



## INFORME INTEGRAL DE ACTUALIZACIÓN 2021

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

Junio, 2022

Heredia, Costa Rica

## Grupo Técnico Encargado de la Elaboración del Informe

MS.c Víctor Hugo Beita Guerrero  
Laboratorio de Análisis Ambiental  
Universidad Nacional

MS.c. José Félix rojas Marín  
Laboratorio de Análisis Ambiental  
Universidad Nacional

Ing. Minor Vargas Rojas  
Laboratorio de Análisis Ambiental  
Universidad Nacional

Ing. Tomás Soto Murillo  
Laboratorio de Análisis Ambiental  
Universidad Nacional

Lic. David Chaves Núñez  
Laboratorio de Análisis Ambiental  
Universidad Nacional

Bach. Ignacio Sánchez Monge  
Laboratorio de Análisis Ambiental  
Universidad Nacional

Bach. Donald Valencia Fontana  
Laboratorio de Análisis Ambiental  
Universidad Nacional

## Índice General

	1
Índice General	2
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	27
4.1. Red de Monitoreo Activa: Contaminante PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub>	28
4.1.1. Análisis de PM <sub>10</sub> en La Ribera de Belén	28
4.1.2. Análisis de PM <sub>2.5</sub> en el sitio ubicado en EPA de Belén	32
4.2. Red de Monitoreo Pasiva: Contaminante NO <sub>2</sub>	36
4.3. Red de Monitoreo Pasiva: Contaminante SO <sub>2</sub>	43
5. Conclusiones y recomendaciones	50
5.1. Conclusiones	51
5.2. Recomendaciones	52
6. Bibliografía	53
7. Anexos	53

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Distribución espacial de los sitios de monitoreo de la red manual activa, pasiva y automática en el cantón de Belén.....	19
<b>Figura 2.</b> Esquema de un medidor de alto volumen.....	21
<b>Figura 3.</b> Muestreadores de alto volumen ubicados en (a) La Ribera y (b) EPA del cantón de Belén .....	22
<b>Figura 4.</b> Portatubos de muestreo pasivo ubicados en el cantón de Belén.....	23
<b>Figura 5.</b> Filtro colector de material particulado (a) antes del muestreo y (b) después de 24 horas. ....	24
<b>Figura 6.</b> Concentraciones de PM <sub>10</sub> según fecha de muestreo para el año 2021 en el sitio ubicado en La Ribera, Belén. ....	28
<b>Figura 7.</b> Concentraciones promedio mensuales de PM <sub>10</sub> para el año 2021 en el sitio ubicado en La Ribera de Belén. ....	31
<b>Figura 8.</b> Comparación de las concentraciones promedio mensuales de PM <sub>10</sub> entre los años 2019, 2020 y 2021 en el sitio ubicado en La Ribera de Belén. ....	31
<b>Figura 9.</b> Concentraciones de PM <sub>2.5</sub> acomodadas por fecha para el año 2021 en el sitio ubicado en EPA de Belén. ....	33
<b>Figura 10.</b> Concentraciones promedio mensuales de PM <sub>2.5</sub> para el año 2021 en el sitio ubicado en EPA de Belén. ....	34
<b>Figura 11.</b> Comparación de las concentraciones promedio mensuales de PM <sub>2.5</sub> entre los años 2020 y 2021 en el sitio ubicado en EPA de Belén. ....	35
<b>Figura 12.</b> Comparación de la concentración de NO <sub>2</sub> por sitio de muestreo para las campañas del 2021 en el cantón de Belén.....	38
<b>Figura 13.</b> Comparación de la concentración media de dióxido de nitrógeno por campaña según año de monitoreo.....	41
<b>Figura 14.</b> Concentración promedio de dióxido de nitrógeno (en unidades de µg/m <sup>3</sup> ) por punto de muestreo según año de monitoreo .....	42
<b>Figura 15.</b> Comparación de la concentración de SO <sub>2</sub> por sitio de muestreo para las campañas del 2021 en el cantón de Belén.....	45
<b>Figura 16.</b> Comparación de la concentración media de dióxido de nitrógeno por campaña según año de monitoreo.....	48
<b>Figura 17.</b> Concentración promedio de dióxido de nitrógeno (en unidades de µg/m <sup>3</sup> ) por punto de muestreo según año de monitoreo .....	49

## Índice de Cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Sitios de muestreo manual activo de material particulado ( $PM_{10}$ y $PM_{2.5}$ ) y automático en el Cantón de Belén de Costa Rica.....	20
<b>Cuadro 2.</b> Sitios de muestreo de la red pasiva de Belén.....	20
<b>Cuadro 3.</b> Principales características de los módulos que integran la red automática de monitoreo. ....	25
<b>Cuadro 4.</b> Concentración de $NO_2$ y concentración promedio anual registradas por campaña y sitio de muestreo durante el año 2021.....	37
<b>Cuadro 5.</b> Principales resultados del análisis de Tukey al considerar los puntos de muestreo como factor de agrupación para la concentración de $NO_2$ .....	40
<b>Cuadro 6.</b> Concentración de $SO_2$ y concentración promedio anual registradas por campaña y sitio de muestreo durante el año 2021.....	43
<b>Cuadro 7.</b> Principales resultados del análisis de Tukey al considerar los puntos de muestreo como factor de agrupación para la concentración de $SO_2$ .....	47

## Presentación

Los planes de monitoreo son parte del quehacer de los gobiernos en sus diferentes niveles, los cuales se orienta 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 correspondientes en la matriz aire con el objetivo de caracterizar la línea base de diferentes agentes contaminantes en dicha matriz.

A nivel metodológico, 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 ( $SO_2$ ) respectivamente. La red manual gravimétrica está integrada por 2 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. Así mismo se cuenta con un sitio de monitoreo automático donde se registran diversos contaminantes como  $SO_2$ ,  $H_2S$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $NO_x$  y  $CO$ .

Como parte de los resultados de calidad de aire la concentración promedio anual, así como las concentraciones diarias de  $PM_{10}$ , no sobrepasan los límites reglamentarios establecidos para dicho contaminante, obteniéndose de un valor medio anual de  $20,32 \mu g/m^3$ . Por su parte, el promedio anual de  $PM_{2,5}$  presentó un valor de  $9,46 \mu g/m^3$  encontrándose por debajo de límite anual de  $15 \mu g/m^3$ . Para ambas fracciones de material particulado se evidencia una ligera tendencia de aumenta de la concentración en los meses característicos de la época lluviosa.

Con relación a las concentraciones promedio de  $NO_2$ , se observa un incumplimiento en todos los puntos de muestreo con base en el nuevo límite de referencia de la OMS. Específicamente, los sitios Plaza Belén, Firestone, Palacio Municipal y Plaza La Asunción son los que superan en mayor medida las referencias de la OMS, y este comportamiento se

puede relacionar con el flujo vehicular como principal fuente. Al considerar la clasificación de los sitios de muestreo, se establece por medio del análisis no paramétrico de *Mood* que las medianas de concentración de dióxido de nitrógeno de los sitios agrupados difieren estadísticamente obteniéndose la siguiente tendencia creciente: residencial < comercial < industrial.

Con respecto a los niveles de SO<sub>2</sub>, se obtuvo que la concentración media para el punto de Firestone presentó es mayor en las tres campañas de muestreo con relación a los demás puntos de muestre, aspecto que se asocia con su clasificación de zona industrial. A pesar de esta tendencia, no se documentó diferencia estadística con respecto a los otros puntos según prueba de Tukey a un 95% de confianza. En este caso, el análisis no paramétrico reveló que no existe diferencia estadística significativa al considerar las medianas de las campañas de muestreo ni la clasificación de los sitios de la red pasiva.

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.

**M.Sc. Victor Hugo Beita Guerrero**  
**Coordinadora del Laboratorio de Análisis Ambiental**  
**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 Foladori (2001, citado por Mercado-Maldonado y Ruiz-González, 2006) 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).

El monitoreo ambiental 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 ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) 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 ( $\text{NO}_2$ ) producto de la oxidación del monóxido de nitrógeno (NO) o el ozono ( $\text{O}_3$ ) 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 ( $\text{O}_3$ ), dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), material particulado ( $\text{PM}_{10}$  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 ( $\text{NO}_2$ ) 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  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  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  $\text{NO}_2$  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 ( $\text{SO}_2$ ) 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  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  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  $\text{PM}_{10}$  que representa todas aquellas partículas con diámetro aerodinámico igual o menor que 10 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ), mientras que el  $\text{PM}_{2.5}$  representa todas aquellas con diámetro aerodinámico igual o menor a 2,5  $\mu\text{m}$  (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  $\mu\text{m}$  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 membrada 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

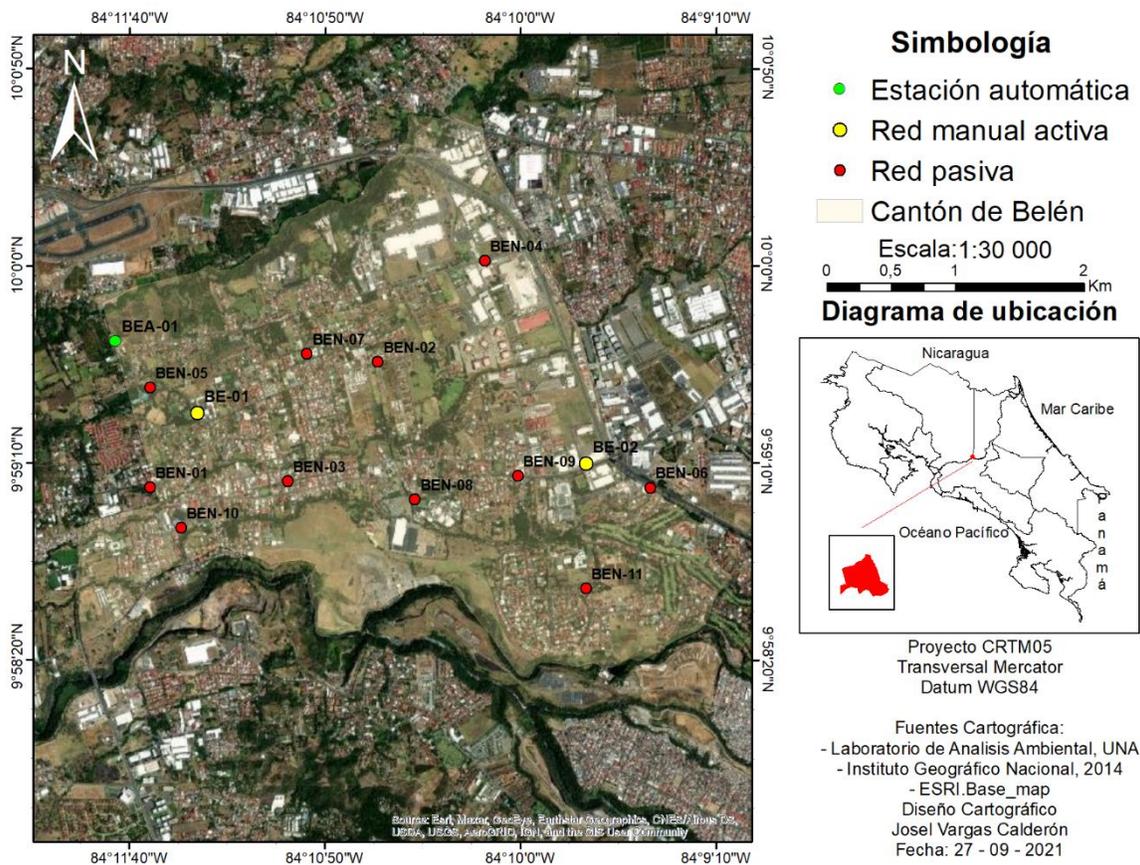
Es el mejor en términos de resolución en sus mediciones ya que las muestras son tomadas y analizadas en tiempo real, permitiendo llevar un monitoreo continuo de concentraciones horarias y menores. Una de las ventajas que presentan estos sistemas es que pueden medir una gran variedad de contaminantes 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 y el muestreo automático de contaminantes criterio. La Figura 1 muestra la distribución espacial de los puntos de muestreo para las redes manual activa, pasiva y automática. 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 (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) y automático en el Cantón de Belén de Costa Rica.

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 pasiva de 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

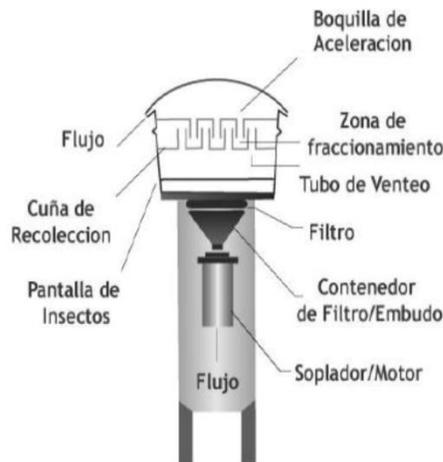
En relación con las jornadas de muestreo para el año de referencia, se establece que la frecuencia asociada con la red manual activa corresponde a 3 veces por semana contemplando un tiempo de muestreo de (24±1) h. Por su parte, la red de contaminantes por difusión pasiva implica campañas acumuladas en el tiempo requiriéndose como mínimo

21 días de muestreo en los puntos receptores para completar una campaña, en cuanto a las estaciones automáticas, estas presentan una mejor resolución temporal ya que permiten realizar muestreos de forma diaria de los contaminantes.

### 3.1. Métodos de Muestreo

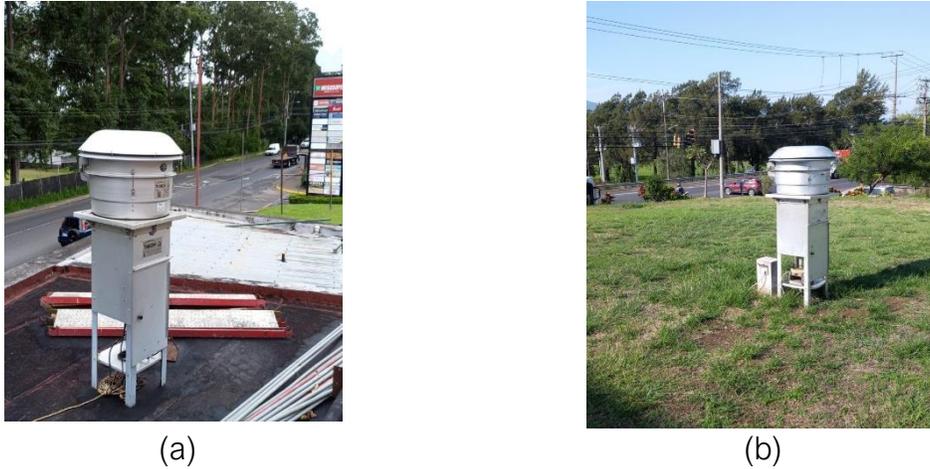
Para la medición de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en la red manual de monitoreo, se utiliza un muestreador de aire de alto volumen. En este dispositivo un motor ejecuta una succión de aire ambiente a través de la parte superior, el aire atraviesa las boquillas y los tubos de ventilación donde se hace una 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  $\text{NO}_2$  y  $\text{SO}_2$  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  $\text{NO}_2$  y carbonato de sodio para  $\text{SO}_2$  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  $\text{NO}_2$  y  $\text{SO}_2$  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  $\text{NO}_2$  y de  $\text{SO}_2$  por el método pasivo.



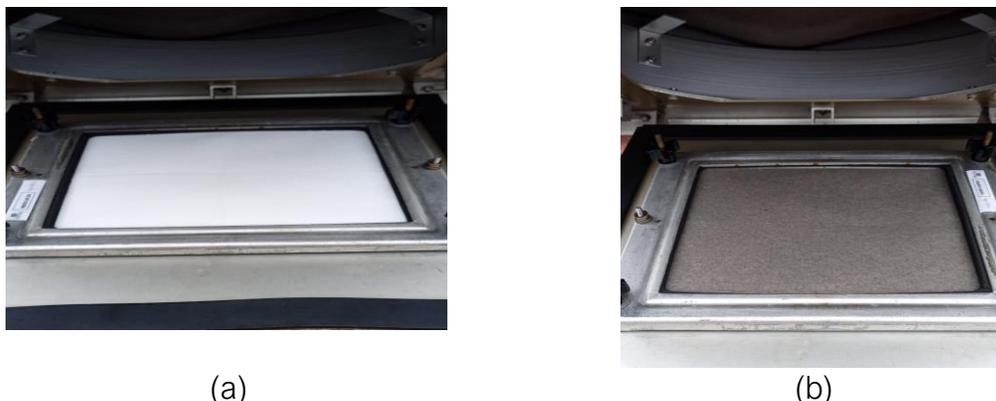
Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.** Portatubos 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 conozca la concentración de partículas de ese día para cada sitio. En la Figura 5, 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.



(a)

(b)

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  $\text{NO}_2$  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  $\text{SO}_2$  pasivo, las mallas se procesan con una disolución extractora de  $\text{H}_2\text{O}_2$  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.

Complementario a las redes anteriores, se cuenta con estaciones de monitoreo automático para la medición de diferentes contaminantes de forma continua. Como parte del esquema de monitoreo se destacan: monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), compuestos nitrogenados ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{NO}_x$ ) y compuestos azufrados ( $\text{SO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ). En cuanto a la detección y cuantificación se emplean sensores específicos según el agente químico de referencia, de manera específica se destacan del tipo infrarrojo para  $\text{CO}$ , quimioluminiscentes para compuestos nitrogenados y fluorescentes para compuestos azufrados. En el Cuadro 3 se presentan las principales características de los módulos que integran la red automática.

**Cuadro 3.** Principales características de los módulos que integran la red automática de monitoreo.

Característica	Módulo			
	Monóxido de carbono	Compuestos azufrados	Compuestos Nitrogenados	Compuestos Nitrogenados
Modelo	48i	450i	42i	17i
Rango	(0-1) ppm hasta 10 000 ppm	(0-0,05) ppm hasta 100 ppm	(0-0,05) ppm hasta 100 ppm	(0-0,05) ppm hasta 100 ppm
Límite de detección	0,04 ppm	1,50 ppb	0,40 ppb	1 ppb
Tiempo de respuesta	60 s	320 s	300 s	120 s
Linealidad	$\pm 1\% \leq 1\ 000$ ppm $\pm 2,5\% > 1\ 000$ ppm	$\pm 1\% \leq 100$ ppm $\pm 5\% > 100$ ppm	$\pm 1\%$	$\pm 1\%$
Flujo de operación	1,0 L/min	1,0 L/min	(0,6-0,8) L/min	0,6 L/min

Fuente: Elaboración propia a partir de fichas técnicas del proveedor, marca Thermo Scientific

Como parte del aseguramiento de la calidad de los datos, cada estación cuenta con protocolos 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 con trazabilidad NIST o equivalente, para lo cual se revisa la respuesta del equipo en dos puntos: aire cero (aire purificado libre de contaminantes) y span (mezcla del contaminante y aire entre el 70-90% de la escala completa 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 un gas patrón de concentración conocida como referencia. La frecuencia de los controles críticos y operaciones corresponden a diaria (entre las 23 y 0 horas) y cada 3 meses respectivamente.

Por último, es importante mencionar que de forma paralela a las acciones de control de calidad se llevan a cabo otras actividades vinculadas con el mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos. Como partes de dichas acciones se señalan: 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.



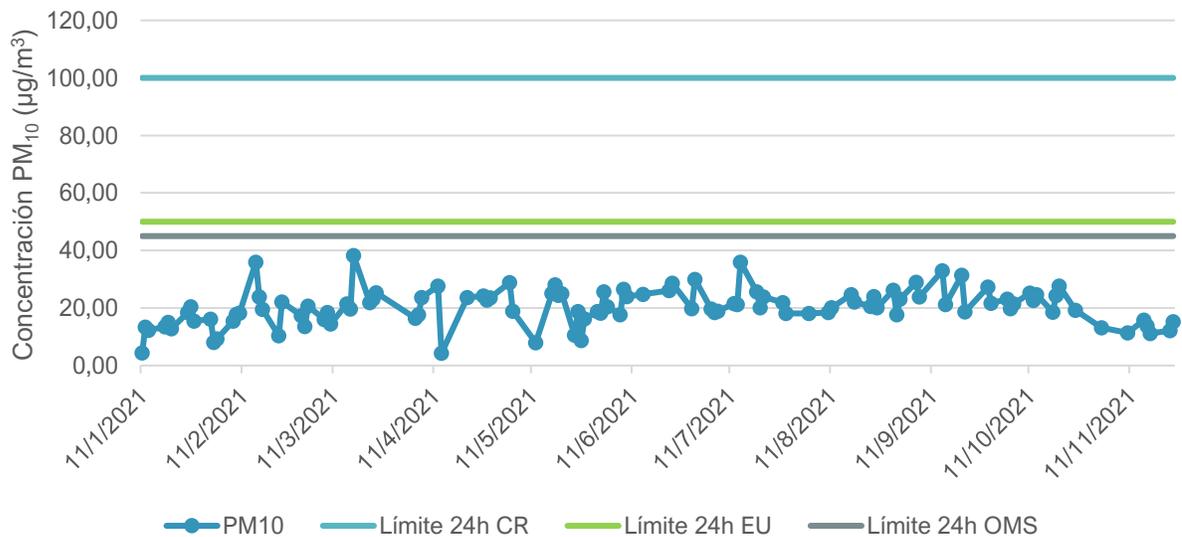
## 4. Resultados

## 4.1. Red de Monitoreo Activa: Contaminante PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>

### 4.1.1. Análisis de PM<sub>10</sub> en La Ribera de Belén

Como parte del control de la calidad del aire, la Municipalidad de Belén cuenta con dos muestreadores de alto volumen, uno ubicado en La Ribera que mide PM<sub>10</sub> y otro ubicado La Asunción, específicamente en la ferretería EPA, que mide PM<sub>2.5</sub>, ambos midiendo de forma continua a lo largo del año. Los Anexos 1 y 2 muestran los resultados y promedio anual para PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> respectivamente durante el año 2021.

Para PM<sub>10</sub> todos los días se encuentran por debajo de los 100 µg/m<sup>3</sup> definidos como límite máximo para concentraciones de PM<sub>10</sub> en 24 horas según el Decreto No. 39951-S (2016), según la Figura 6, inclusive, durante el 2021 todas las concentraciones se hallan por debajo del límite de 24 horas adoptado por la Unión Europea que se sitúa en 50 µg/m<sup>3</sup>, inclusive se encuentran por debajo del límite para 24 horas recomendado por la OMS, el cual es el más estricto y se sitúa en 45 µg/m<sup>3</sup>, señalando una buena calidad del aire con respecto al PM<sub>10</sub> y una baja exposición diaria a este contaminante (Tribunal de Cuentas Europeo, 2018).



Fuente: Elaboración propia

**Figura 6.** Concentraciones de PM<sub>10</sub> según fecha de muestreo para el año 2021 en el sitio ubicado en La Ribera, Belén.

Para julio del 2021 el IMN reportó la afectación sobre el país de la presencia de polvos del Sahara, este fenómeno arrastra gran cantidad de polvo y material particulado desde el desierto del Sahara sobre el Atlántico Norte Tropical y es una de las principales fuentes naturales de material particulado. En la Figura 6 se puede observar que para el 14 de julio del 2021 se presenta una de las concentraciones más altas del año,  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , siendo en ese día que se dio la entrada de los polvos del Sahara.

La tendencia de las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  a lo largo del año es a levemente creciente (ver Figura 6); 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 0,0137 que inicia cerca de  $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a inicio de año y finaliza cerca de  $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$  hacia final de año, mostrando una tendencia de incremento anual de  $4,32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Para este sitio el promedio anual es de  $20,32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , el cual es menor al límite anual de  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  definido en el Decreto N° 39951-S (2016) o al límite de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  adoptado por la Unión Europea. Al comparar el promedio anual obtenido con la concentración anual recomendado por la OMS y definido en  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2021) se tiene que este se sobrepasa, ya que en el 2021 la OMS realizó una actualización de los niveles recomendados sobre la calidad del aire, haciéndolos más rigurosos.

Una característica del conjunto de datos consiste en determinar si el comportamiento de estos sigue una distribución normal y para ello se aplica la prueba de normalidad de Anderson-Darling. Esta prueba permite establecer si el conjunto de datos sigue o no una distribución normal, comparando la función de distribución acumulada empírica de los datos de la muestra con la distribución esperada si los datos fueran normales y planteando dos hipótesis:

$H_0$ : Los datos siguen una distribución normal

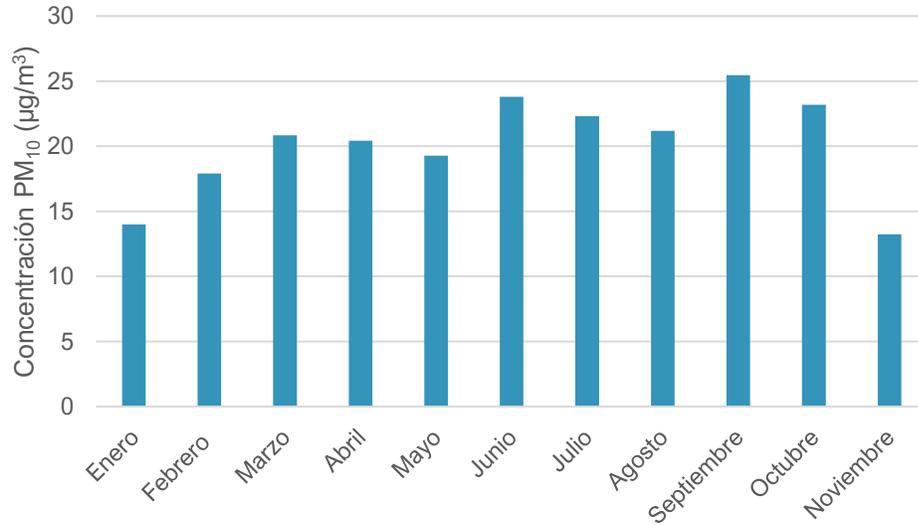
$H_1$ : los datos no siguen una distribución normal

Esta prueba genera dos estadísticos el de Anderson-Darling (AD) y el valor- $p$ . El primero indica que tan bien se ajustan los datos a la distribución en cuestión y entre menor sea su

valor mejor es el ajuste de los datos a dicha distribución. El segundo se utiliza como estadístico de prueba para la verificación de las hipótesis. Como parte de los resultados, se obtiene que el valor- $p$  de 0,328 y el estadístico AD es de 0,416, indicando que los datos de concentración siguen una distribución normal, este resultado se puede observar en el Anexo 3.

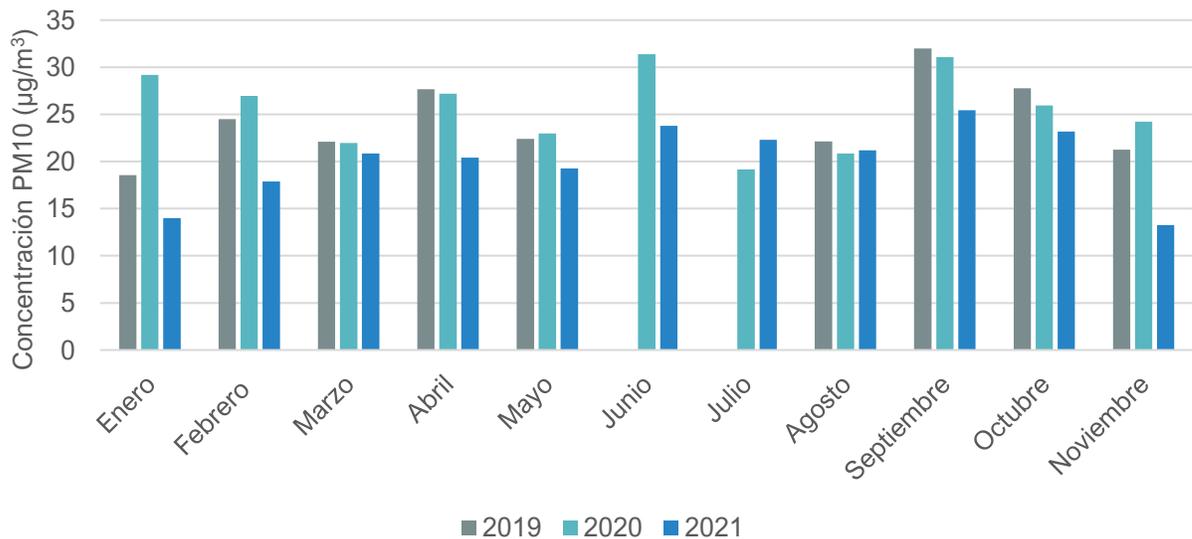
De manera complementaria, la Figura 7 muestra la concentración mensual promedio de  $PM_{10}$  a lo largo del año 2021 en el sitio de La Ribera. Se puede apreciar que los meses de junio, septiembre y octubre presentan desviaciones positivas con respecto al valor promedio anual. El mes que presentó la concentración promedio más alta, fue el mes de septiembre con  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , durante ese mes no se presentaron fenómenos naturales que pudieran ocasionar un incremento en las concentraciones de material particulado.

Al realizar una comparación con respecto a la concentración promedio mensual durante el 2019, 2020 y 2021, en la Figura 8 se puede observar que para el 2021 hubo una disminución de las concentraciones en todos los meses, excepto en el mes de julio donde hubo un incremento. Es de interés la comparación de estos tres años 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 el año en el que estas fueron más estrictas.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 7.** Concentraciones promedio mensuales de PM<sub>10</sub> para el año 2021 en el sitio ubicado en La Ribera de Belén.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 8.** Comparación de las concentraciones promedio mensuales de PM<sub>10</sub> entre los años 2019, 2020 y 2021 en el sitio ubicado en La Ribera de Belén.

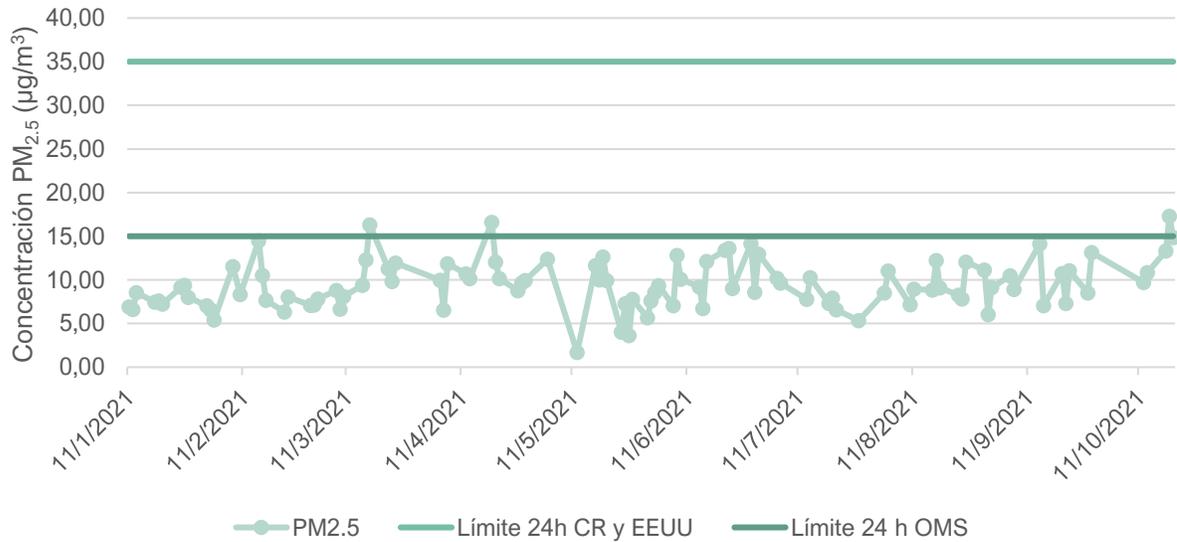
De la Figura 8 se puede observar que, para todos los meses, el promedio mensual de PM<sub>10</sub> entre el año 2019 y 2020 es muy similar, exceptuando el mes de enero donde se observa

una diferencia más marcada. Al realizar una comparación entre los tres años, se tiene que, contrario a lo que se esperaría por las restricciones de movilidad, el año 2020 es el que presenta mayores concentraciones; y que como se mencionó anteriormente, para el 2021 se dio una disminución de estas. El mes de diciembre no cuentan con datos comparativos ya que no se pudo realizar registro de datos para este mes en los años 2019 y 2021.

Pese a las restricciones de movilidad implementadas durante el 2020 debido a la pandemia por COVID-19, las concentraciones de  $PM_{10}$  se vieron disminuidas entre el 2020 y el 2021, cuando ya no existían restricciones de movilidad. Este hallazgo 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 fueron las que intervinieron en el 2020 para la obtención de esas concentraciones.

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

En lo que respecta a las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , el Anexo 2 y la Figura 9 permiten observar que todos los días se encuentran por debajo de los  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  definidos como límite máximo para concentraciones de  $PM_{2.5}$  en 24 horas según el Decreto No. 39951-S (2016). Si se comparan los valores con el límite recomendado por la OMS que fija su valor en  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , se obtiene que el 97 % de los datos se sitúan por debajo del límite recomendado por la OMS (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2021).



Fuente: Elaboración propia

**Figura 9.** Concentraciones de  $PM_{2.5}$  acomodadas por fecha para el año 2021 en el sitio ubicado en EPA de Belén.

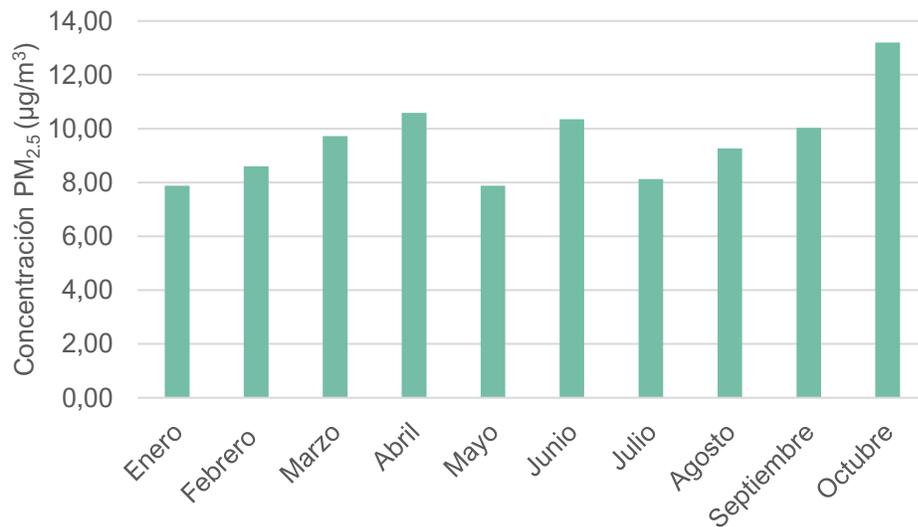
Con los resultados obtenidos se señala de manera general que durante el 2021 hubo una baja exposición diaria a este contaminante en cualquiera de los dos escenarios, pero al mismo tiempo evidencia la importancia que tiene considerar no solo los límites adoptados a nivel nacional, sino también realizar comparaciones con las recomendaciones internacionales que pueden poner de manifiesto escenarios más críticos al utilizar límites más estrictos.

Por último, la Figura 9 también muestra que la tendencia de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  a lo largo del año son levemente crecientes, ya que, 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 0,0077 que inicia cerca de  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a inicio de año y finaliza cerca de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , hacia final de año mostrando una tendencia de incremento anual de  $2,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

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 2021 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, dándose un incremento al inicio de la época lluviosa, abril, y finalmente alcanzando su pico en el mes de octubre, mes con mayor cantidad de precipitaciones en el cantón de Belén (ver figura 10). Asimismo, se puede apreciar que la mitad de los meses presentan desviaciones positivas con respecto al valor promedio anual ( $9,46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), siendo mayo el mes con las concentraciones más bajas.

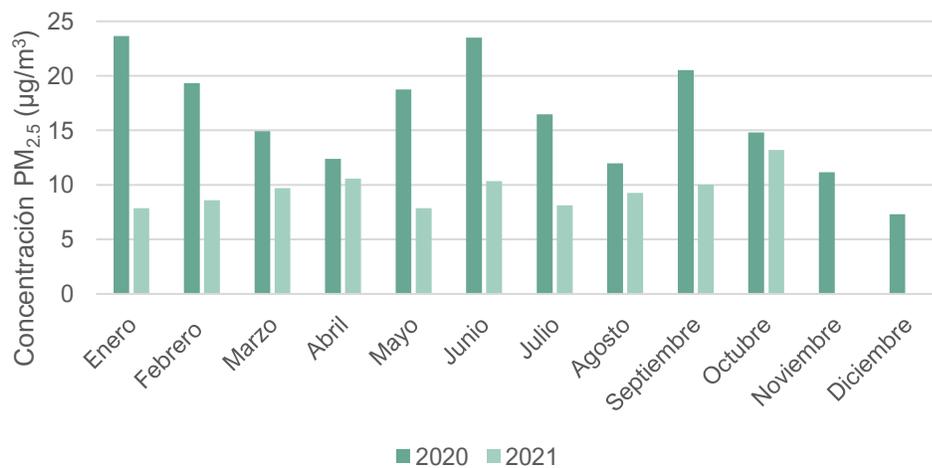


**Figura 10.** Concentraciones promedio mensuales de  $PM_{2.5}$  para el año 2021 en el sitio ubicado en EPA de Belén.

El promedio anual de  $PM_{2.5}$  obtenido para el año 2021 es de  $9,46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , el cual es inferior al límite máximo anual definido por el Decreto No. 39951-S (2016) que coloca el límite en  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y al límite adoptado por Estados Unidos de  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , pero, al realizar la

comparación con el límite recomendado por la OMS de  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2021) se sobrepasa, sin embargo, el promedio anual se encuentra por debajo de la meta intermedia número 4 definida por la OMS, por lo que se evidencia que durante el 2021 en relación a este contaminante se tuvo una baja exposición. Las exposiciones a corto plazo no son tan severas, no obstante, la exposición prolongada puede llegar a afectar la salud de las personas (Tribunal de Cuentas Europeo, 2018 & Environmental Protection Agency, 2019b).

Al realizar una comparación entre las concentraciones promedio mensuales entre el 2020 y el 2021 se obtiene que durante el 2020 las concentraciones fueron mayores, aún cuando durante ese año por las restricciones impuestas por el gobierno debido a la crisis por el COVID-19 la movilidad se vio restringida (ver figura 11). Para los meses de noviembre y diciembre no se puede realizar una comparación porque durante el 2021 no se pudieron registrar datos. Al igual que como sucede con  $\text{PM}_{10}$ , 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  $\text{PM}_{2.5}$  entre los años 2020 y 2021 en el sitio ubicado en EPA de Belén.

Una característica que interesa saber del conjunto de datos es si el comportamiento de estos sigue una distribución normal y para ello se aplica la prueba de normalidad de Anderson-

Darling. Tras aplicar la prueba, se registra un valor- $p$  de 0,071 y el estadístico AD es de 0,688 lo que quiere decir que no se puede rechazar la hipótesis nula, por lo tanto, los datos siguen una distribución normal, siendo los valores iniciales y finales los que se alejan en mayor medida de la línea central. El comportamiento gráfico de esta prueba se muestra en el Anexo 4.

## 4.2. Red de Monitoreo Pasiva: Contaminante NO<sub>2</sub>

El dióxido de nitrógeno es uno de los contaminantes criterio que se monitorea a través de la red pasiva y su emisión se vincula con los productos de combustión de fuentes móviles principalmente. 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 volvieron 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 NO<sub>2</sub> el límite anual disminuyó hasta 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , bajo este escenario ninguno de los puntos de muestreo para el 2021 está por debajo del límite (ver Cuadro 4). Sin embargo, al comparar las concentraciones promedio con las metas intermedias que se estableció la primera en 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , la segunda en 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y la tercera en 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2021) se obtiene que, para la primera campaña, Febrero, en todos los sitios se cumple con la primera meta, el 63 % de los sitios cumple con la segunda meta; los sitios residenciales y el del Centro Pedagógico cumplen con la tercera meta, estos son los que están más cercanos al límite recomendado por la OMS. Para la segunda campaña, Junio, las concentraciones en todos los sitios aumentan, por consiguiente, únicamente el sitio ubicado en Residencial Cariari cumple con la tercera meta. Para el mes de Octubre, tercera campaña, el 54 % de los sitios cumple con la segunda meta, pero ninguno cumple con la tercera meta. 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).

**Cuadro 4.** Concentración de NO<sub>2</sub> y concentración promedio anual registradas por campaña y sitio de muestreo durante el año 2021.

Sitios de muestreo	Concentración de NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )			
	Campaña 1 (Febrero)	Campaña 2 (Junio)	Campaña 3 (Octubre)	Promedio por sitio
Plaza Belén	34,7	50,4	52,8	46,0
Centro Pedagógico	17,0	27,6	31,8	25,5
Palacio Municipal	28,7	45,8	53,6	42,7
Firestone	38,3	45,7	47,8	43,9
Ojo de Agua	25,6	35,7	37,8	33,0
Hotel Herradura	34,1	40,9	58,4	44,5
Iglesia La Ribera	12,2	43,1	21,5	25,6
Colegio Técnico CIT	11,4	20,1	21,4	17,6
Plaza La Asunción	34,4	42,1	46,6	41,1
Polideportivo	13,4	24,2	25,5	21,0
Residencial Cariari	11,3	18,5	23,5	17,8

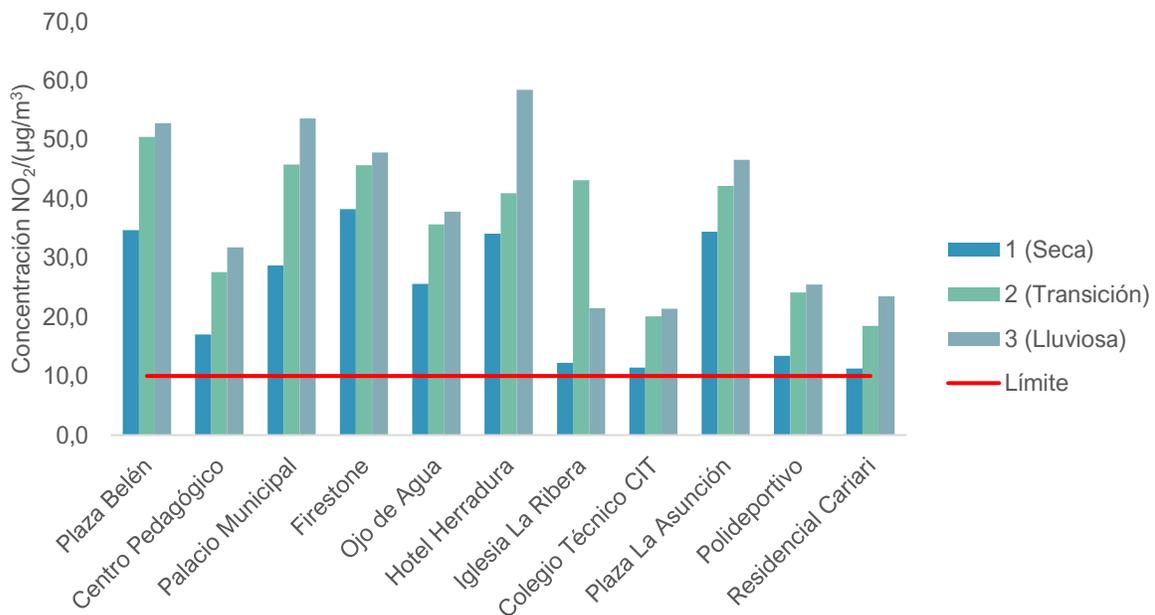
Fuente: Elaboración propia

Con respecto a la temporalidad en los niveles de dióxido de nitrógeno, los datos muestran la siguiente tendencia creciente en la concentración promedio por campaña: época seca, transición y lluviosa respectivamente. 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 2021 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 2021. Se observa cómo ninguno de los sitios cumple con el nuevo 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 NO<sub>2</sub> por sitio de muestreo para las campañas del 2021 en el cantón de Belén.

Como parte del control de datos, se realizó una prueba de normalidad de Anderson-Darling para el set de mediciones. Como resultado se obtuvo un valor-*p* de 0,557 y el estadístico AD es 0,302; esto indica que no se puede rechazar la hipótesis nula, los datos de

concentración siguen una distribución normal. Este comportamiento puede observarse en el Anexo 5.

Así mismo, se recurre un método no paramétrico que permita realizar comparaciones para los factores de estudio, específicamente la prueba de *Mood* para comparar las medianas por factores. Esta prueba determina si existe evidencia estadísticamente significativa para afirmar que las medianas son iguales ( $H_0$ ) o diferentes ( $H_1$ ) al considerar las campañas de muestreo y clasificación de los sitios de la red pasiva.

La regla de decisión toma en cuenta al estadístico valor- $p$ , el cual nuevamente se compara con el nivel de significancia  $\alpha$  (0,05). Al considerar como factor las campañas de muestreo se obtiene un valor- $p$  de 0,207 a un 95% de confianza; como consecuencia no se cuenta con suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula. Por lo tanto, las medianas de las campañas en diferentes épocas no difieren estadísticamente, comportamiento indicado anteriormente donde se documentó poca variación estacional.

Por otra parte, al considerar como factor la clasificación del punto se obtiene un valor- $p$  inferior al nivel de significancia y, por tanto, se acepta la hipótesis alternativa. En este caso, las medianas del tipo de sitio si difieren estadísticamente obteniéndose la siguiente tendencia: residencial (20,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), comercial (36,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) e industrial (45,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). 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.

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 5 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 28,3 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.

A partir del cuadro en cuestión, los puntos de muestreo denominados como Centro Comercial Plaza Belén y Colegio Técnico CIT son los que evidencia medias distintas con respecto a los puntos restantes de la red pasiva. Nótese que, de los sitios mencionados, el primero se caracteriza por presentar los mayores niveles de concentración de  $\text{NO}_2$  y pertenece a la zona comercial, mientras que el segundo presenta la menor concentración y se asocia a una zona residencial.

**Cuadro 5.** Principales resultados del análisis de Tukey al considerar los puntos de muestreo como factor de agrupación para la concentración de  $\text{NO}_2$

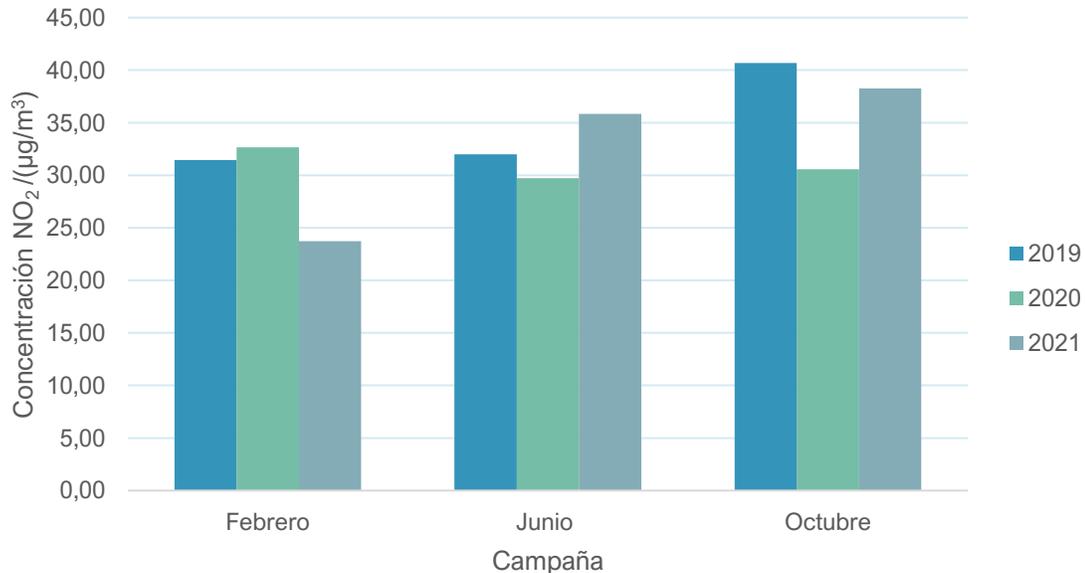
Sitio de Muestreo	Media ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Desviación estándar ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Agrupación
Plaza Belén	45,98	9,84	A
Hotel Herradura	44,48	12,53	A B
Firestone	43,91	5,01	A B
Palacio Municipal	42,69	12,74	A B
Plaza La Asunción	41,05	6,17	A B
Ojo de Agua	33,01	6,52	A B
Iglesia, La Ribera	25,61	15,86	A B
Centro Pedagógico	25,46	7,61	A B
Polideportivo	21,03	6,61	A B
Residencial Cariari	17,75	6,15	B
Colegio Técnico CIT	17,64	5,43	B

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, un análisis importante de abordar corresponde al comparativo de las campañas de muestreo entre el 2019, 2020 y 2021, producto de los cambios en los patrones

de movilidad a causa de la emergencia sanitaria por COVID-19 manifestando cambios positivos en los indicadores ambientales de la calidad de aire (Bonardi, y otros, 2021). Bajo este contexto, se presenta la Figura 13 que muestra la media de dióxido de nitrógeno por campaña según la época de referencia.

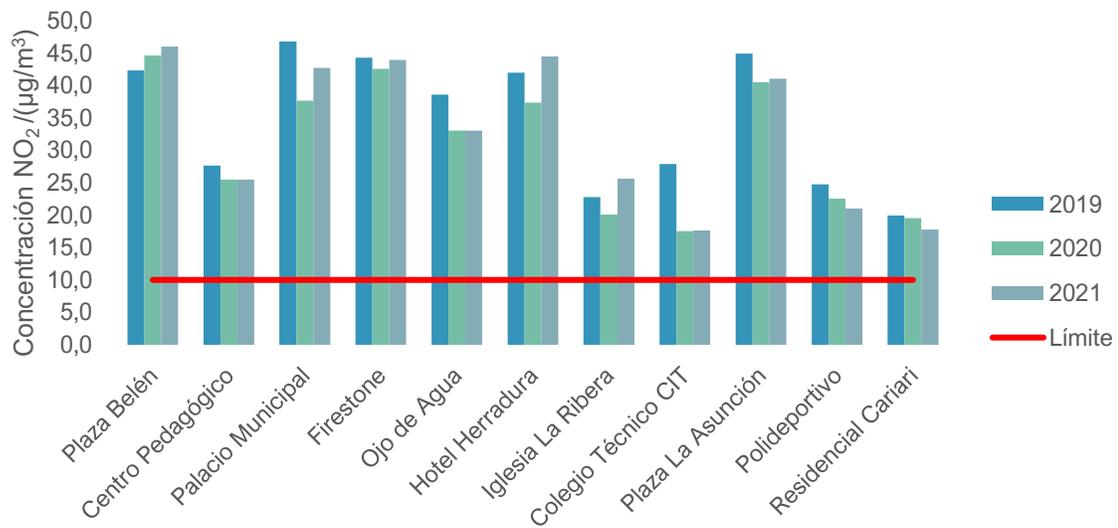
De dicha figura se observa que para la campaña época seca, la concentración de dióxido de nitrógeno para el 2021 disminuyó con respecto a la del 2020, un 27 %, sin embargo, en la época de transición y lluviosa, la concentración aumentó, un 20 y un 25 % respectivamente. A nivel nacional las medias impuestas por el gobierno para disminuir la transmisión del COVID-19 empezaron a regir en el mes de marzo del 2020 y para febrero del 2021 todavía se mantenían restricciones vehiculares. Contrario a lo ocurrido durante los meses de junio y octubre, donde el gobierno poco a poco empezó a flexibilizar las medias, por tal razón las concentraciones para el mes de octubre son mayores a las de junio. Se puede evidenciar que las concentraciones de NO<sub>2</sub> para el cantón de Belén se vieron influenciadas por las restricciones sanitarias impuestas por el COVID-19.



Fuente: Elaboración propia

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

De forma agregada, se presenta la Figura 14 donde se muestran 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 2021 las concentraciones han ido aumentando o bien se mantienen, esto porque las medidas que restringían la movilidad fueron más laxas durante el 2021.



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  $\text{NO}_2$  (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 SO<sub>2</sub>

Otro contaminante caracterizado mediante la red pasiva es el dióxido de azufre, al igual que el contaminante anterior, se realizan tres campañas por año con una duración de 21 días cada una. En el Cuadro 6 se muestran los resultados obtenidos para cada campaña. Con respecto al SO<sub>2</sub> es importante destacar que su emisión se vincula tanto con fuentes biogénicas (actividad volcánica) y antropogénicas (fuentes móviles y actividad industrial).

**Cuadro 6.** Concentración de SO<sub>2</sub> y concentración promedio anual registradas por campaña y sitio de muestreo durante el año 2021.

Sitios de muestreo	Concentración de SO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )			Promedio por sitio
	Campaña 1 (Febrero)	Campaña 2 (Junio)	Campaña 3 (Octubre)	
Plaza Belén	13,25	4,63	52,50	23,46
Centro Pedagógico	11,03	8,08	41,60	20,24
Palacio Municipal	7,76	4,76	8,17	6,90
Firestone	459,52	64,20	53,80	192,51
Ojo de Agua	8,03	4,69	6,40	6,37
Hotel Herradura	5,05	5,97	7,12	6,05
Iglesia La Ribera	9,33	7,26	7,21	7,93
Colegio Técnico CIT	9,75	4,40	6,02	6,72
Plaza La Asunción	8,02	6,23	8,60	7,62
Polideportivo	14,60	4,45	10,40	9,82
Residencial Cariari	6,11	3,50	11,10	6,90

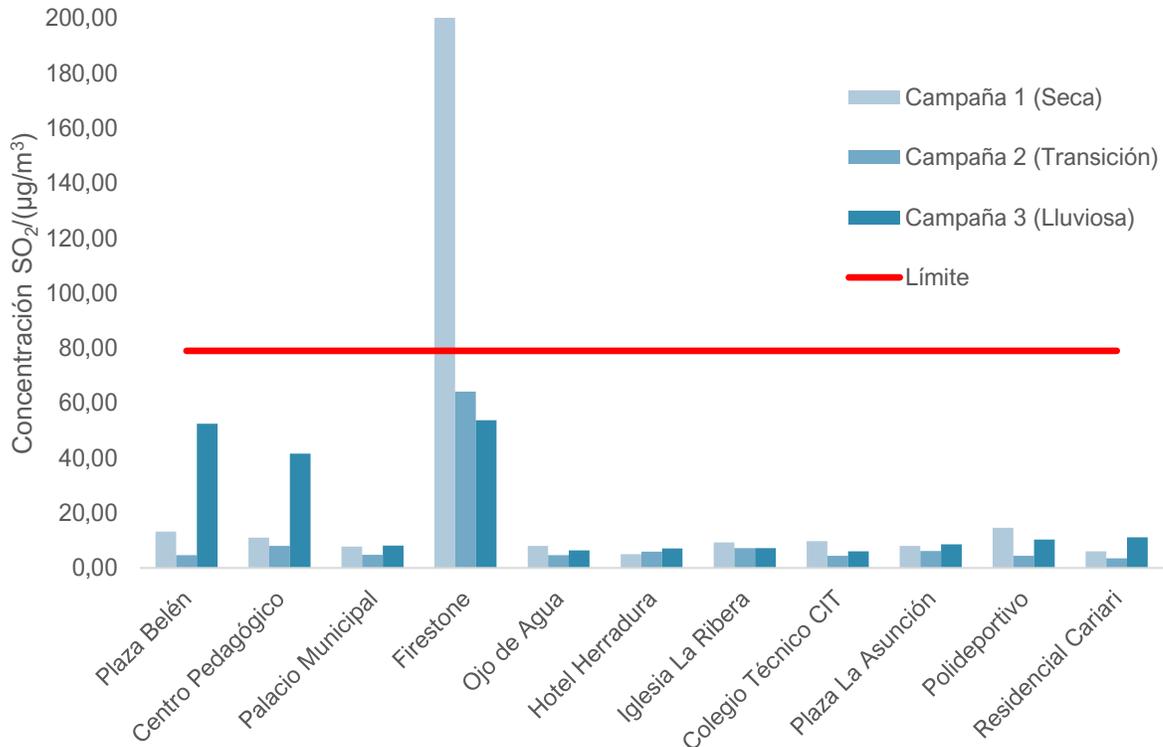
Fuente: Elaboración propia

A partir del conjunto de datos para este contaminante, se observa que los sitios con concentración promedio más elevada corresponde al punto denominados como Firestone, seguido por Centro Pedagógico y Plaza Belén, los cuales representan sitios con

características industriales y comerciales. 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  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . A partir del umbral anterior, únicamente el punto ubicado en Firestone excede el límite, como se indicó, este punto caracteriza una zona industrial del cantón dónde durante el 2021 se estuvieron realizando labores de construcción de carretera, por este motivo, el congestionamiento fue mayor durante este periodo, aspecto que justifica los niveles observados. Por otra parte, considerando recomendaciones internacionales, se establecen límites para este contaminante de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (para 24 horas) (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2021); sin embargo, el umbral anterior no es comparable debido a la referencia de tiempo que considera.

Como parte de la caracterización de la estacionalidad, se presenta en la Figura 15 el perfil de concentración de  $\text{SO}_2$  para los puntos de muestreo según las campañas de referencia. De forma generalizada, la campaña de muestreo en época lluviosa (mes de octubre) muestra los mayores niveles de concentración en 54 % de los sitios (1, 2, 6, 6, 9 y 11) y en 45 % de los sitios para la época seca. Como consecuencia, 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).

Como parte del análisis estadístico de los datos, se aplica la prueba de normalidad de Anderson-Darling con el propósito de determinar el comportamiento de estos y pruebas comparativas posteriores. De esta prueba se obtiene que el valor- $p$  es menor que 0,005 con un nivel de confianza del 95%, indicando que los datos no siguen una distribución normal, el comportamiento gráfico se confirma con la gráfica de probabilidad normal que se muestra en el Anexo 6. Dado el resultado descrito, las comparaciones por campaña y clasificación de puntos debe tomar como punto de partida análisis no paramétrico.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 15.** Comparación de la concentración de SO<sub>2</sub> por sitio de muestreo para las campañas del 2021 en el cantón de Belén.

Por lo anterior, se procede a aplicar la prueba no paramétrica de medianas de *Mood* con el propósito de comparar las medianas entre las tres campañas y determinar si existe diferencia estadísticamente significativa entre estas. Como parte de los resultados de la prueba con un nivel de confianza del 95%, se obtiene un valor- $p$  de 0,048; lo que significa que las medianas de la campaña si difieren estadísticamente, obteniéndose las siguientes medianas por campaña: 9,33 µg/m<sup>3</sup> (campaña seca), 4,76 µg/m<sup>3</sup> (campaña transición) y 8,60 µg/m<sup>3</sup> (campaña lluviosa).

Un análisis similar se realizó considerando la clasificación de los sitios de muestreo según sus características de residenciales, comerciales e industriales. En este caso, se reportó un valor- $p$  de 0,171 a un 95 % de confianza, el valor- $p$  es mayor que el nivel de significancia, de manera que no existe diferencia estadística significativa en las medianas al considerar la clasificación del sitio de muestreo. Como parte de los resultados se obtiene el siguiente

orden creciente de medianas: 7,235  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (residencial), 7,890  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (comercial) y 64,200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (industrial).

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 0,110, por tanto, se cuenta con suficiente evidencia estadística para establecer que todas las medias de los sitios de muestreo no difieren estadísticamente.

En el Cuadro 7 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 186,9 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, sin embargo, en este caso, todos los sitios comparten la misma letra, por consiguiente, se puede decir que no difieren significativamente en el nivel medio de concentración.

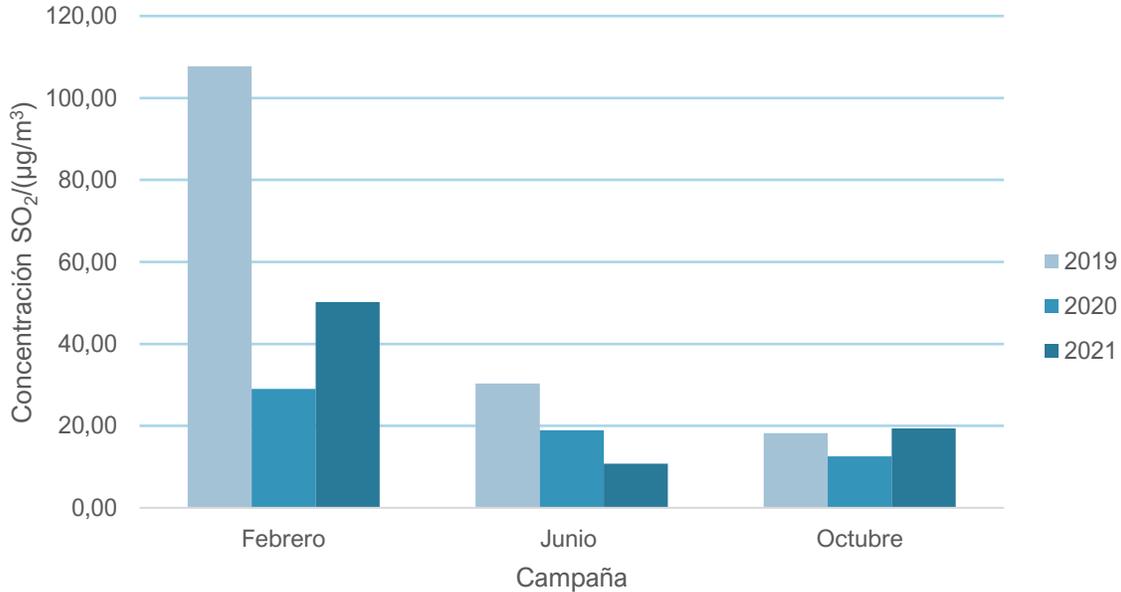
A partir del cuadro en cuestión, el sitio de muestreo de Firestone fue el que presentó la media de concentración de  $\text{SO}_2$  más alta de todos los puntos que integran la red pasiva, de hecho, se obtiene una diferencia de 169,5 unidades de concentración entre este punto y el consecutivo (sitio del Centro Comercial Plaza Belén). Aun así, los 11 sitios se clasificaron en el mismo grupo (A) por lo que la variabilidad observada entre sitios comerciales, industriales y residenciales es comparable.

**Cuadro 7.** Principales resultados del análisis de Tukey al considerar los puntos de muestreo como factor de agrupación para la concentración de SO<sub>2</sub>

Sitio de Muestreo	Media (µg/m <sup>3</sup> )	Desviación estándar (µg/m <sup>3</sup> )	Agrupación
Firestone	193,0	231,0	A
Plaza Belén	23,5	25,5	A
Centro Pedagógico	20,2	18,6	A
Polideportivo	9,82	5,10	A
Iglesia, La Ribera	7,93	1,21	A
Plaza La Asunción	7,62	1,23	A
Residencial Cariari	6,90	3,86	A
Palacio Municipal	6,90	1,86	A
Colegio Técnico CIT	6,72	2,74	A
Ojo de Agua	6,37	1,67	A
Hotel Herradura	6,05	1,04	A

Fuente: Elaboración propia

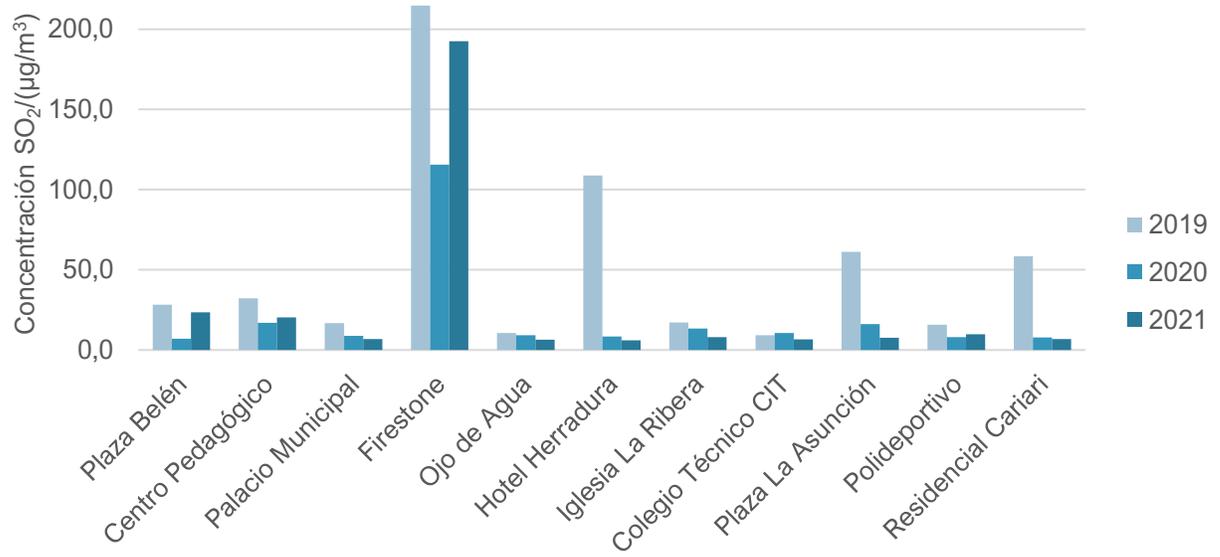
Por último, se realiza un comparativo de las campañas 2019, 2020 y 2021 con el propósito de determinar el impacto en los niveles de los contaminantes ante las restricciones sanitarias (ver Figura 16). Se observa como para todos los meses se obtiene una disminución en la concentración media de SO<sub>2</sub> al pasar del 2019 al 2020, mientras que, al pasar del 2020 al 2021 se evidencia un incremento de las concentraciones en la época seca y en la lluviosa, y en el caso de la transición las concentraciones vuelven a disminuir. Tal y como se observó con el NO<sub>2</sub> las medidas de restricción de movilidad impuestas por la emergencia sanitaria por COVID-19 ayudaron a disminuir las concentraciones de SO<sub>2</sub> mientras se aplicaron, pero una vez que estas se fueron volviendo más permisibles las concentraciones aumentaron nuevamente, es prudente acotar que las reducciones documentadas no son exclusivas de las restricciones sanitarias.



Fuente: Elaboración propia

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

Por otra parte, la Figura 17 muestra la concentración promedio de dióxido de azufre por sitio de muestreo según año de monitoreo. Se evidencia cómo el sitio de muestreo ubicado en la Firestone a lo largo de los años ha sido el que presenta las mayores concentraciones; así mismo, en sitios como Plaza Belén, Centro Pedagógico y Polideportivo las concentraciones de  $\text{SO}_2$  han aumentado con respecto al 2020, por lo que van volviendo a las concentraciones previas a las restricciones de movilidad. Sin embargo, los demás sitios de muestro más bien disminuyeron sus concentraciones aun cuando las restricciones fueron más permisibles en el 2021, debido a esta situación se evidencia 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 más 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 nitrógeno (en unidades de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) por punto de muestreo según año de monitoreo



## 5. Conclusiones y recomendaciones

## 5.1. Conclusiones

- Las concentraciones de  $PM_{10}$  registradas en 24 h de muestreo no superaron el límite establecido en el Reglamento de Calidad de Aire para Contaminantes Criterio. Por su parte, el nivel medio anual para este contaminante corresponde a  $20,32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .
- La serie de datos de la concentración de  $PM_{10}$  en el 2021 muestra una tendencia constante, registrándose una de las mayores concentraciones en la fecha del 14 de julio del 2021, condición relacionada estrechamente con el fenómeno de polvos del Sahara.
- Las concentraciones diarias de  $PM_{2.5}$  muestran un comportamiento ligeramente creciente al considerar el registro anual de datos. Por su parte, el valor medio anual de concentración no supera el límite establecido en el Decreto No. 39951-S, pero sí el establecido por la OMS en 4,5 unidades de concentración.
- El análisis de las concentraciones medias de  $PM_{2.5}$  mensuales muestran que el mes de octubre presentó la mayor desviación positiva con relación al valor medio anual, comportamiento que se explica por una mayor frecuencia en las lluvias, condición que propicia el incremento del material particulado.
- Con los nuevos límites declarados por la OMS en septiembre del 2021 todos los sitios de muestreo en su concentración media anual de  $NO_2$  supera el límite de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Sitios como Plaza Belén, Palacio Municipal, Firestone, Hotel Herradura y Plaza La Asunción a partir de la segunda campaña no cumplen ni con la primera meta intermedia, la cuál es la más laxa de todas.
- Al considerar la estacionalidad como factor de estudio, el análisis de medianas de *Mood* indicó que para  $NO_2$  no existe suficiente evidencia estadística para establecer que los valores observados por campaña de muestreo difieren, mientras que para  $SO_2$  los valores sí difieren estadísticamente.
- La clasificación de los sitios de muestreo como factor de estudio evidenció por medio del análisis de medianas de *Mood*, que existe suficiente evidencia estadística para establecer diferencias entre los valores observados, obteniéndose la siguiente tendencia creciente: residencial < comercial < industrial.

- La prueba de Tukey considerando como factor los sitios que integran la red pasiva, indicó que los sitios de Centro Comercial Plaza Belén y Colegio Técnico CIT presentan medias de concentración de NO<sub>2</sub> estadísticamente significativa con relación a los otros puntos de muestreo a un 95% de confianza.
- Como sucedió en años anteriores, el sitio de muestreo de Firestone (clasificado como industrial) presentó la mayor concentración de dióxido de azufre al considerar el valor medio anual. Como parte de los análisis estadísticos realizados, la prueba de *Mood* no permitió diferenciar las medianas entre clasificación de los sitios.
- La prueba de Tukey considerando como factor los sitios que integran la red pasiva, reveló que todos los sitios se encuentran en el mismo grupo con un 95 % de confianza, por lo que la variabilidad observada entre sitios es comparable.
- El análisis comparativo 2019-2020-2021 no mostró evidencia estadística significativa para los contaminantes caracterizados por la red de difusión pasiva, aspecto limitado principalmente a la resolución temporal del monitoreo ejecutado.

## 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 NO<sub>2</sub> 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 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, 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., Reinoso-Valladares, M., Ordoñez-Sánchez, Y., & Hernández-Garcés, A. (2017). Muestreo pasivo de contaminantes atmosféricos. Uso en Cuba. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 18(2), 113-121.
- Carrales, B., & Chairez, I. (2019). Metodologías para el muestreo de la calidad del aire. *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](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](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, NO<sub>2</sub> and PM<sub>2.5</sub> 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.
- 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). *Monitoreando 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<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>), 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](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.
- 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 PM<sub>10</sub> y concentración promedio anual registradas en el sitio de muestreo ubicado en La Ribera de Belén durante el año 2021.

Concentración de partículas PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )			
Fecha	Concentración	Fecha	Concentración
11/1/2021	4	8/3/2021	16
12/1/2021	13	9/3/2021	18
13/1/2021	12	10/3/2021	15
18/1/2021	14	15/3/2021	21
19/1/2021	15	16/3/2021	20
20/1/2021	13	17/3/2021	38
25/1/2021	18	22/3/2021	22
26/1/2021	20	23/3/2021	23
27/1/2021	15	24/3/2021	25
1/2/2021	16	5/4/2021	16
2/2/2021	8	6/4/2021	18
3/2/2021	9	7/4/2021	24
8/2/2021	16	12/4/2021	28
9/2/2021	18	13/4/2021	4
10/2/2021	18	21/4/2021	24
15/2/2021	36	26/4/2021	24
16/2/2021	24	27/4/2021	23
17/2/2021	20	28/4/2021	24
22/2/2021	10	4/5/2021	29
23/2/2021	22	5/5/2021	19
1/3/2021	17	12/5/2021	8
2/3/2021	14	17/5/2021	25
3/3/2021	21	18/5/2021	28

Fuente: Elaboración propia

**Anexo 1 (Continuación).** Concentración de partículas PM<sub>10</sub> y concentración promedio anual registradas en el sitio de muestreo ubicado en La Ribera de Belén durante el año 2021.

Concentración de partículas PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )			
Fecha	Concentración	Fecha	Concentración
19/5/2021	24	14/7/2021	36
20/5/2021	25	19/7/2021	26
24/5/2021	11	20/7/2021	20
25/5/2021	19	21/7/2021	24
26/5/2021	9	27/7/2021	22
27/5/2021	16	28/7/2021	18
31/5/2021	19	4/8/2021	18
1/6/2021	18	10/8/2021	19
2/6/2021	26	11/8/2021	20
3/6/2021	20	17/8/2021	25
7/6/2021	18	18/8/2021	22
8/6/2021	27	23/8/2021	21
9/6/2021	24	24/8/2021	24
14/6/2021	25	25/8/2021	20
22/6/2021	26	30/8/2021	26
23/6/2021	29	31/8/2021	18
29/6/2021	20	1/9/2021	23
30/6/2021	30	6/9/2021	29
5/7/2021	20	7/9/2021	24
6/7/2021	18	14/9/2021	33
7/7/2021	19	15/9/2021	21
12/7/2021	22	20/9/2021	31
13/7/2021	21	21/9/2021	19

Fuente: Elaboración propia

**Anexo 1 (Continuación).** Concentración de partículas PM<sub>10</sub> y concentración promedio anual registradas en el sitio de muestreo ubicado en La Ribera de Belén durante el año 2021.

Concentración de partículas PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )			
Fecha	Concentración	Fecha	Concentración
28/9/2021	27	20/10/2021	28
29/9/2021	22	25/10/2021	19
4/10/2021	23	2/11/2021	13
5/10/2021	20	10/11/2021	11
6/10/2021	21	15/11/2021	16
11/10/2021	25	16/11/2021	14
12/10/2021	23	17/11/2021	11
13/10/2021	25	23/11/2021	12
18/10/2021	19	24/11/2021	15
19/10/2021	24	Promedio	20,3

Fuente: Elaboración propia

**Anexo 2.** Concentración de partículas PM<sub>2.5</sub> y concentración promedio anual registradas en el sitio de muestreo ubicado en EPA de Belén durante el año 2021.

Concentración de partículas PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )			
Fecha	Concentración	Fecha	Concentración
11/1/2021	6,90	1/2/2021	7,06
12/1/2021	6,63	2/2/2021	6,58
13/1/2021	8,55	3/2/2021	5,41
18/1/2021	7,46	8/2/2021	11,53
19/1/2021	7,61	10/2/2021	8,32
20/1/2021	7,23	15/2/2021	14,49
25/1/2021	9,17	16/2/2021	10,52
26/1/2021	9,37	17/2/2021	7,67
27/1/2021	7,99	22/2/2021	6,33

Fuente: Elaboración propia

**Anexo 2 (Continuación).** Concentración de partículas PM<sub>2.5</sub> y concentración promedio anual registradas en el sitio de muestreo ubicado en EPA de Belén durante el año 2021.

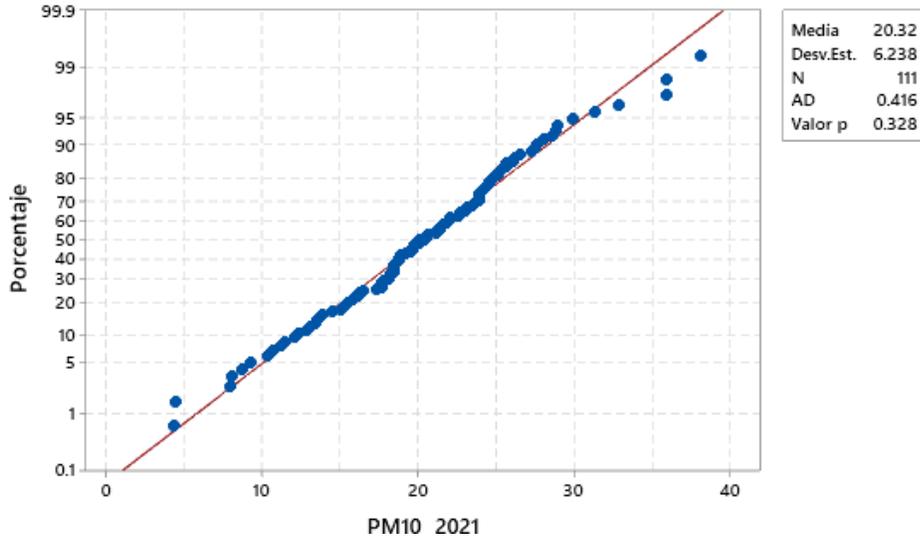
Concentración de partículas PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )			
Fecha	Concentración	Fecha	Concentración
23/2/2021	8,05	28/4/2021	9,93
1/3/2021	7,07	4/5/2021	12,38
2/3/2021	7,13	12/5/2021	1,69
3/3/2021	7,81	17/5/2021	11,66
8/3/2021	8,80	18/5/2021	10,02
9/3/2021	6,65	19/5/2021	12,63
10/3/2021	8,10	20/5/2021	9,94
15/3/2021	9,40	24/5/2021	4,02
16/3/2021	12,31	25/5/2021	7,25
17/3/2021	16,30	26/5/2021	3,62
22/3/2021	11,26	27/5/2021	7,79
23/3/2021	9,82	31/5/2021	5,67
24/3/2021	11,95	1/6/2021	7,60
5/4/2021	9,98	2/6/2021	8,53
6/4/2021	6,54	3/6/2021	9,36
7/4/2021	11,86	7/6/2021	7,06
12/4/2021	10,69	8/6/2021	12,82
13/4/2021	10,16	9/6/2021	10,07
19/4/2021	16,61	14/6/2021	9,21
20/4/2021	12,05	15/6/2021	6,71
21/4/2021	10,15	16/6/2021	12,13
26/4/2021	8,77	21/6/2021	13,41
27/4/2021	9,65	22/6/2021	13,63

Fuente: Elaboración propia

**Anexo 2 (Continuación).** Concentración de partículas PM<sub>2.5</sub> y concentración promedio anual registradas en el sitio de muestreo ubicado en EPA de Belén durante el año 2021.

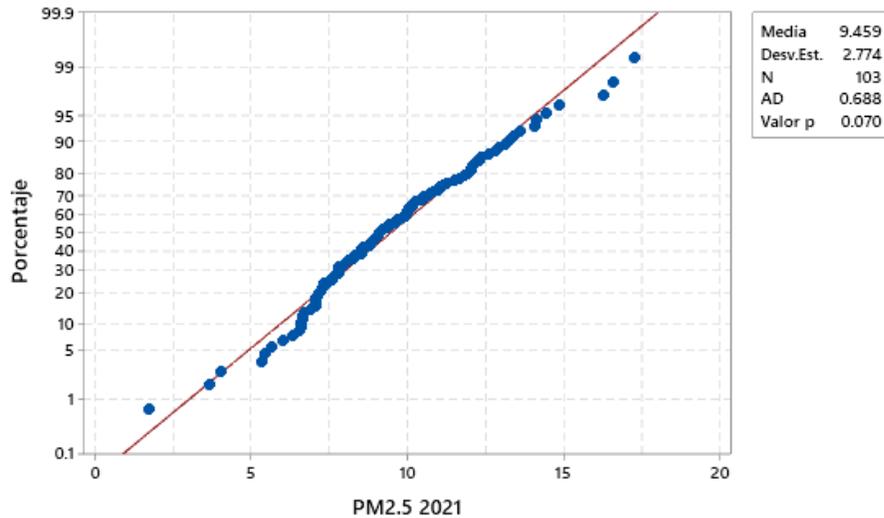
Concentración de partículas PM <sub>2.5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )			
Fecha	Concentración	Fecha	Concentración
23/6/2021	9,02	24/8/2021	7,82
28/6/2021	14,17	25/8/2021	12,04
29/6/2021	8,58	30/8/2021	11,14
30/6/2021	12,95	31/8/2021	6,03
5/7/2021	10,20	1/9/2021	9,11
6/7/2021	9,66	6/9/2021	10,47
13/7/2021	7,78	7/9/2021	8,90
14/7/2021	10,26	14/9/2021	14,11
19/7/2021	7,30	15/9/2021	7,03
20/7/2021	7,94	20/9/2021	10,74
21/7/2021	6,57	21/9/2021	7,32
27/7/2021	5,35	22/9/2021	11,05
3/8/2021	8,51	27/9/2021	8,51
4/8/2021	11,02	28/9/2021	13,13
10/8/2021	7,16	12/10/2021	9,70
11/8/2021	8,95	13/10/2021	10,82
16/8/2021	8,84	18/10/2021	13,32
17/8/2021	12,23	19/10/2021	17,29
18/8/2021	9,08	20/10/2021	14,87
23/8/2021	8,27	Promedio	9,46

Fuente: Elaboración propia



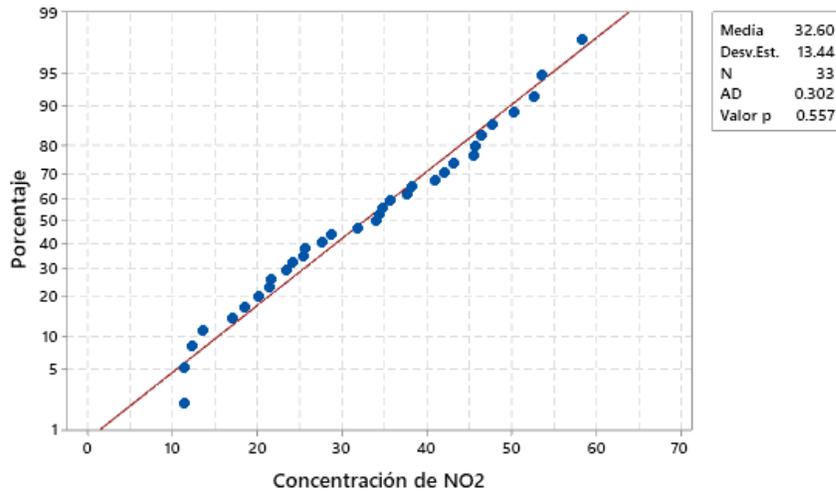
Fuente: Elaboración propia

**Anexo 3.** Gráfica de probabilidad normal para los datos de concentración de PM<sub>10</sub> del año 2021 en el sitio de La Ribera de Belén.



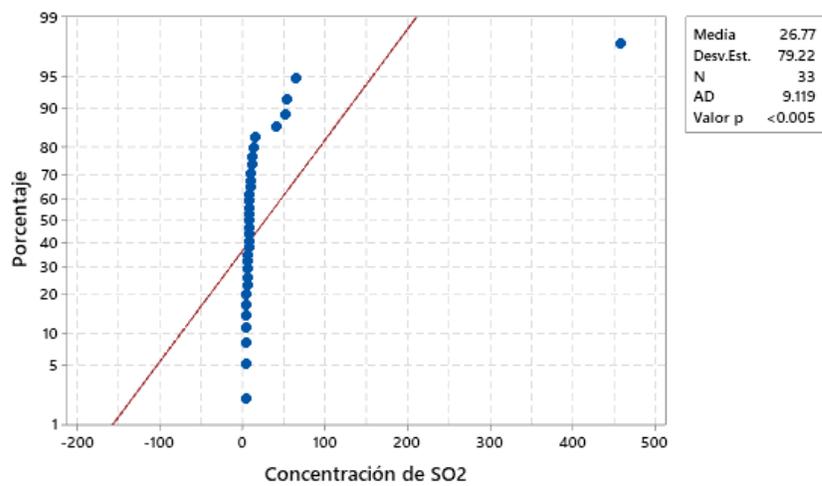
Fuente: Elaboración propia

**Anexo 4.** Gráfica de probabilidad normal para los datos de concentración de PM<sub>2.5</sub> del año 2021 en el sitio ubicado en EPA de Belén.



Fuente: Elaboración propia

**Anexo 5.** Gráfica de probabilidad normal para los datos de concentración de  $\text{NO}_2$  del año 2021 en el cantón de Belén.



Fuente: Elaboración propia

**Anexo 6.** Gráfica de probabilidad normal para los datos de concentración de  $\text{SO}_2$  del año 2021 en el cantón de Belén.