerar no solo los límites adoptados a nivel nacional, sino también realizar comparaciones con las recomendaciones internacionales que pueden poner de manifiesto escenarios más críticos al utilizar límites más estrictos.

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 la estación ubicada en EPA de Belén para el 2022 se adecúa a los descrito por los autores citados, ya que el en el primer trimestre del año que corresponde a meses secos se observan concentraciones promedio mensuales bajas (enero, febrero y marzo). En abril con el inicio de las primeras lluvias se dio un aumento dado principalmente por el dato atípico mencionado anteriormente (ver Figura 10).

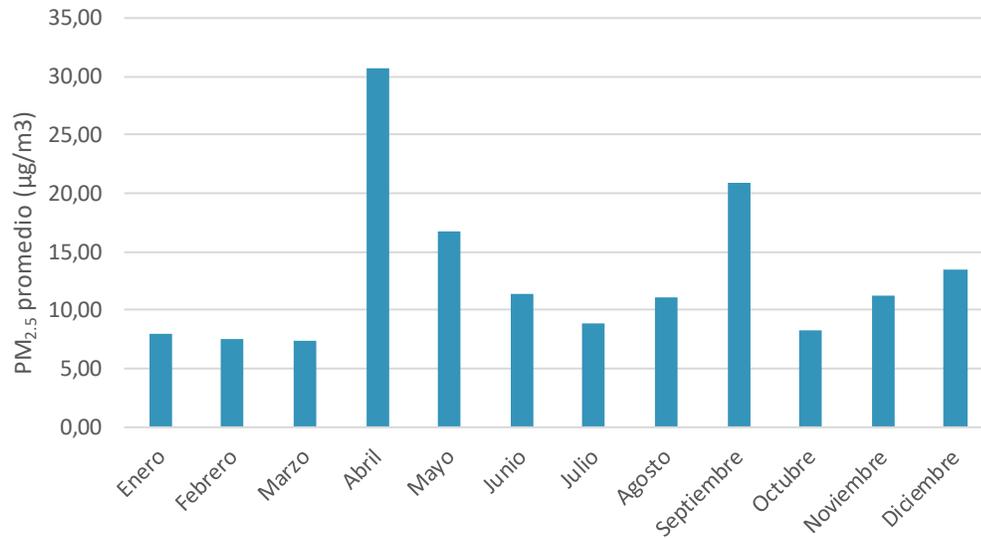


Figura 10. Concentraciones promedio mensuales de PM_{2,5} para el año 2022 en el sitio ubicado en EPA de Belén.

Al analizar el registro histórico mensual y anual, se observa que los valores más altos se registraron en 2020 con concentraciones promedio de 16,23 $\mu\text{g m}^{-3}$ mientras que los más bajo fueron durante el 2021 con promedio de 9,56 $\mu\text{g m}^{-3}$. En 2022 el valor promedio fue de 12,96 $\mu\text{g m}^{-3}$ que es superior en un 35 % al 2021 y un 25 % menos que lo obtenido en 2020 (ver Figura 11). Históricamente los meses de mayor concentración han sido en promedio abril, junio y setiembre con valores entre los 10 $\mu\text{g m}^{-3}$ y 30 $\mu\text{g m}^{-3}$. Al igual que como sucede con PM₁₀, se obtiene que otras fuentes y mecanismos de generación de material particulado intervienen y podrían tener una mayor relevancia en la persistencia de este contaminante primario en la atmósfera.

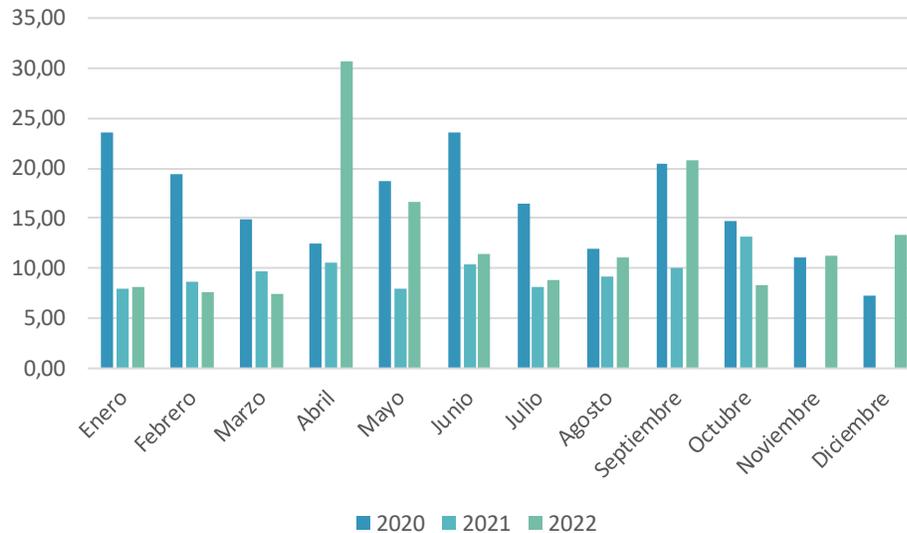


Figura 11. Comparación de las concentraciones promedio mensuales de PM_{2.5} entre los años 2020, 2021 y 2022 en el sitio ubicado en EPA de Belén.

4.2. Red de Monitoreo Pasiva: Contaminante NO₂

El dióxido de nitrógeno es uno de los contaminantes criterio que se monitorea a través de la red pasiva y su emisión se vincula principalmente con los productos de combustión de fuentes móviles. Para la caracterización de la línea base anual de dicho contaminante se realizan tres campañas en tres épocas climáticas características; cada una con una duración de 21 días de exposición.

En el 2021 la OMS actualizó los niveles recomendados sobre la calidad del aire, en donde todos los límites sufrieron modificaciones y se definieron límites más estrictos, sin embargo, también se definieron metas intermedias, las cuales tienen como objetivo lograr que los países que superan los niveles recomendables puedan aplicar medidas de reducción de la contaminación, y así, poco a poco acercarse a los niveles óptimos. Para el NO₂ el límite anual disminuyó hasta 10 µg m³, bajo este escenario ninguno de los puntos de muestreo para el 2022 está por debajo del límite (ver Cuadro 3). Los puntos más cercanos a este límite de la OMS se registraron en la época seca y se ubican cerca del Polideportivo de Belén (13 µg m³), Kimberly Clark (11,2 µg m³) y el Residencial Cariari (12,3 µg m³).

Cuadro 3. Concentración de NO₂ y concentración promedio anual registradas por campaña y sitio de muestreo durante el año 2022.

Sitio	Campaña I	Campaña II	Campaña III	Promedio
	Marzo	Junio	Octubre	
Palacio Municipal	32,00	51,00	43,50	42,17
Plaza Asunción	40,90	38,80	43,80	41,17
Firestone	36,60	39,00	47,50	41,03
Plaza Belén	33,20	41,50	46,40	40,37
Ojo de Agua	28,20	30,90	57,30	38,80
Hotel Herradura	34,50	34,60	38,20	35,77
Centro Pedagógico	18,40	25,00	33,35	25,58
Iglesia de la Ribera	12,40	19,70	31,55	21,22
Polideportivo Belén	13,00	20,80	25,80	19,87
Kimberly Clark	11,20	17,40	19,60	16,07
Residencial Cariari	12,30	15,00	20,60	15,97
Promedio	24,79	30,34	37,05	31,20

Fuente: Elaboración propia

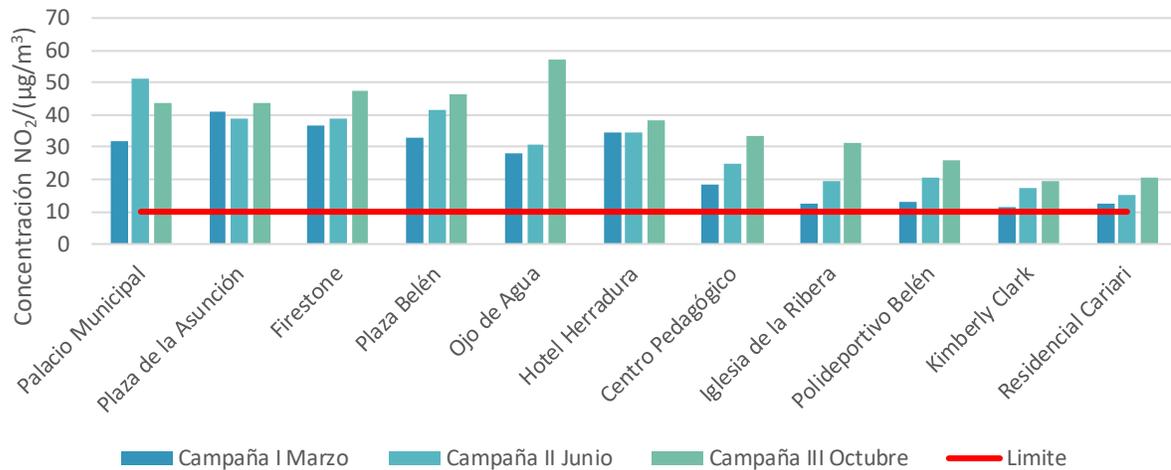
En promedio el valor del contaminante NO₂ fue de 31,20 µg m⁻³ durante 2022, con este resultado el cantón de Belén cumple con la meta intermedia de la OMS número 1 y se encuentra muy cerca de la meta intermedia 2 de la OMS (30 µg m⁻³). Sin embargo, hay sitios con concentraciones más altas que alejan al cantón de esta meta debido a su ubicación en el cantón, la categoría y a la época del año.

Los sitios más críticos en cuanto a contaminación promedio anual de NO₂ son el Palacio Municipal, la Plaza Asunción, Firestone y Plaza Belén los cuales son sitios catalogados en comerciales e industriales. Estos sitios por su concentración (> 40 µg m⁻³) no cumplen ni con la meta intermedia 1 por lo que son necesarias numerosas acciones correctivas para reducir el grado de contaminación de NO₂. Los puntos en Ojo de agua y Hotel Herradura si cumplen con la meta intermedia 1 mientras que los puntos ubicados en el Centro Pedagógico y la Iglesia de la Ribera cumplen con la meta intermedia 2. El resto de punto cumplen con la meta intermedia 3 al presentar en promedio durante el año valores inferiores a los 20 µg m⁻³ (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2021). Estos últimos puntos mencionados son de categoría residencial por lo que es entendible que estos valores sean los más bajos del cantón. Las autoridades de zonas contaminadas pueden utilizar las metas intermedias para elaborar políticas de reducción de la contaminación que pueden cumplirse

en plazos realistas, las metas intermedias deberían considerarse como pasos para lograr en el futuro los niveles óptimos y no como objetivos finales (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2021).

Con respecto a la temporalidad en los niveles de dióxido de nitrógeno, los datos muestran una tendencia creciente en la concentración promedio por campaña: época seca ($24,79 \mu\text{g m}^{-3}$), transición ($30,34 \mu\text{g m}^{-3}$) y lluviosa ($37,05 \mu\text{g m}^{-3}$). Con base en la literatura de referencia, se reporta poca variación estacional para los niveles de óxidos de nitrógeno con respecto a otros contaminantes como el ozono. No obstante, se destaca la mayor concentración en época lluviosa (Dawn, Fei, & Yuan, 2012), tal y como ocurre durante el 2022 en el cantón de Belén.

Una limitación en términos estacionales se asocia con la baja representatividad en la línea base ya que consideran únicamente 3 campañas para el monitoreo anual. Esto sumado a un método acumulativo le resta robustez en la caracterización temporal, por lo que se recomienda mantener un monitoreo mensual durante un corto plazo con el propósito de mejorar la línea base para dicho contaminante. Por otra parte, las concentraciones de este agente químico son mayormente dependientes de las emisiones de fuentes diurnas (Dawn, Fei, & Yuan, 2012), sin embargo, se recomienda correlacionar la variabilidad estacional con variables meteorológicas. De forma integral, se presenta en la Figura 12 el comportamiento respectivo por sitio para las tres campañas anuales del 2022. Se observa cómo ninguno de los sitios cumple con el límite recomendado por la OMS. De igual manera, se evidencia una tendencia de aumento en la concentración para la mayoría de los sitios de muestreo al pasar de la época seca a lluviosa.



Fuente: Elaboración propia

Figura 12. Comparación de la concentración de NO₂ por sitio de muestreo para las campañas del 2022 en el cantón de Belén.

Al analizar las concentraciones de NO₂ según la categoría se obtuvo que los sitios residenciales presentaron las menores concentraciones (18,95 µg m⁻³) seguido por los puntos comerciales (37,79 µg m⁻³). El punto catalogado como industrial cerca de la Firestone presentó los valores más altos de concentración de este contaminante con un promedio de 40,03 µg m⁻³. Como ya se indicó, existe una fuerte dependencia en la emisión de dióxido de nitrógeno con fuentes móviles, aspecto que disminuye en los puntos representativos de zonas residenciales ya que tienden a presentar un menor flujo vehicular. El punto Firestone además de estar influenciado por las industrias que están alrededor también presenta un alto flujo vehicular lo cual explica lo altos niveles reportados.

De manera complementaria se procede con análisis comparativo por sitio de muestreo, para este caso se utiliza la prueba estadística de Tukey considerando como factor los sitios de muestreo, ya que los puntos de muestreo presentan características diferenciadas que influye directamente en los niveles observados. Como parte de los resultados, obtiene un valor-*p* menor al nivel de significancia (0,05), por tanto, se cuenta con suficiente evidencia estadística para establecer que todas las medias de los sitios de muestreo no son iguales.

En el Cuadro 4 se presenta las agrupaciones que difieren estadísticamente a un 95% de confianza. Como parte de los estimadores considerados se muestra el valor medio y la

desviación estándar por sitio ordenados de forma descendente, obteniéndose un rango medio de 26,73 unidades de concentración. Con relación a las comparaciones, se establece que los sitios que no comparten letras en las columnas de agrupaciones difieren significativamente en el nivel medio de concentración.

Cuadro 4. Principales resultados del análisis de Tukey al considerar los puntos de muestreo como factor de agrupación para la concentración de NO₂.

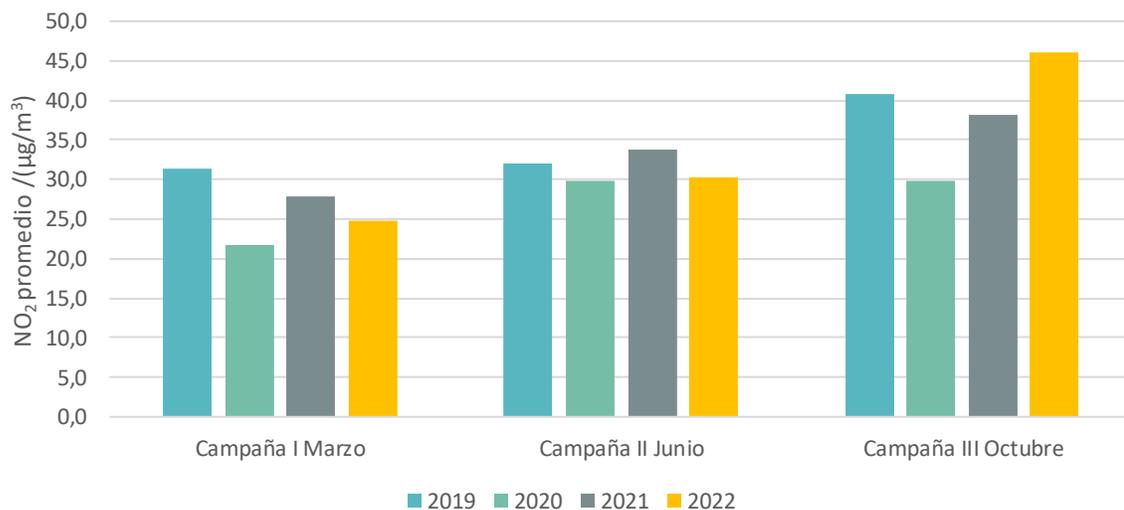
Sitio de Muestreo	Media (µg m ³)	Desviación estándar (µg m ³)	Agrupación
Ojo de Agua	43,43	20,50	A
Firestone	42,65	5,28	A
Palacio Municipal	42,50	7,66	A
Centro Comercial Plaza Belén	41,88	6,41	A
Plaza de la Asunción	41,83	2,23	A
Hotel Herradura	36,38	2,08	AB
Centro Pedagógico Belén	27,53	6,44	AB
Iglesia de la Ribera	23,80	9,61	AB
Polideportivo Belén	21,35	6,20	AB
Residencial Cariari	17,13	3,66	B
Kimberly Clark (CIT)	16,95	4,00	B

Fuente: Elaboración propia

Los resultados muestran diferencias estadísticamente significativas entre los puntos ubicados cerca de Kimberly Clark y El Residencial en la Rotonda de Cariari con respecto a las concentraciones registradas en los puntos en Plaza Asunción, Ojo de Agua, Firestone, Palacio Municipal y el Centro Comercial Plaza Belén (ver Cuadro 5). Estos cinco puntos son los lugares en donde se registran los mayores focos de contaminación por NO₂ dado que tiene una mayor afluencia vehicular y el efecto del desarrollo comercial e industrial en Belén. Por su parte, los otros dos puntos (Kimberly Clark y El Residencial Cariari) se caracterizan más por ser zonas de residencial en donde el efecto de la quema de combustible y otras fuentes de NO₂ es menor.

Con respecto a la variación interanual de la concentración de este contaminante se observa que el año 2022 durante la época lluviosa se obtuvo el mayor valor histórico promedio de concentración de NO₂ (46,1 µg m⁻³). El valor anterior es un 21 % más alto que lo registrado durante el 2021 en la misma época del año y un 43 % más alto que lo registrado en el 2020

durante los inicios de la pandemia por COVID-19. Este comportamiento también sucede para la época seca (marzo) aunque con la diferencia de que el mayor de los registros fue en 2019 con un promedio de $31,5 \mu\text{g m}^{-3}$ el cual supera al 2022 en $6,7 \mu\text{g m}^{-3}$ tal y como se muestra en la Figura 13. A pesar de que durante el 2020 y 2021 se observa una reducción de la concentración de este contaminante, debido a las restricciones vehiculares y la reducción de las actividades industriales y comerciales, ya para el 2022 los niveles de contaminación son iguales a los observados previo a la pandemia por COVID-19 en 2019.

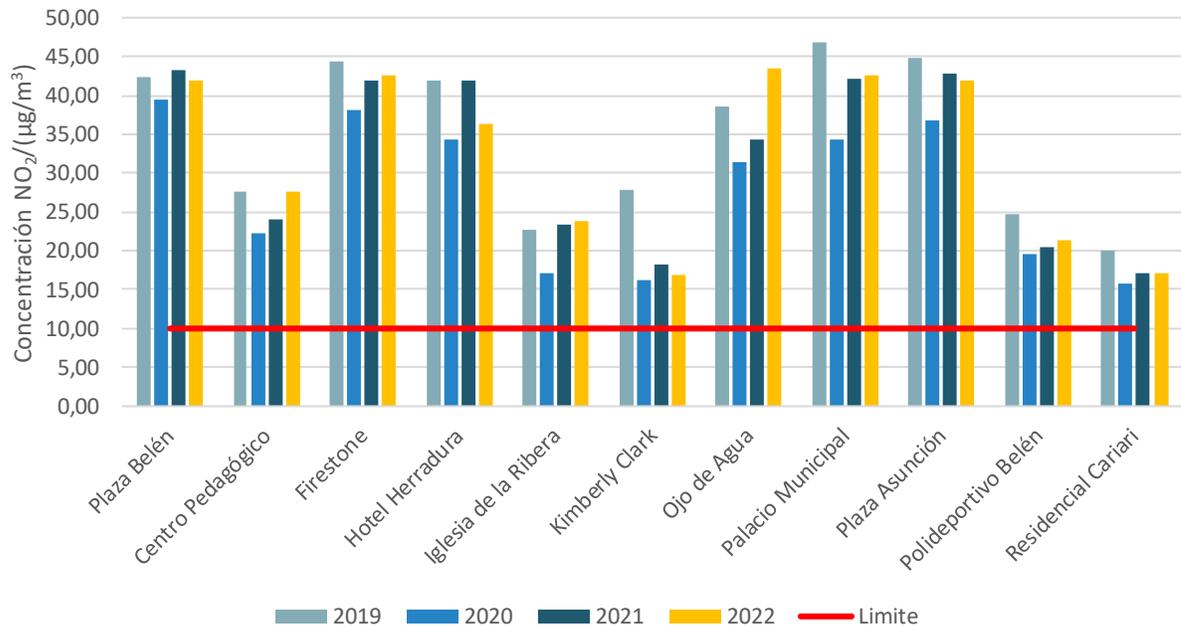


Fuente: Elaboración propia

Figura 13. Comparación de la concentración media de dióxido de nitrógeno por campaña según año de monitoreo

De forma integral, se presenta en la Figura 14 las concentraciones promedio anuales por sitio de muestreo. Se observa cómo en la mayoría de los sitios de muestreo las concentraciones disminuyeron al pasar de 2019 al 2020, cuando se restringió la movilidad, y al pasar del 2020 al 2022 las concentraciones se mantienen o aumentan ligeramente, esto porque las medidas que restringían la movilidad fueron más laxas durante el 2021 y ya para el 2022 prácticamente no existían. La mayoría de los sitios evaluados presentan un aumento en la concentración con respecto al año 2021, sin embargo, algunos puntos mantuvieron la misma concentración que en 2021 y en algunos casos fue menor en 2022. Tal es el caso de los puntos ubicados en la Iglesia de la Ribera, cerca de Kimberly Clark, Residencial Cariari, la Plaza Asunción y el Polideportivo de Belén (ver Figura 14). Esta reducción es muy

ligera, no obstante, denota que en estos espacios la contaminación no mantiene una tendencia siendo constante en el período de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 14. Concentración promedio de dióxido de nitrógeno (en unidades de $\mu\text{g}/\text{m}^3$) por punto de muestreo según año de monitoreo

Con base en investigaciones de referencia, se han reportado reducciones medias superiores a 50% derivado del análisis de datos provenientes de estaciones automáticas para NO_2 (Baldasano, 2021). Desde este punto de vista, se reitera la importancia de un monitoreo más continuo ya que tres campañas para un año de referencia presentan restricciones importantes en el análisis de datos. Asimismo, se enfatiza en la importancia de correlacionar las reducciones obtenidas con variables explicativas como las condiciones meteorológicas y reducción del tráfico vehicular, para cuantificar el aporte según la magnitud del efecto. A pesar de lo anterior, se debe recalcar la importancia de la documentación de este tipo de comportamiento debido a que representan incentivos para la orientación de políticas ambientales que incorporen la calidad del aire como una arista relevante, permitiendo destinar áreas de baja emisión a nivel cantonal y mejorando la movilidad urbana (Baldasano, 2021).

4.3. Red de Monitoreo Pasiva: Contaminante SO₂

Otro contaminante caracterizado mediante la red pasiva es el dióxido de azufre, al igual que el contaminante anterior, se realizaron tres campañas por año con una duración de 21 días cada una. Con respecto, al SO₂ es importante destacar que su emisión se vincula tanto con fuentes biogénicas (actividad volcánica) y antropogénicas (fuentes móviles y actividad industrial principalmente). Los resultados indican que los puntos con mayor grado de contaminación son cerca de la Firestone, el polideportivo de Belén y en Ojo de agua. De estos puntos, el ubicado en la Firestone presenta concentraciones promedio que son cuatro veces mayor al promedio registrado en el cantón mientras que en el Polideportivo es casi del doble tal y como se muestra en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Concentración de SO₂ y concentración promedio anual registradas por campaña y sitio de muestreo durante el año 2022.

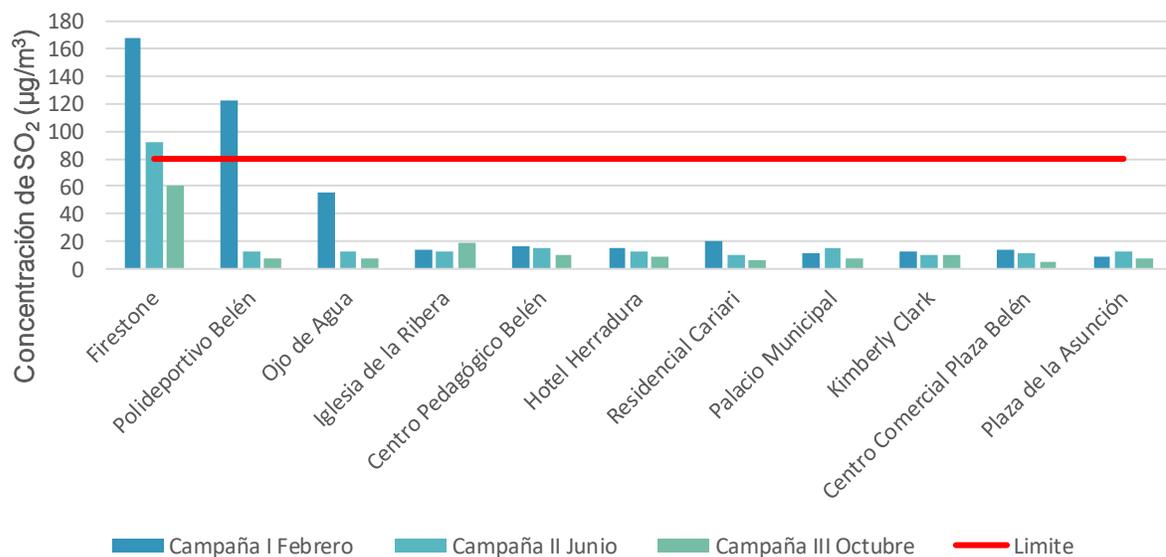
Sitio	Campaña I	Campaña II	Campaña III	Promedio
	Marzo	Junio	Octubre	
Firestone	168,00	91,67	61,10	106,92
Polideportivo Belén	123,00	12,80	7,72	47,84
Ojo de Agua	56,10	12,87	7,17	25,38
Iglesia de la Ribera	13,50	13,12	18,78	15,13
Centro Pedagógico Belén	17,00	14,72	10,08	13,93
Hotel Herradura	15,70	12,82	8,35	12,29
Residencial Cariari	19,80	10,34	5,96	12,03
Palacio Municipal	12,00	14,81	7,56	11,46
Kimberly Clark	12,80	9,93	10,57	11,10
Centro Comercial Plaza Belén	13,50	11,32	5,47	10,10
Plaza de la Asunción	9,40	12,76	7,98	10,05
Promedio	41,89	19,74	13,70	25,11

Fuente: Elaboración propia

La concentración promedio de SO₂ durante el 2022 fue de 25,11 µg m⁻³, no obstante, en durante la época seca las concentraciones son mayores alcanzando valores de 41,89 µg m⁻³, en época de transición (junio) la concentración se reduce a 19,74 µg m⁻³ mientras que los valores más bajos se registran en la época lluviosa (13,70 µg m⁻³). Este efecto de reducción de SO₂ con el ingreso de las lluvias se debe a un proceso llamado "lavado atmosférico" o "depuración atmosférica", que implica la eliminación de contaminantes gaseosos. En este sentido, cuando las gotas de agua capturan partículas de SO₂ presentes en la atmósfera, lo

que provoca que el SO_2 se disuelva en el agua y se transporte hacia la superficie. Además de la eliminación física por parte de las gotas de agua, las lluvias también pueden participar en reacciones químicas con el SO_2 disuelto en el agua, convirtiéndolo en ácido sulfúrico (H_2SO_4). El ácido sulfúrico es un componente del agua de lluvia conocido como "lluvia ácida", proceso que contribuye aún más a la eliminación del SO_2 del aire.

Al tomar como referencia el Reglamento sobre Inmisiones de Contaminantes Atmosféricos (N° 30221-S, actualmente derogado), se tiene como valor de comparación el límite anual de $80 \mu\text{g m}^3$. A partir del umbral anterior, únicamente los puntos ubicados en Firestone y polideportivo de Belén excedieron el límite según se demuestra en el Figura 15. Firestone se caracteriza por ser zona industrial del cantón dónde durante el 2022 hubo una alta actividad, así como un alto flujo vehicular, por este motivo, el congestionamiento fue mayor durante este periodo, aspecto que justifica los niveles observados. Al considerar las concentraciones por punto de muestreo se evidencia un comportamiento más uniforme (a excepción del sitio Firestone), tendencia documentada en investigaciones similares (Bozkurt , Üzmez, Döğeroğlu, Artun, & Gaga, 2018).



Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Comparación de la concentración de SO_2 por sitio de muestreo para las campañas del 2022 en el cantón de Belén

De manera adicional, se procede con análisis comparativo por sitio de muestreo considerando la prueba estadística de Tukey. Al igual que en el caso anterior, la selección de este ANOVA se justifica por la cantidad de datos recolectados y características diferenciadas en los puntos de la red que influye directamente en los niveles observados. Como parte de los resultados, obtiene un valor- p de 0,0068, por tanto, se cuenta con suficiente evidencia estadística para establecer que todas las medias de los sitios de muestreo difieren estadísticamente entre sí en al menos un par de comparación.

En el Cuadro 6 se presenta las agrupaciones que difieren estadísticamente a un 95% de confianza. Como parte de los estimadores considerados se muestra el valor medio y la desviación estándar por sitio ordenados de forma descendente, obteniéndose un rango medio de 13,08 unidades de concentración. Con relación a las comparaciones, se establece que los todos los sitios (a excepción de Polideportivo) presentan diferencias estadísticamente significativas con respecto a los valores obtenidos en Firestone.

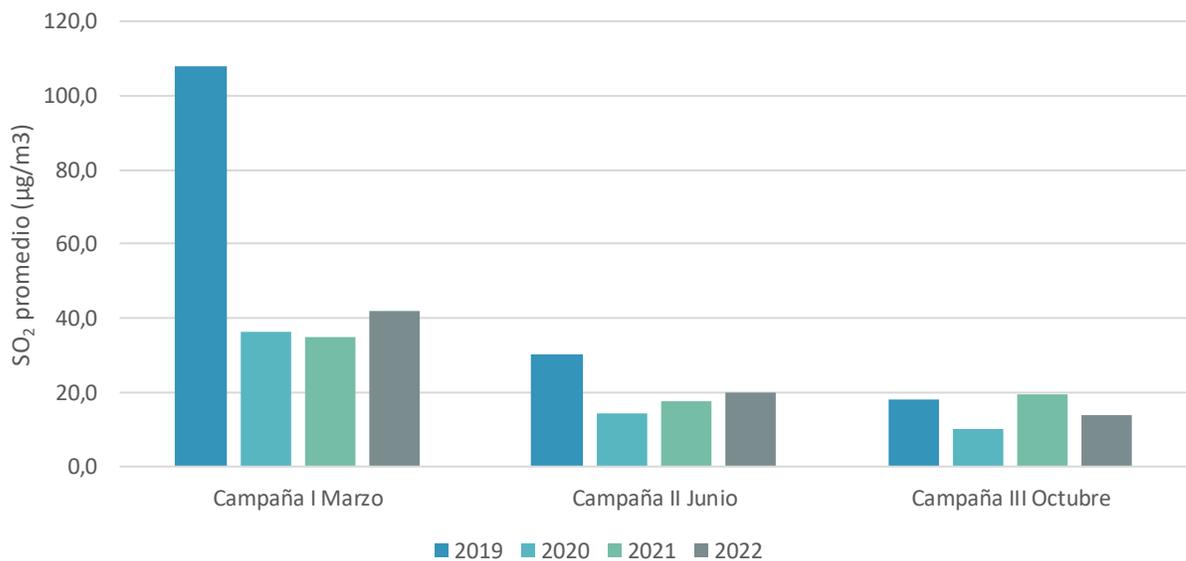
Cuadro 6. Principales resultados del análisis de Tukey al considerar los puntos de muestreo como factor de agrupación para la concentración de SO_2 .

Sitio de Muestreo	Media ($\mu\text{g m}^3$)	Desviación estándar ($\mu\text{g m}^3$)	Agrupación
Firestone	106,92	44,95	A
Polideportivo Belén	47,84	53,19	AB
Ojo de Agua	25,38	21,85	B
Iglesia de la Ribera	15,13	2,58	B
Centro Pedagógico	13,93	2,88	B
Hotel Herradura	12,29	3,02	B
Residencial Cariari	12,03	5,78	B
Palacio Municipal	11,46	2,98	B
Kimberly Clark	11,10	1,23	B
Plaza Belén	10,10	3,39	B
Plaza Asunción	10,05	2,00	B

Fuente: Elaboración propia

Por último, se realiza un comparativo de las campañas 2019, 2020, 2021 y 2022 con el propósito de determinar el impacto en los niveles de los contaminantes ante la aplicación y retiro de las restricciones sanitarias como se ilustra en la Figura 16. Se observa como para todas las campañas se obtiene una disminución en la concentración media de SO_2 al pasar

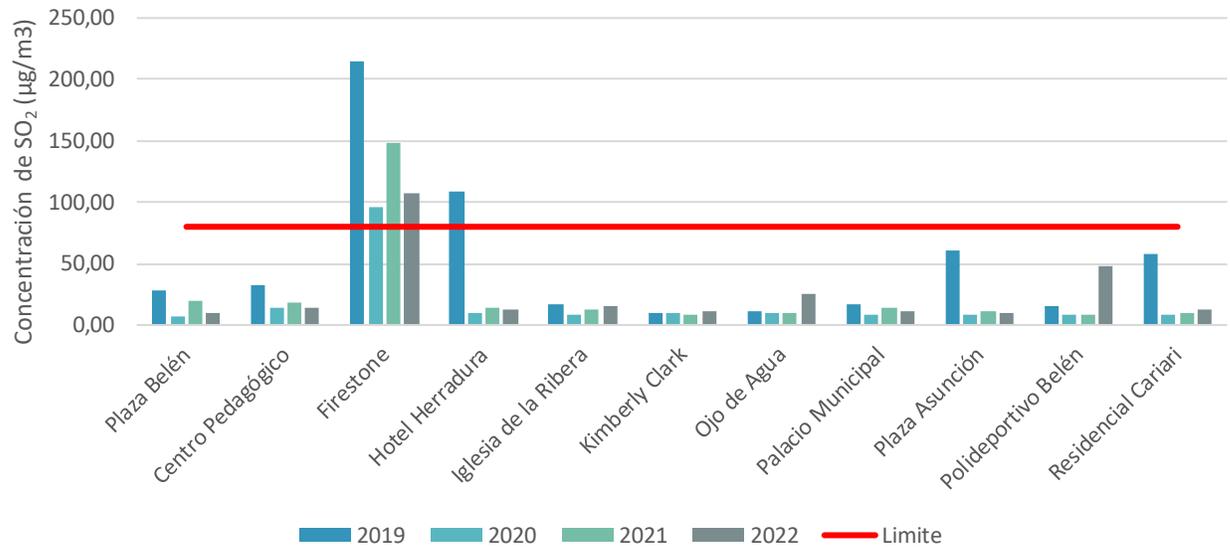
del 2019 al 2020. Contrario a los niveles de NO_2 , para el 2022 las concentraciones de SO_2 se mantienen muy similares a los observado durante la pandemia tanto en época seca como lluviosa. Si bien existe un aumento durante la época seca y la de transición del 2022 con respecto al 2020 y 2021, este es muy baja. Al comparar el 2022 con 2019 si se observan diferencias principalmente en marzo; con una reducción de la concentración de 2019 con respecto al 2022 es de 60 % mientras que para la época de transición y lluviosa la reducción es de un 35 y 25 % respectivamente.



Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Comparación de la concentración media de dióxido de azufre por campaña según año de monitoreo.

Históricamente, el sitio ubicado en la Firestone ha presentado los valores de concentración de SO_2 más altos con una variación entre $95,53 \mu\text{g m}^{-3}$ y $214,66 \mu\text{g m}^{-3}$. El resto de los sitios han presentado un comportamiento constante con algunos picos de contaminación en ciertos años. Por ejemplo, en 2019 los puntos de Hotel Herradura, Plaza Asunción y Residencial Cariari presentaron altas concentraciones, así como el polideportivo de Belén en el 2022. Es importante señalar que la presencia de este contaminante en el cantón no depende únicamente de los vehículos y que existen otras fuentes que intervienen y podrían tener una mayor relevancia, un monitoreo constante permitiría conocer más sobre las fuentes de emisión y así poder caracterizarlas de mejor manera.



Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Concentración promedio de dióxido de azufre (en unidades de µg/m³) por punto de muestreo según año de monitoreo.



5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- El valor anual promedio del PM_{10} en el 2022 fue de $19,95 \mu\text{g m}^{-3}$ siendo inferior a los límites máximos permitidos en Costa Rica y umbrales internacionales. Para PM_{10} todos los días se encuentran por debajo de los límites definidos, tanto por la OMS ($45 \mu\text{g m}^{-3}$), la Unión Europea ($50 \mu\text{g m}^{-3}$) y el decreto el Decreto No. 39951-S (2016) de Costa Rica ($100 \mu\text{g m}^{-3}$).
- La concentración media anual de las $PM_{2,5}$ durante el 2022 fue de $12,96 \mu\text{g m}^{-3}$ siendo inferior los límites establecidos por decreto en Costa Rica y al límite recomendado por la OMS que fija su valor en $\mu\text{g m}^{-3}$. Se documentaron 24 días en que se superó el límite determinado por la OMS y dos días en que se superó el límite establecido por decreto en Costa Rica.
- Las concentraciones más altas tanto de PM_{10} como de $PM_{2,5}$ ocurren en meses caracterizados por pertenecer a la época lluviosa (agosto, setiembre) mientras que en la época seca se registran los valores más bajos. Aspecto que podría estar influenciado por eventos del polvo del Sahara en esos meses según reportes del IMN.
- Con los nuevos límites declarados por la OMS en setiembre del 2021 todos los sitios de muestreo para el 2022 en su concentración media anual de NO_2 superan el límite de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sitios como Plaza Belén, Palacio Municipal, Firestone y Plaza La Asunción no cumplen ni con la primera meta intermedia, la cuál es la más permisiva de todas.
- Las concentraciones de NO_2 son más altas durante la época lluviosa con promedios de $37,05 \mu\text{g m}^{-3}$ mientras que en la época seca las concentraciones son menores ($24,79 \mu\text{g m}^{-3}$). La concentración promedio anual de este contaminante en el 2022 fue de $31,20 \mu\text{g m}^{-3}$.
- La concentración promedio de SO_2 en 2022 en el cantón es de $25,11 \mu\text{g m}^{-3}$, siendo el punto de la Firestone ($106,92 \mu\text{g m}^{-3}$) el de mayor contaminación con valores que superan el límite máximo establecido por la OMS ($80 \mu\text{g m}^{-3}$). Durante la época seca, la severidad de la concentración de este contaminante aumenta en todos los puntos de muestreo mientras que para la época lluviosa las concentraciones disminuyen asociado a procesos de arrastre.

- Los sitios categorizados como residenciales muestran una menor concentración tanto de NO_2 como de SO_2 mientras que los puntos en sitios comerciales e industriales como la Firestone presentan una mayor contaminación por estos contaminantes en el cantón de Belén.

5.2. Recomendaciones

- Incrementar la cantidad de sitios de muestro de la red manual activa que considere como insumo la entrada y salida de vientos al cantón para caracterizar la ganancia o no que se pueda tener en términos de material particulado.
- Aumentar la resolución temporal de la red pasiva en el corto plazo (5 años) con la finalidad de robustecer la línea base de dichos contaminantes para mejorar la cuantificación en términos de precisión para los cambios en los patrones observados.
- Ampliar el esquema de agentes químicos en la red pasiva tales como ozono y compuestos orgánicos volátiles totales con el objetivo de mejorar la caracterización de la calidad del aire a nivel cantonal. La inclusión de estos agentes químicos se relaciona con fuentes móviles y procesos químicos en términos de emisión.
- Documentar 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.
- Instalar estaciones meteorológicas o recopilar los datos correspondientes de estaciones funcionales del IMN en sitios cercanos a los ya establecidos y sitios claves, que permitan coleccionar información sobre estas variables, mismas que puede servir de insumo para el desarrollo de las correlaciones con los parámetros de calidad del aire.
- Incluir un punto de muestreo en ambas redes que tenga la función de referencia o fondo con el propósito de estimar los incrementos móviles en el tiempo a partir de sitios con una menor influencia de fuentes de contaminación.
- Incorporar un estudio de dispersión de contaminantes para los compuestos trazadores odoríferos con el objetivo de caracterizar los niveles en las fuentes emisoras y correlacionarlos con los observados en los puntos de inmisión o receptores.



6. Bibliografía

- AirNow. (2016). *Air Quality Index Basics*. Recuperado el 17 de agosto de 2021, de AirNow: <https://www.airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi>
- Arciniégas, C. (2012). *Diagnóstico y control de material particulado, partículas suspendidas totales y fracción respirable PM10*.
- Baldasano, J. M. (2021). COVID-19 lockdown effects on air quality by NO₂ in the cities of Barcelona. *Science of the Total Environment*, 1-10.
- Bonardi, J.-P., Gallea, Q., Kalanoski, D., Lalive, R., Madhok, R., Noack, F., . . . Sonno, T. (2021). Saving the world from your couch: the heterogeneous medium-run benefits of COVID-19 lockdowns on air pollution. *Environ. Res. Lett.*
- Bozkurt, Z., Üzmez, Ö. Ö., Döğeroğlu, T., Artun, G., & Gaga, E. O. (2018). Atmospheric concentrations of SO₂, NO₂, ozone and VOCs in Düzce, Turkey using passive air samplers: Sources, spatial and seasonal variations and health risk estimation. *Atmospheric Pollution Research*, 1146-1156.
- Canciano-Fernández, J., Reinosá-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-contaminación-atmosferica.html>
- CEPAL. (2003). *Contaminación atmosférica y conciencia ciudadana*. Obtenido de Repositorio Digital Comisión Económica para América Latina y el Caribe: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/2351/1/S02121026_es.pdf
- CEPIS, OPS y OMS. (1999). *Monitoreo de la Calidad del Aire en América Latina*. Obtenido de Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/238739661_MONITOREO_DE_LA_CALIDAD_DEL_AIRE_EN_AMERICA_LATINA
- Cichowicz, R., & Stelegowski, A. (2019). Hourly Profiles of Air Pollution Variation in Selected Cities, Towns and Villages in Poland. *E3S Web of Conferences*.

- 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>
- Dawn, R., Fei, S., & Yuan, G. (2012). Seasonal characteristics of ambient nitrogen oxides and ground-level ozone in metropolitan northeastern New Jersey. *Atmospheric Pollution Research*, 247-257.
- Decreto Ejecutivo N° 39951-S. (2016). Reglamento de Calidad del Aire para Contaminantes Criterio. *Diario Oficial La Gaceta*, 209(239).
- Donzelli, G., Cioni, L., Cancellieri, M., Llopis-Morales, A., & Morales-Suárez-Varela, M. (2021). Air Quality during Covid-19 Lockdown. *Encyclopedia*, 520-526.
- 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. (2018b). *Health and environmental effects of particulate matter (PM)*. Recuperado el 17 de agosto de 2021, de EPA: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>
- 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>
- Environmental Protection Agency. (2019b). *What are the air quality standards for PM*. Recuperado el 25 de agosto de 2021, de Environmental Protection Agency: <https://www3.epa.gov/region1/airquality/pm-aq-standards.html>
- European Environment Agency. (2017). *Air Quality in Europe - 2017 Report*. Luxembourg: Publication Office of the European Union.
- 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*.
- Kendrick, C., Koonce, P., & George, L. (2015). Diurnal and seasonal variations of NO, NO₂ and PM_{2.5} mass as a function of traffic volumes alongside an urban arterial. *Atmospheric Environment*.
- Ley N° 5395. (1974). Ley General de Salud. *Diario Oficial La Gaceta*, 222.
- Lovett, G., Burns, D., Driscoll, C., Jenkins, J., Mitchell, M., Rustad, L., . . . Haeuber, R. (2007). Who needs environmental monitoring? *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(5), 253-260.
- Mena, M. (19 de Agosto de 2022). *El Observador*.
- Mercado-Maldonado, A., & Ruiz-González, A. (2006). El concepto de las crisis ambientales en los teóricos de la sociedad del riesgo. *Espacios Públicos*, 9(18), 194-213.
- Ministerio de Ambiente. (2009). Armonización de redes de monitoreo de calidad de aire. Perú. Recuperado el 2021, de <https://sinia.minam.gob.pe> › download › file › fid
- Ministerio de Salud. (2020). *A partir del 1° de junio Costa Rica inicia su fase 3 de medidas sanitarias*. Obtenido de Ministerio de Salud Centro de prensa : <https://www.ministeriodesalud.go.cr/index.php/centro-de-prensa/noticias/741-noticias-2020/1688-a-partir-del-1-de-junio-costa-rica-inicia-su-fase-3-de-medidas-sanitarias>
- 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>
- Montenegro, E., & Luján, M. (2018). Análisis de la variación estacional de la contaminación atmosférica y su relación con variables climáticas en el valle central de Cochabamba, Bolivia. *Revista Acta Nova*, 8(3), 451-466.
- Murillo, J., & Herrera, J. (2020). Evolución del monitoreo de la calidad del aire en Costa Rica. *AMBIENTICO*, 11-15.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: partículas en suspensión (PM_{2.5} y PM₁₀), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono*. Ginebra.

- 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
- OVSICORI-UNA. (2019). *Boletín anual del Programa de Vigilancia Volcánica*. Heredia: OVSICORI-UNA.
- OVSICORI-UNA. (2020). *Boletín anual del Programa de Vigilancia Volcánica* . Heredia: OVSICORI-UNA.
- 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.
- Palacios Anzules, Í. d., & Moreno Castro, D. W. (2022). Contaminación ambiental. *RECIMUNDO*, 6(2), 93-103.
- Romeu-Álvarez, B., Quintero-Álvarez, H., Larrea-Murrell, J., Lugo-Moya, D., Rojas-Hernández, N., & Heydrich-Pérez, M. (2015). Experiencias en el monitoreo ambiental: contaminación de ecosistemas dulceacuícolas de La Habana (Cuba). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 1325-1335.
- Ruiz, J., Millán, M., & Murguía, B. (2010). Folleto sobre seguridad y uso del amoníaco. *Revista Electrónica de Veterinaria*, 11(3B). Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/636/63613140046.pdf>
- Sbarato, D., & Sbarato, V. (2015). *Contaminación del aire*. Buenos Aire: Editorial Brujas.
- Secretaría del Medio Ambiente. (2017). *Informe de Gobierno*. Ciudad de México.
- Skiba, Y., & Parra-Guevara, D. (2011). *Introducción a los métodos de dispersión y control de contaminantes*. México: Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial.
- Tribunal de Cuentas Europeo. (2018). *Contaminación atmosférica: nuestra salud no tiene todavía la suficiente protección*. Recuperado el 25 de agosto de 2021, de Tribunal de Cuentas Europeo: <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/air-quality-23-2018/es/>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Air Quality Criteria for Carbon Monoxide*. Washington: National Center for Environmental Assessment.
- UNA, MINAE, MS, MOPT & MSJ. (2016). *Sexto Informe de Calidad del Aire del Área Metropolitana de Costa Rica 2013-2015*. Heredia.
- UNEP. (2017). *Hacia un planeta sin contaminación*. Obtenido de United Nations Office Nairobi: <https://papersmart.unon.org/resolution/uploads/k1708350s.pdf>

- Vargas-Marcos, F. (2005). La Contaminación Ambiental como Factor Determinante de la Salud. *Revista Española de Salud Pública*, 117-127.
- Wark, K., & Warner, C. (2017). *Contaminación del Aire, Origen y Control*. Ciudad de México: Limusa Noriega Editores.
- WHO. (2006). *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. Geneva: WHO.



7. Anexos

Anexo 1. Concentración de partículas PM₁₀ y concentración promedio anual registradas en el sitio de muestreo ubicado en La Ribera de Belén durante el año 2022.

Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor
24/1/2022	13,7	16/3/2022	11,0	1/6/2022	14,6	20/7/2022	11,3	2/11/2022	24,4
25/1/2022	19,3	21/3/2022	11,8	2/6/2022	16,7	3/8/2022	16,1	7/11/2022	15,2
26/1/2022	18,2	28/3/2022	11,1	6/6/2022	20,9	4/8/2022	15,5	8/11/2022	42,4
31/1/2022	16,1	29/3/2022	12,2	7/6/2022	18,1	10/8/2022	18,8	9/11/2022	25,2
1/2/2022	24,5	30/3/2022	10,9	8/6/2022	21,7	11/8/2022	18,1	14/11/2022	14,7
2/2/2022	22,1	18/4/2022	20,6	9/6/2022	21,2	16/8/2022	25,6	15/11/2022	12,9
7/2/2022	17,5	19/4/2022	16,2	13/6/2022	26,2	17/8/2022	10,2	16/11/2022	12,7
8/2/2022	18,0	20/4/2022	19,5	16/6/2022	18,6	22/8/2022	17,9	15/11/2022	20,4
9/2/2022	11,9	25/4/2022	21,0	20/6/2022	12,4	23/8/2022	18,3	30/11/2022	19,5
14/2/2022	12,0	26/4/2022	23,0	22/6/2022	18,0	24/8/2022	18,3	13/12/2022	34,0
15/2/2022	13,0	27/4/2022	15,3	23/6/2022	15,4	29/8/2022	14,5		
16/2/2022	16,2	2/5/2022	28,3	27/6/2022	14,8	27/9/2022	19,9		
21/2/2022	13,9	3/5/2022	23,7	28/6/2022	9,3	28/9/2022	36,4		
22/2/2022	20,0	4/5/2022	24,4	29/6/2022	10,4	3/10/2022	22,8		
23/2/2022	14,7	9/5/2022	26,4	4/7/2022	12,5	4/10/2022	30,2		
28/2/2022	18,0	10/5/2022	26,9	5/7/2022	20,8	5/10/2022	16,0		
1/3/2022	13,9	11/5/2022	30,6	6/7/2022	6,1	17/10/2022	30,7		
2/3/2022	11,6	16/5/2022	24,2	11/7/2022	11,3	18/10/2022	17,7		
8/3/2022	13,2	17/5/2022	24,1	12/7/2022	13,2	19/10/2022	20,4		
9/3/2022	15,7	18/5/2022	32,0	13/7/2022	8,7	24/10/2022	17,8		
14/3/2022	7,9	30/5/2022	15,4	18/7/2022	14,6	25/10/2022	15,6		
15/3/2022	10,7	31/5/2022	10,9	19/7/2022	12,9	26/10/2022	15,6		

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2. Concentración de partículas PM_{2.5} y concentración promedio anual registradas en el sitio de muestreo ubicado en EPA de Belén durante el año 2022.

Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor	Fecha	Valor
24/1/2022	7,98	16/3/2022	3,79	30/5/2022	12,49	20/7/2022	7,68	12/10/2022	8,65
25/1/2022	9,15	21/3/2022	3,68	2/6/2022	9,24	26/7/2022	10,43	17/10/2022	15,63
26/1/2022	8,41	22/3/2022	8,58	6/6/2022	17,13	27/7/2022	9,39	18/10/2022	8,52
31/1/2022	6,71	23/3/2022	8,09	7/6/2022	13,42	3/8/2022	8,77	19/10/2022	9,47
1/2/2022	10,13	28/3/2022	10,92	8/6/2022	12,26	4/8/2022	10,47	25/10/2022	6,92
2/2/2022	10,77	29/3/2022	8,59	9/6/2022	17,49	10/8/2022	9,71	26/10/2022	5,01
7/2/2022	6,93	30/3/2022	9,14	13/6/2022	16,73	11/8/2022	11,38	1/11/2022	13,4
8/2/2022	7,73	18/4/2022	97,55	14/6/2022	6,3	16/8/2022	15,28	2/11/2022	10,38
9/2/2022	4,47	19/4/2022	18,25	15/6/2022	3,78	17/8/2022	5,9	7/11/2022	10,33
14/2/2022	5,02	20/4/2022	19,67	16/6/2022	11,37	22/8/2022	12,57	8/11/2022	24,81
15/2/2022	5,26	25/4/2022	17,46	20/6/2022	9,49	23/8/2022	16	9/11/2022	13,44
16/2/2022	8,21	26/4/2022	17,7	22/6/2022	10,52	24/8/2022	7,71	14/11/2022	7,31
21/2/2022	7,95	27/4/2022	13,89	27/6/2022	14,6	29/8/2022	9,44	15/11/2022	6,98
22/2/2022	9,62	4/5/2022	17,42	28/6/2022	8,95	30/8/2022	14,52	16/11/2022	7,17
23/2/2022	5,71	9/5/2022	20,2	29/6/2022	8,13	6/9/2022	40,69	21/11/2022	10,83
28/2/2022	8,01	10/5/2022	13,96	4/7/2022	9,57	7/9/2022	35,73	23/11/2022	12,99
1/3/2022	6,4	11/5/2022	17,75	5/7/2022	14,25	12/9/2022	12,69	28/11/2022	6,16
2/3/2022	5,75	16/5/2022	20,85	6/7/2022	7,37	13/9/2022	26,78	29/11/2022	11,28
28/2/2022	8,44	17/5/2022	7,2	11/7/2022	5,9	14/9/2022	21,19	30/11/2022	10,82
8/3/2022	9,56	18/5/2022	14,37	12/7/2022	6,85	20/9/2022	7,05	6/12/2022	9,85
9/3/2022	8,36	23/5/2022	23,15	13/7/2022	9,79	26/9/2022	11,51	7/12/2022	12,26
14/3/2022	6,44	24/5/2022	20,51	18/7/2022	7,82	27/9/2022	11,15	12/12/2022	6,41
15/3/2022	6,33	25/5/2022	15,96	19/7/2022	8,08	11/10/2022	4,25	13/12/2022	25,14

Fuente: Elaboración propia.