



**Evaluación de la afectación ambiental y enfermedades respiratorias
asociadas al contaminante atmosférico NO₂ en Barranquilla mediante la
aplicación de programa y tecnología.**

Martha Alicia Mendoza Hernández

Universidad Del Norte
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Barranquilla – Atlántico
2021



**Evaluación de la afectación ambiental y enfermedades respiratorias
asociadas al contaminante atmosférico NO₂ en Barranquilla
mediante la aplicación de programas y tecnologías.**

Martha Alicia Mendoza Hernández

Investigación presentada como requisito para optar por el título de **Magister en Ingeniería Civil**
con énfasis en ingeniería ambiental

Directora:

Ing. Dayana Agudelo Castañeda M.Sc. Ph.D.

Universidad Del Norte
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Barranquilla – Atlántico
2021

Dedicatoria

Cuando Dios es la base de tu vida, todas las metas y propósitos son posibles y gracias a Él estoy aquí cumpliendo uno de mis grandes logros, que con perseverancia, paciencia y dedicación me permitió culminar esta investigación de crecimiento profesional.

A mis padres, Martha María Hernández Guerrero y Rafael Eduardo Mendoza Arrieta, que con su amor me motivaron día y noche, siempre estuvieron dispuestos a darme fuerzas y sus palabras llenas de sabiduría me guiaron hasta la recta final de este proyecto de manera incondicional.

A mi hermana, Laura María Mendoza Hernández, mi consentida, consejera e incondicional, gracias por su constante apoyo y acompañamiento en la consecución de este logro.

A mi tutora y amiga Dayana Agudelo, gracias por brindarme la oportunidad, confianza y motivación en la participación de este nuevo logro, sus conocimientos y aportes me ayudaron en este proceso de formación.

Agradecimientos

Para mí es el logro poder culminar este proyecto de investigación, gracias a la ayuda de nuestras familias, apoyo de docentes, personal de laboratorio y la universidad hemos podido finalizar.

A la Universidad de la Norte por brindarnos todas las instalaciones, equipos y material educativo para el desarrollo de este proyecto.

A Minciencias por permitirme la realización de este posgrado y oportunidad de continuar creciendo profesionalmente.

A MSc.Wendy Beatriz Morgado Gamero, por sus consejos, asesorías, dedicación y respaldo durante el desarrollo de la presente investigación.

A los docentes del posgrado y aquellos que participaron en diferentes momentos de la realización de este proyecto.

A mis compañeros y amigos incondicionales durante esta maestría Carlos Guerra, Sebastián Rugeles y Ricardo Mejía por su apoyo incondicional, trasnochadas, y sobre todo el trabajo en equipo que siempre logramos.

A mis amigos y amigas, Madeleine Hernández, Carmen Vega, José Torres, Luis Jiménez, Jessica Guzmán, Cindy Roldan, Duvan Cervantes, Gina Mendoza, que con su amistad y apoyo moral aportaron ánimos para finalizar este proyecto.

Contenido

Agradecimientos	3
Contenido	4
Listado de Tablas	6
Listado de Figuras	7
Listado de Gráficos	8
Glosario	9
Resumen	11
Abstract	13
Introducción.....	15
Planteamiento del Problema.....	18
Justificación	20
Objetivos	22
Objetivo General	22
Objetivos Específicos.....	22
1. MARCO REFERENCIAL	24
1.1. Marco Teórico.....	24
1.2. Estado del Arte	43
2. METODOLOGIA	51
2.1 Área de estudio	51
2.2 Muestreo en el área de estudio	53
Puntos de Monitoreo.	53
2.3. Tubos pasivos para captación del Dióxido Nitrógeno.	56
2.3.1. Procedimiento:.....	58
2.3.2. Análisis de laboratorio:.....	61
2.4. Cálculo de impactos ambientales y efectos para la salud.....	62
3. Resultados y discusiones	65
3.1. Concentración de Dióxido de Nitrógeno NO ₂	65
3.2. Estrategias para disminuir las afecciones ambientales y enfermedades respiratorias por el NO ₂	79
4. Artículo publicado en revista de alto impacto	95

5. Conclusiones y recomendaciones 106
Bibliografía 110

Listado de Tablas

Tabla 1.....38

Tabla 2.....47

Tabla 3.....56

Tabla 4.....68

Tabla 5.....74

Tabla 6.....85

Tabla 7.....87

Listado de Figuras

Figura 1. Tamaños relativos de partículas Fuente: (Mackenzie-L-Davis-Y-Susan-J-Master, 2005)	26
Figura 2. Esquema del método de análisis: cadena causal de la contaminación.....	35
Figura 3. Función de impacto a la salud con respecto a un contaminante.	40
Figura 4. Pasos para calcular los impactos a la salud.	41
Figura 5. Ubicación de la Ciudad de Barranquilla. Fuente: Google Earth.	51
Figura 6. Ubicación de la selección de puntos para monitoreo en la ciudad de Barranquilla. Fuente: Google Earth.	55
Figura 7. Principio de los muestreadores pasivos tubos palmes para captación de NO ₂	57
Figura 8. Monitoreo con los muestreadores pasivos tubos palmes para captación de NO ₂	59
Figura 9. Concentración de Dióxido de Nitrógeno en la ciudad de Barranquilla.	66
Figura 10. principales problemas que aborda las principales causas y efectos de la contaminación del aire.	81
Figura 11. Producto, Artículo Publicado.....	95

Listado de Gráficos

Gráfica 1. Consideración para selección de puntos de monitoreos.....	54
Gráfica 2. Concentración de NO ₂ en puntos de monitoreos en la ciudad de Barranquilla.	66
Gráfica 3. Cumplimiento de la norma Res. 2254 del 2017.....	67
Gráfica 4. Cumplimiento de límites establecidos por la OMS.....	68
Gráfica 5. Número de casos por edad- sexo de frecuencia a enfermedades respiratorias en población de la ciudad de Barranquilla.	70
Gráfica 6. Reporte de enfermedades frecuentes en la población de Barranquilla para el 2019....	71
Gráfica 7. Población estudiada (Barranquilla dividida por localidades).....	73
Gráfica 8. Estudios a evaluar de las enfermedades presentes en Barranquilla.	75
Gráfica 9. Estimación de exposición a enfermedades por contaminación del aire.	76
Gráfica 10. Tasa de muertes por enfermedades asociadas a la contaminación del aire.	77
Gráfica 11. Porcentaje de evaluación con respecto al objetivo anual de reducción de enfermedades asociadas a la contaminación del aire.	78

Glosario

- **Aire:** es el fluido que forma la atmósfera de la Tierra, constituido por una mezcla gaseosa cuya composición normal es de por lo menos 20% de oxígeno, 77% de nitrógeno y proporciones variables de gases inertes y vapor de agua en relación volumétrica.
- **Atmósfera:** es la capa gaseosa que rodea a la tierra.
- **Contaminantes:** Son aquellos elementos, sustancias ya sean en medio sólido, líquido o gaseoso, causantes de efectos adversos en el medio ambiente, los recursos naturales renovables y la salud humana como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de éstas.
- **Contaminación Atmosférica:** es la presencia que existe en el aire de pequeñas partículas o productos secundarios gaseosos que pueden implicar riesgo, daño o molestia para las personas, plantas y animales que se encuentran expuestas a dicho ambiente.
- **Contaminantes Criterio:** son un grupo de contaminantes designados debido a su impacto a la salud humana y al ecosistema. Estos son: Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Azufre (SO₂), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Ozono (O₃) y material particulado (MP).
- **Emisión:** descarga de una sustancia o elemento al aire, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de estos, provenientes de una fuente fija o móvil.
- **Enfermedades respiratorias:** son afecciones a las vías respiratorias, incluidas las vías nasales, los bronquios y los pulmones. Incluyen desde infecciones agudas como la neumonía y la bronquitis a enfermedades crónicas como el asma y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica.

- **Emisión:** Descarga de una sustancia o elemento, en estado sólido, líquido o gaseoso, o en alguna combinación de estos, provenientes de una fuente fija o móvil.
- **Fuente de emisión:** Son aquellas actividades donde sus procesos u operaciones, emiten contaminantes al aire ya sea por maquinaria o por las actividades realizada por los seres humanos.
- **Fuente Fija:** fuente de emisión situada en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca en forma dispersa.
- **Fuente Móvil:** es la fuente de emisión que, por razón de su uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza.
- **Inmisión:** transferencia de contaminantes de la atmósfera a un “receptor”. Se entiende por inmisión a la acción opuesta a la emisión. Aire inmiscible es el aire respirable a nivel de la troposfera.
- **Monitoreo:** Proceso que consiste en una serie de actividades que apuntan a medir el cambio en los recursos de manera consistente.

Resumen

Actualmente, la contaminación en las ciudades ha aumentado trayendo como consecuencia el deterioro de la calidad del aire y efectos adversos a la salud humana. La ciudad de Barranquilla en los últimos años ha incrementado el parque automotor, portuario, crecimiento a nivel industrial y urbanístico, lo que conlleva al aumento de emisiones que generan la presencia del Dióxido de Nitrógeno (NO_2), el cual está asociado a enfermedades respiratorias, irritación ocular y del tracto respiratorio y tos.

En la presente investigación se realizó una evaluación de la afectación ambiental y enfermedades respiratorias asociadas al contaminante atmosférico Dióxido de Nitrógeno (NO_2) en la ciudad de Barranquilla. Fueron monitoreados 114 puntos, específicamente en las localidades Norte Centro Histórico y Riomar, utilizando Tubos de difusión pasiva de 71,0 mm de largo x 11,0 mm de diámetro interno preparado con 20% de TEA / agua, modelo DIF 100 RTU de Gradko®, para la medición de NO_2 . En cuanto al análisis de las enfermedades relacionadas con este contaminante se solicitó de estudios y registros epidemiológicos de las localidades de la ciudad, no obstante, el software BenMap-CE que permitió puntualizar aquellas localidades de la ciudad de Barranquilla que pueden ser afectadas por la concentración del contaminante Dióxido de Nitrógeno (NO_2).

Se registraron concentraciones con un valor máximo de $70,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y un valor mínimo de $0,57 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Algunos puntos sobrepasaron los umbrales permisibles establecidos por la OMS ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de media anual) y la normatividad nacional (Resolución 2254 del 2017, $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de media anual). En relación con las enfermedades que padecen los barranquilleros se encontró que la

población más vulnerable a enfermedades respiratorias son los comprendidos en el grupo de la primera infancia (7 días de nacido a 5 años 11 meses, 29 días) y de sexo femenino.

Por otro lado, el software BenMap-CE permitió el análisis la priorización de las zonas donde se requiere la implementación de políticas que conduzcan a la mejora de la calidad de aire. Siendo así, el desarrollo de estrategias enfocadas desde el aspecto técnico, económico, ambiental, político, social y administrativo son necesarias para que sean guía a esa mejora que requiere la ciudad.

Palabras Claves: *Dióxido de nitrógeno, enfermedades respiratorias, primera infancia, BenMap-CE.*

Abstract

Currently, pollution in cities has increased, resulting in the deterioration of air quality and adverse effects on human health. The city of Barranquilla in recent years has increased the number of automobiles, ports, industrial and urban growth, which leads to increased emissions that generate the presence of Nitrogen Dioxide (NO₂), which is associated with respiratory diseases, eye and respiratory tract irritation and coughing.

In this research, an evaluation of the environmental impact and respiratory diseases associated with the atmospheric pollutant Nitrogen Dioxide (NO₂) was carried out in the city of Barranquilla. 114 points were monitored, specifically in the North Historic Center and Riomar localities, using passive diffusion tubes 71.0 mm long x 11.0 mm internal diameter prepared with 20% TEA / water, model DIF 100 RTU from Gradko ©, for NO₂ measurement. Regarding the analysis of the diseases related to this pollutant, epidemiological studies and records of the cities of the city were requested, however, the BenMap-CE software that allowed to specify those localities of the city of Barranquilla that may be affected by the concentration of the pollutant Nitrogen Dioxide (NO₂).

Concentrations were recorded with a maximum value of 70.27 µg / m³, and a minimum value of 0.57 µg / m³. Some points exceeded the permissible thresholds established by the WHO (40 µg / m³ annual average) and national regulations (Resolution 2254 of 2017, 60 µg / m³ annual average). In relation to the diseases suffered by Barranquilleros, it was found that the population most vulnerable to respiratory diseases are those comprised in the early childhood group (7 days from birth to 5 years, 11 months, 29 days) and female.

On the other hand, the BenMap-CE software allowed the analysis of the prioritization of the areas where the implementation of policies that lead to the improvement of air quality is required. Thus, the development of strategies focused from the technical, economic, environmental, political, social and administrative aspects are necessary to be a guide to the improvement that the city requires.

Key Words: Nitrogen dioxide, respiratory diseases, early childhood, BenMap-CE.

Introducción

La contaminación atmosférica se define como la presencia de elementos contaminantes en la atmósfera que alteran su composición y que afectan a cualquier componente del ecosistema. Desde un punto de vista antropocéntrico, la contaminación atmosférica se refiere a los contaminantes que afectan la salud o el bienestar humano y el medio ambiente. (Celis, Morales, Zaror, & Carvacho, 2007). Según su origen los contaminantes se clasifican en antropogénicos, derivados de la actividad humana, o naturales, resultantes de procesos de la naturaleza, por ejemplo, erupciones volcánicas o polen en suspensión. (Celis et al., 2007).

La contaminación del aire es una problemática que cada día aumenta por las diferentes actividades en áreas urbanas o rurales causando afecciones a corto, mediano y largo plazo en distintos ámbitos en los que se desenvuelve el ser humano.

A su vez esta contaminación, trae consigo diversas enfermedades respiratorias que por hoy se han incrementando, en especial en poblaciones más vulnerables. Es así como el tema de contaminación del aire se ha convertido en foco de diferentes investigaciones donde se resalta una relación entre la salud pública y los efectos que este puede traerle.

Diferentes organizaciones mundiales vienen trabajando en encontrar diversas fuentes que causan enfermedades por condiciones ambientales, entre las cuales están los contaminantes atmosféricos. Éstos basados en investigaciones han estimado que nueve de cada diez personas respiran aire con altas concentraciones de contaminantes asociados a ambientes exteriores e interiores por las actividades que se realizan en el día a día.(OMS, 2018).

En el ambiente existen diversos contaminantes atmosféricos causados en su mayoría por el sector industrial, comercial, parque automotor, entre otro, sin embargo, para esta investigación se analizará el contaminante atmosférico Dióxido de Nitrógeno (NO₂), causante de alteraciones en el

ecosistema, efectos en la salud de la población, daños a materiales y patrimonio, los cuales se generan en procesos de combustión a través de una combinación del Nitrógeno y el Oxígeno del aire a elevadas temperaturas.

La concentración de Óxidos de Nitrógeno en la atmósfera baja de una región determina la calidad del aire que hay en ella. Los óxidos de Nitrógeno, y particularmente el Dióxido de Nitrógeno (NO₂), pueden impactar negativamente en la salud humana y contribuir a la degradación del medio ambiente por generación de lluvia ácida y formación del smog fotoquímico. (Alves & Sócio-espacial, 2013).

Los efectos sobre la salud en algunas ocasiones se dan a las distintas exposiciones ambientales, las cuales han sido vinculadas a efectos negativos en las personas que van desde molestias transitorias en las vías respiratorias, reducción de la capacidad pulmonar, disminución de la actividad laboral, admisiones hospitalarias, enfermedades respiratorias agudas y crónicas e incluso hasta llegar a la muerte, es así, como este tema ha sido de interés creciente en los profesionales de salud pública, medio ambiente y salud ambiental que han tomado medidas investigativas que contribuyan a la disminución o presencia de enfermedades causadas por la contaminación atmosférica.

Hay estudios que permite analizar la relación entre la contaminación del aire y enfermedades como la rinitis, asma, dermatitis atópica, cardiovasculares, enfermedades respiratorias agudas y crónicas, mortalidad, afecciones en prematuros, entre otros, (Molina Esquivel, Enrique, & Meneses Ruiz, 2003) y para ello han trabajado en modelos estadísticos que permiten evaluar los casos de una determinada enfermedad o efecto hacia la salud de una población estudio con respecto a la contaminación atmosférica. Para poder realizar la estimación cuantitativa de efectos para la salud, es necesario conocer indicadores que evidencien el estado de la población estudio, como lo son la tasa de incidencia, la tasa de mortalidad de la población, tasa de prevalencia

y en algunos casos se considera aquellos de epidemiología ambiental enfocados en los estudios clínicos. (Jorquera, 2018).

No obstante, para realizar el cálculo de relación con una enfermedad, se requiere de la concentración del contaminante atmosférico a estudiar (NO_2), el cual puede ser monitoreado por equipos portátiles pasivos como son los tubos de difusión pasiva (utilizados dentro del presente trabajo) los cuales son livianos, económicos y no necesitan mantenimiento, energía en el sitio ni bombeo, entre otras ventajas; sin embargo, también existen equipos automáticos que ayudan a la concentración en un punto determinado por tiempos de monitoreos más largos y fijos.

Por medio del presente trabajo se busca evaluar las afecciones ambientales y enfermedades respiratorias que causa el contaminante atmosférico NO_2 sobre la población de Barranquilla, en ello se implementará la metodología basada en el monitoreo pasivo en 114 puntos en total, para evaluar este contaminante por un periodo de dos semanas, así mismo, utilizando tubos de difusión para la captación del NO_2 .

Con respecto a la metodología para la determinación de las enfermedades respiratorias y afectación ambiental, se utilizará el programa BenMAP-CE que calcula el número y el valor económico de las muertes y enfermedades relacionadas con la contaminación del aire, relaciona el cambio en la concentración de la contaminación con ciertos efectos sobre la salud, y a su vez los cambios que experimenta la población con respecto a la exposición, con el fin de calcular los impactos en la salud de los Barranquilleros.

Planteamiento del Problema

Colombia en estos últimos años ha venido trabajando en mejorar la calidad del aire, por ello el gobierno nacional ha buscado estrategias para mejorar este ámbito en el país. Uno de ellos es reducir la concentración de contaminantes en el aire que afectan la salud y el ambiente, las emisiones provenientes de fuentes móviles y fijas y la mejora de estrategias de prevención, reducción y control de la contaminación del aire.(CONPES, 2018).

A partir de lo anterior, cada una de las principales ciudades del país, ha venido implementando monitoreos, estrategias para cumplir con el reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire, lo cual esta unificado en el Decreto 1076 del 2015.

Actualmente Barranquilla tiene una red de monitoreo de calidad de aire conformada por tres estaciones, dos de ellas son fijas y una es móvil, las cuales se encuentran ubicadas en áreas estratégicas del Distrito; estas ayudaran a verificar el cumplimiento de normas ambientales y trabajar en la gestión de alertas por contaminación atmosférica.

Barranquilla, en los últimos años ha incrementado su economía a nivel comercial, industrial y parque automotor, sin embargo, así como la economía ha aumentado el crecimiento de la población y urbanismo también, lo cual lleva al aumento del desgaste de los recursos naturales y el aumento de contaminante suspendidos en el aire.

La contaminación del aire en áreas urbanas, es causa de enfermedades respiratorias en la población más vulnerable (niños, mujeres embarazadas y ancianos). Es común que se usen como indicadores de contaminación, contaminantes criterio como: material particulado (PM10, PM2.5), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Ozono (O₃), Dióxido de Azufre (SO₂). (Galvis, Boris, & Rojas, 2006).

Es así, como Barranquilla puede experimentar altas concentraciones de Dióxido de Nitrógeno (NO₂), y problemas de salud por contaminación del aire, siendo así la primera línea afectada la población barranquillera.

En tal sentido, el Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA), entrega de informes que revela aquellas partículas de emisiones por las diferentes actividades realizadas en la ciudad de Barranquilla y que están relacionadas con efectos sobre la salud de los habitantes.

Es por esto por lo que esta propuesta está dirigida a realizar una investigación que permita generar conocimiento dando respuesta al interrogante principal:

¿Mediante la aplicación de monitoreo pasivo y análisis computacional es viable evaluar la afectación ambiental y enfermedades respiratorias asociadas al Dioxido de Nitrogeno NO₂ en Barranquilla?

Justificación

Las actividades que desarrolla el ser humano en la tierra ha permitido el progreso de la humanidad hasta alcanzar los niveles inconmensurables que existen en la actualidad, trayendo consigo el deterioro de los recursos naturales. Sin embargo, y bajo ciertas condiciones el avance tecnológico y de las relaciones entre los grupos humanos, puede ocasionar diversas alteraciones en la salud.(Noriega Elío, Mariano, Franco Enríquez, Jesús Gabriel, Montoya Ruiz, Aishshah, Garduño Andrade, María de los Ángeles, León Cruz, Laura Elena, Martínez Alcántara, Susana, & Cruz Flores, 2009).

El Dióxido de Nitrógeno (NO₂) es uno de los contaminantes atmosféricos que causa afectaciones al medio ambiente y a la salud, y por lo tanto ha sido uno de los que ha influido en el calentamiento global, debido a que sus niveles han aumentado en los últimos años a causa de las actividades antropogénicas, que lo convierte en uno de los contaminantes para la formación de la lluvia ácida.

En las grandes ciudades esto ha generado graves problemas debido a las principales fuentes de emisiones antropogénicas que liberan Dióxido de Nitrógeno (NO₂) en procesos de combustión en vehicular, calderas industriales y entre otro. No obstante, en áreas urbanas con alta densidad de población son aquellos con mayores emisiones de contaminantes atmosféricos, lo que genera inquietud por el aumento de la mortalidad y la morbilidad (Weichenthal, S., Crouse, D. L., Pinault, L., Godri-Pollitt, K., Lavigne, E., Evans, G., ... & Burnett, 2016).

Establecer directrices para prevenir y mitigar efectos a la salud por altas concentraciones de emisión del Dióxido de Nitrógeno, es importante para que las condiciones del medio ambiente se aptas para los habitantes de la ciudad en estudio.

Los gobiernos a nivel nacional están en constante control para dar un buen manejo a esas elevaciones de concentración de contaminantes atmosféricos, debido a que se han relacionado enfermedades con respecto a altas concentraciones de emisiones hacia el aire. Es así, como Colombia busca mejoras que se encaminen a un aire saludable, promoviendo el uso de tecnologías limpias y consolidación de la estrategia nacional para la gestión de la calidad del aire. (Ministerio de Ambiente, 2010).

Actualmente Colombia presenta en el Plan de Desarrollo Nacional 2018-2022 objetivos encaminados hacia la mejora en la calidad del aire del territorio y propone metas de vigilancia donde estipula pasar de 22 % a 35 % de las estaciones de monitoreo en el país con el fin de dar cumplimiento a lo regulado por la OMS.(Gobierno de Colombia, 2018).

El Distrito de Barranquilla, se destaca por su crecimiento económico y el aumento sin precedentes en las industrias, comercio, infraestructura urbanística, y el aumento vehicular, el cual conlleva al aumento de la población, que en vista a este crecimiento se observa la probabilidad de que los problemas de salud pueden verse afectados directamente por la contaminación del aire. Es así como analizar la calidad de aire de la ciudad nos puede conducir a la proposición de implementar estrategias que permitan disminuir casos de enfermedades respiratoria en su población.

No obstante, es importante la realización de investigaciones encaminadas a la línea de epidemiología ambiental (calidad de aire), para generar bases o datos de las concentraciones de diversos contaminantes con relación a las enfermedades asociadas a las mismas.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar las afecciones ambientales y enfermedades respiratorias que causa el contaminante atmosférico NO₂ sobre la población de Barranquilla.

Objetivos Específicos

- Evaluar la concentración del contaminante atmosférico NO₂ en la ciudad de Barranquilla.
- Identificar las enfermedades asociadas al sistema respiratorio que causan mortalidad o afectan a las actividades de los barranquilleros.
- Correlacionar de la concentración del contaminante NO₂ con las enfermedades respiratorias más frecuentes en los barranquilleros.
- Desarrollar estrategias que permitan disminuir las afecciones ambientales y enfermedades que se presentan en Barranquilla por causa del contaminante NO₂.

Marco referencial

Capitulo 1

1. MARCO REFERENCIAL

1.1. Marco Teórico

La atmosfera, se considera como una mezcla de gases, compuesta principalmente por nitrógeno y oxígeno, que sustenta la vida en la tierra siendo posible la ejecución de los procesos biogeoquímicos en el planeta, sin embargo, la atmosfera permite que toda partícula pueda transportarse en el aire, cambiando su localización geográfica por medio de la dispersión, condiciones meteorológicas.

No obstante, la modificación de la composición de la atmósfera por causas antropogénicas o naturales altera la calidad del aire, a la vez que puede causar cambios en el clima. (Xavier Querol, 2008), Por tanto en lo referente a la perturbación de la composición de la atmósfera se distinguen escalas: las escalas local, regional y de larga distancia, en las que el deterioro de la calidad del aire o el aporte de determinados contaminantes puede tener repercusiones negativas sobre los ecosistemas y sobre la salud humana.

La contaminación del aire es un asunto que se ha dimensionado a diferentes escalas, por lo que se debe al crecimiento urbano, actividades humanas, fuentes industriales y móviles, que contribuyen al deterioro de la calidad del aire, traen efectos como el aumento de la concentración de los contaminantes atmosféricos, y a su vez se vuelve en un grave problema ambiental en muchos países y es debido al rápido desarrollo de la industrialización y la urbanización en las últimas décadas.(Amoatey, Omidvarborna, Baawain, & Al-Mamun, 2019; Jinhong Xian, Dongsong Sun, Wenjing Xu, Yuli Han, Jun Zheng, Jiancao Peng, 2020).

La mayoría de estos contaminantes atmosféricos son considerado como sustancias que son producidas por el consumo de combustibles fósiles en motores de combustión interna como (automóviles, buses, camiones, plantas de energía, termoeléctricas, maquinaria industrial, entre otros), todas estas fuentes antropogénicas. No obstante, podemos encontrar contaminación atmosférica de origen natural como erosión de suelo, evaporación del agua del mar, erupciones volcánicas e incendios forestales y también producidas algunas por el hombre como las quemas indiscriminadas. Es así, como (Jorquera, 2018), define que la contaminación atmosférica *“una mezcla compleja de una gran variedad de sustancias producidas por la combustión incompleta en procesos antropogénicos pero también existen contribuciones de origen natural”*.

A su vez esta contaminación trae consigo muchas de las enfermedades respiratorias que por hoy van incrementando en especial en las poblaciones más vulnerables. A partir de lo anterior, este tema se ha convertido en una de las principales preocupaciones de salud pública y de organizaciones mundiales.

1.1.1. Contaminantes Criterios.

Los contaminantes criterio son sustancias que se liberan en grandes cantidades de gran variedad de fuentes y presentan un riesgo a la salud y bienestar humano.(García-Reynoso, Grutter, & Cintora-Juárez, 2007). Los contaminantes criterio, son un grupo de contaminantes designados debido a su impacto a la salud humana y al ecosistema, entre los cuales encontramos Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Azufre (SO₂), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Ozono (O₃) y material particulado (MP). Los efectos que causan estos contaminantes principalmente son agudos y no cancerígenos.

De los efectos agudos, se ha identificado que el incremento en la concentración ambiental de partículas (PM₁₀) y ozono se encuentran relacionadas a un incremento en la tasa de mortalidad prematura. (De Pablo et al., 2006).

Estos contaminantes según su tamaño, las partículas se depositan cerca o a cierta distancia de la fuente de emisión. Si son muy pequeñas pueden mantenerse suspendidas y ser transportadas a grandes distancias. Dentro de las partículas suspendidas se denomina “respirables” a las de un diámetro menor o igual a 10 μm (PM₁₀) por su capacidad de introducirse en las vías respiratorias. (OYARZÚN G, 2010).

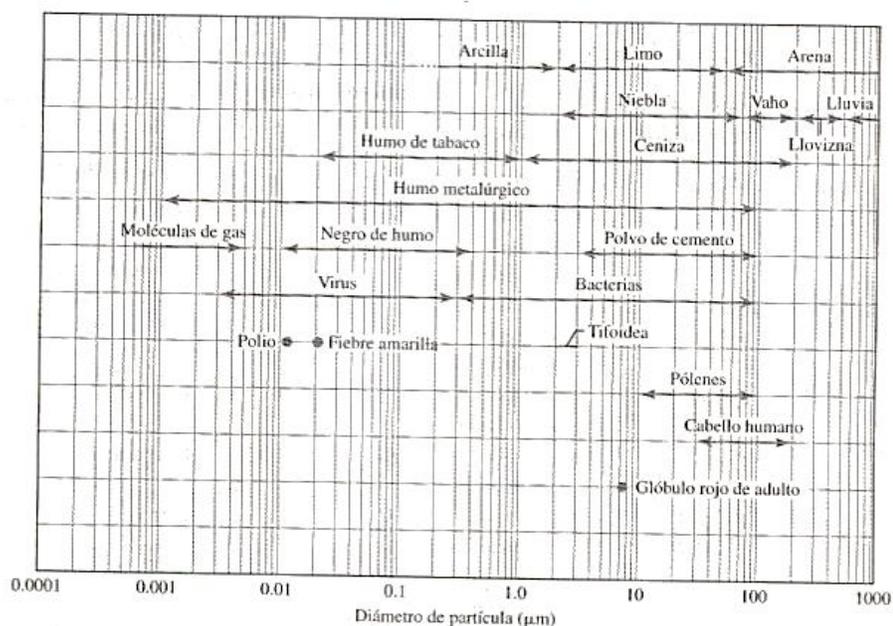


Figura 1. Tamaños relativos de partículas **Fuente:** (Mackenzie-L-Davis-Y-Susan-J-Master, 2005)

La EPA Environmental Protection Agency, (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos), describe los efectos de distintos contaminantes del aire que emiten las fuentes fijas o móviles y que pudieran afectar en forma adversa la salud humana o el ambiente. La EPA uso estudios para establecer normas de estadounidenses de calidad del aire, normas aplicables al aire ambiental. (Mackenzie-L-Davis-Y-Susan-J-Master, 2005).

Uno de los contaminantes criterios o que resalta entre los que afecta la calidad del aire encontramos el dióxido de nitrógeno (NO_2) un gas amarronado que es producido directa e indirectamente por la combustión a altas temperaturas, por ejemplo, en automóviles, plantas termoeléctricas, fundiciones, entre otros. (Sbarato, Dario, 2015). Sin embargo, el dióxido de nitrógeno (NO_2) al ser uno de los contaminantes ubicuos en el aire ambiente que presenta efectos adversos documentados sobre la salud y el bienestar.

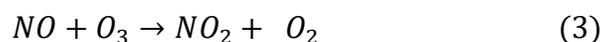
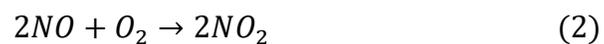
1.1.2. Dióxido de Nitrógeno (NO_2)

Los óxidos de nitrógeno son emitidos a la atmósfera principalmente en forma de NO, el cual es subsecuentemente transformado en NO_2 y otras especies de nitrógeno. Los NO_x son producidos por fenómenos naturales o por fuentes antropogénicas durante procesos de combustión a altas temperaturas.(Torre-López, 2011).

El Dióxido de Nitrógeno se encuentra en forma gaseosa y se presenta cuando los combustibles fósiles se queman a alta temperatura y se oxida el nitrógeno presente en el aire de combustión. Estos normalmente provienen principalmente de gases de combustión de vehículos, así como de fuentes estacionarias tales como generadoras térmicas y calderas industriales.(Jorquera, 2018). Este contaminante es un gas irritante de color café, que se comporta

en el ambiente como un fuerte agente oxidante, y reacciona en el ambiente para formar ácido nítrico, así como nitratos orgánicos como el peroxyacetilnitrato (PAN). (Jorquera, 2018).

Durante la mezcla inicial del aire con los gases de escape calientes, se oxida parte del NO (ecuación 1). Las reacciones fotoquímicas son las de mayor conversión de NO a NO₂ (ecuaciones 2-5).(Torre-lópez, 2011)



Ecuación 1. reacciones fotoquímicas de NO a NO₂ **Fuente:**(Torre-lópez, 2011).

El NO_x en la atmósfera reacciona en presencia de la luz solar para formar O₃, uno de los contaminantes criterios para el que se han establecido Normas Nacionales de la Calidad del Aire Ambiental, sobre la base de efectos en la salud.(de Hoogh et al., 2016). Estos óxidos son precursores en la formación de ozono troposférico, debido a que los procesos de combustión representan el 74% de las fuentes antropogénicas de óxidos de nitrógeno; no obstante, considerando lo anterior se toma como un factor de riesgo para el desarrollo de enfermedades respiratorias (Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2009).

El Dióxido de Nitrógeno (NO_2) es un contaminante atmosférico cuyas fuentes fundamentales son el tráfico vehicular, así como las emisiones de determinadas industrias y de calefacciones de carbón (en desuso actualmente).

Sus niveles en la atmósfera están aumentando en los últimos años por la mayor utilización de gasolina diésel. Su presencia en el aire contribuye a la formación y modificación de otros contaminantes atmosféricos tales como el ozono y las partículas en suspensión (PM10 y PM 2,5).(Madrid Salud, 2016).

Si bien las técnicas estándar de monitoreo de NO_2 requieren instrumentos costosos, los muestreadores difusivos, también llamados muestreadores pasivos, son livianos, económicos y no necesitan mantenimiento, energía en el sitio y bombeo. (Alatorre & Llanos, 2014).

1.1.3. Medición de concentración del Dióxido de Nitrógeno.

Las concentraciones atmosféricas de dióxido de nitrógeno (NO_2) son medidas indirectamente por fotometría midiendo la intensidad de luz, en longitudes de onda mayor a 600 nanómetros, como resultado de la reacción quimioluminiscente de óxido nítrico (NO) con Ozono (O_3). (Ayres, Robert Maynard, 2006).

Existen diferentes medidores para la captación de la concentración del Dióxido de Nitrógeno (NO_2) y la mayoría analiza bajo la quimioluminiscencia para NO/ NOX / NO_2 responderán a otros compuestos que contengan nitrógeno como Peroxiacetil Nitrato (PAN), que pueda ser reducido a NO en el convertidor térmico.(Amoatey et al., 2019) En ciertas áreas geográficas, donde la concentración de estas interferencias es conocida o se sospeche que sean altas

con relación al NO₂, se recomienda el uso de un método equivalente para la medición de NO₂.(IDEAM, 2010).

Dentro de los tipos de muestreadores podemos considerar que encontraremos:

- **Muestreadores pasivos:** son en general un sustrato químico en el cual se pueden absorber y adsorber diferentes contaminantes. Son especialmente indicados en casos de estudios de dosis personales por exposición a atmósferas contaminadas. El sustrato químico es elegido para un contaminante en particular. (Sbarato, Dario, 2015)
- **Muestreadores activos:** necesitan de un suministro de energía eléctrica para su funcionamiento. Se basan en una bomba que fuerza un controlado volumen de aire a pasar a través de un medio colector. La diferencia más importante respecto a los muestreadores pasivos es que tienen mayor sensibilidad y mayor resolución temporal.(Sbarato, Dario, 2015)
- **Monitores automáticos:** son activos, aunque, como su nombre lo indica, funcionan con controles automatizados.(Sbarato, Dario, 2015)

Si bien las técnicas estándar de monitoreo de NO₂ requieren instrumentos costosos, los muestreadores difusivos, también llamados muestreadores pasivos, son livianos, económicos y no necesitan mantenimiento, energía en el sitio y bombeo. (Alatorre & Llanos, 2014).

Al tratar de conocer las concentraciones del NO₂, y analizar la difusión molecular de este contaminante, los muestreadores pasivos ofrecen un medio simple y rentable para medir los contaminantes del aire para el monitoreo del nivel ambiental de NO₂ en todo el mundo. La muestra de difusión más simple es la muestra de tipo tubo introducida por primera vez por Palmes et al. (Mecánica, Por, & Diego Cruz Freire Darwin Vinicio Chimbo Chimbo, 2015), estos tubos

anteriores usan trietanolamina (TEA) como absorbente.(de Jesús Torres Noreña, Montoya Izquierdo, & Guillermo Castaño González, 2009).

En el presente trabajo se utilizó muestreadores pasivos, por lo que son simples y rentables para medir los contaminantes del aire para el monitoreo del nivel ambiental.

Medición por tubos de difusión pasiva: Los muestreadores pasivos se diseñan generalmente ya sea en una configuración tipo tubo con un extremo abierto (los llamados "tubos Palmes"); o en una configuración más corta tipo insignia, donde el extremo abierto está protegido por un filtro de membrana u otra pantalla contra el viento. (de Jesús Torres Noreña et al., 2009). En cualquier caso, el extremo cerrado contiene un absorbente para las especies gaseosas que se controlarán. Varios tipos diferentes de tubos de difusión comerciales están disponibles en el mercado en los últimos tiempos.(de Jesús Torres Noreña et al., 2009).

Son útiles para identificar áreas de alta concentración de NO₂, especialmente cuando se trata de fuentes como las emisiones de tráfico, que no cambian mucho de un día a otro. Son menos útiles para monitorear las concentraciones ambientales alrededor de fuentes de emisión específicas, como las plantas industriales, ya que no pueden identificar fluctuaciones a corto plazo en el NO₂, como puede ser el resultado de fluctuaciones en la dirección del viento.(Yang et al., 2019b).

Los tubos de difusión están hechos de plástico transparente, con un tapón de goma en cada extremo. Diseñado para el control pasivo del NO₂ gaseoso en el aire. Trabajan mediante la recopilación de información sobre el NO₂ mediante una malla de acero recubierta con un químico llamado Trietanolamina (TEA), que se encuentra en el extremo del tubo.

La TEA absorbe el nitrógeno del aire cuando se quita el tapón blanco y el análisis de laboratorio puede mostrar los niveles de contaminante en el aire (los tubos de N.B. deben colocarse

siempre para permitir que el aire circule libremente). Los resultados proporcionan un promedio durante el período en que el tubo se expuso al medio ambiente.(Mecánica et al., 2015).

Los tubos de difusión funcionan mediante un proceso denominado difusión molecular, durante este proceso, los compuestos se moverán desde un área de alta concentración a un área de baja concentración, debido a que en el aire están se encuentra a una concentración más alta que los del tubo, por lo que los compuestos se difunden en el tubo y se acumulan en el absorbente al final del tubo.(Thomas & Devasthale, 2017).

Debido a que los compuestos se absorben, se mantiene la baja concentración en el tubo y, por lo tanto, la difusión continúa. La tasa de movimiento de los compuestos en el tubo se denomina tasa de absorción. Esta es una tasa conocida y se utiliza en los cálculos durante el análisis.

El principio básico sobre el que operan los muestreadores de tubos de difusión es el de la difusión molecular, con moléculas de un gas que se difunden desde una región de alta concentración (extremo abierto del muestreador) a una región de baja concentración (extremo absorber del muestreador). El movimiento de las moléculas de gas a través del gas se rige por la ley de Fick, que establece que el flujo es proporcional al gradiente de concentración.(Thomas & Devasthale, 2017). Se utilizan diversas técnicas de análisis para los diferentes tubos de difusión.

El laboratorio determina la concentración de compuestos en el momento (en este caso, UV / visible utilizando un espectrofotómetro). Esto se usa luego en un cálculo con la tasa de absorción para calcular la concentración promedio de compuestos que estaban presentes en el aire durante el período de monitoreo.(Mecánica et al., 2015).

1.1.4. Dióxido de Nitrógeno y Efectos en la Salud

El contaminante atmosférico Dióxido de Nitrógeno (NO_2), es uno de los contaminantes que causa muchas afectaciones al medio ambiente y a la salud, y por lo tanto ha sido uno de los que ha influido en el calentamiento global, debido a que sus niveles han aumentado en los últimos años a causa de las actividades antropogénicas, que lo convierte en uno de los contaminantes para la formación de la lluvia ácida. (Gutiérrez Oyarce et al., 2018).

El Dióxido de Nitrógeno (NO_2) es un gas contaminante que se encuentra en el aire ambiental, derivado principalmente del tráfico, y es considerado como un factor de riesgo para el desarrollo de enfermedades respiratorias. (Gutiérrez Oyarce et al., 2018).

Genera daño agudo, inflamación e hiperreactividad bronquial, y un desequilibrio en la respuesta inmunitaria Th1/Th2 con predominio de esta última, característico del asma. Además, la exposición prenatal al NO_2 también se asocia con infecciones respiratorias y desarrollo de asma durante la niñez.(Gutiérrez Oyarce et al., 2018). Estudios previos han observado una relación entre la exposición a la contaminación atmosférica y los síntomas respiratorios hasta el año de edad, sin embargo, la (OMS, 2018), comenta en estudios epidemiológicos revelando que los síntomas de bronquitis en niños asmáticos aumentan en relación con la exposición prolongada al NO_2 .

Los efectos observados en la salud se podrían haber asociado también con otros productos de la combustión, como las partículas ultrafinas, el óxido nitroso (NO), el material particulado o el benceno. Aunque en varios estudios, realizados tanto en espacios abiertos como cerrados, se ha tratado de concentrar la atención en los riesgos del NO_2 para la salud, a menudo es difícil descartar la contribución de los efectos de estos otros contaminantes, muy relacionados con él.(Organización Mundial de la Salud (OMS), 2005).

La exposición a concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO₂) mayores a 5ppm durante 15 minutos causa tos e irritación del tracto respiratorio. (Carslaw, Murrells, Andersson, & Keenan, 2016), por lo cual al transcurrir este tiempo de exposición produce una acumulación anormal de fluidos en el pulmón (edema pulmonar), lo cual esto se asocia a que la concentración promedio de dióxido de nitrógeno (NO₂) es parecido al consumo del humo del tabaco que representa la misma concentración de 5ppm. (Hassoun, James, & Bernstein, 2019).

Se han asociado pequeños aumentos de enfermedades respiratorias y disminuciones de la función pulmonar a concentraciones aproximadamente de 0.01 ppm. (Mackenzie-L-Davis-Y-Susan-J-Master, 2005). Todavía no se cuenta con una base sólida que permita establecer un valor guía medio anual para el NO₂ mediante cualquier efecto tóxico directo. Sin embargo, se han obtenido pruebas que hacen aumentar la preocupación por los efectos en la salud asociados con mezclas de contaminación del aire de espacios abiertos que contienen NO₂.(OMS, 2018).

Dentro de otras consideraciones al momento de evaluar y correlacionar las enfermedades asociadas al dióxido de nitrógeno (NO₂), es importante considerar los lapso o plazos para que los efectos sean visible. En cuanto a los efectos de corto plazo se ha investigado que una exposición continua a este contaminante la primera línea afectada poblacionalmente son los niños, mientras que, si se evalúa a largo plazo, se considerara otras enfermedades que tal vez estas puedan derivarse de este mismo contaminante o que la persona ya este expuesta a varios contaminantes criterios.

Sin embargo, para realizar una estimación cuantitativa de los efectos en la salud, es importante conocer los indicadores como el estado de salud de las personas. Para ello es necesario definir la tasa de incidencia el cual corresponde al número de casos o enfermedad o síntoma por unidad de población y de tiempo. (Jorquera, 2018). Normalmente se asume la tasa de incidencia que mide una zona dada y que cuenta con múltiples variables como lo son estado nutricional de la

población, hábitos, acceso a atención en salud, variables de contaminación ambiental y tasa de mortalidad, aunque esta última siempre es medida bajo la tasa de incidencia de una población. (Molina Esquivel, Enrique, & Meneses Ruiz, 2003).

Para analizar mejor como es esa cadena causal del emisor al receptor es importante el método de análisis o cadena causal de contaminación en la cual tenemos:

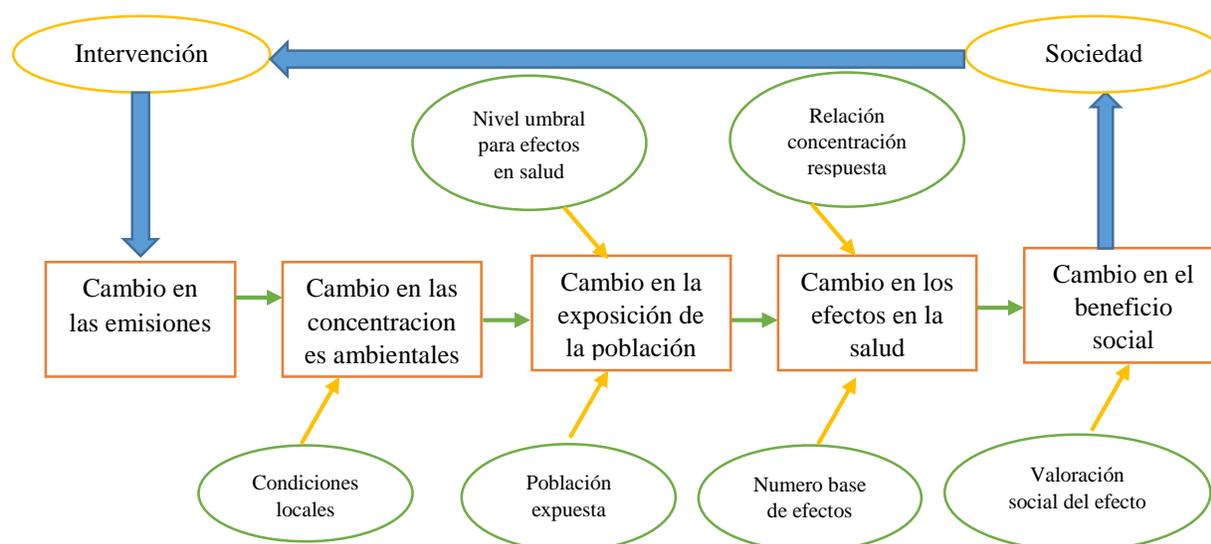


Figura 2. Esquema del método de análisis: cadena causal de la contaminación.

Fuente: (Jorquera, 2018)

El esquema permite apreciar los problemas de una mala calidad del aire en cualquier zona ya sea rural, urbana e industrial, el cual está influenciado al incremento excesivo de las emisiones de contaminantes, las que llevan a mayores concentraciones de contaminantes en la atmosfera. Es de este modo, que se puede apreciar varios efectos negativos,(Jorquera, 2018) que dependiendo de su receptor afectado en:

- Efectos en la salud de la población.
- Alteración en ecosistemas y agricultura.
- Daños a materiales y patrimonio cultural.
- Resultados estéticos (perdida de visibilidad).

Si bien, el dióxido de nitrógeno no solo afecta a la salud en la población si no a un conjunto de alteraciones del medio donde desarrollamos nuestras actividades, pero sin duda la más importante son los efectos a la salud de la población expuesta por lo que nos concentramos solo en ellos.

Modelo de Poisson: Para lograr la estimación de los beneficios sociales que tendrían las normas en primera instancia en relación a la calidad del aire, un análisis de riesgo cuantitativo es la vía para ser analizado, el cual consiste en una modelación cuantitativa de la relación entre la concentración de los contaminantes (NO₂, SO₂ y O₃) y la exposición de la población a estos contaminantes, efectos en salud (agudos o crónicos) y valoración económica de dichos efectos en salud, los cuales serían una medida de los daños dados por las actuales concentraciones de contaminantes.(Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2009).

Para estimar los casos de una determinada enfermedad o efecto en salud que se observa en la población se utilizan ecuaciones basadas en los modelos de Poisson, este modelo estadístico es ampliamente usado en estudios epidemiológicos longitudinales (tales como los estudios que asocian mortalidad diaria con las concentraciones de contaminantes). Usando este modelo, se puede calcular el número esperado de casos asociado a una determinada concentración de contaminantes basados en la siguiente ecuación(Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2009)(Jorquera, 2018):

$$E[\text{Efectos } (C_i)] = \text{Tasa}((C_i = 0) * \text{Población} * (\exp(\beta_i \Delta C_i) - 1)$$

Ecuación 2. Modelo de Poisson (efectos de corto plazo) Fuente:(Jorquera, 2018)(Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2009).

Donde:

- **Tasa** (ci=0): Tasa base de los efectos. Cantidad de efectos en salud observados por unidad de tiempo para el caso que la concentración de contaminante *i* sea cero.
- **Población:** número de habitantes de la población en estudio y que se encuentra expuesta al contaminante *i*.

El factor $(\exp(\beta_i \Delta C_i) - 1)$ estima el porcentaje o fracción de aumento del número de casos asociados a la reducción en concentración de contaminantes C_i . (Jorquera, 2018). En este caso consideramos una diferencia entre las condiciones actuales y niveles de concentración de **cero**, esto es, se evalúa el riesgo total de estar expuesto a los niveles actuales de contaminantes y son comparados con una situación en que no hubiera contaminantes. El valor β_i proviene de los estudios epidemiológicos publicados e implica el aumento en la tasa de enfermedad por cada aumento en la concentración de contaminantes.(Comisión Nacional del Medio Ambiente, 2009).

Es importante resaltar que los efectos sobre la salud causados de la contaminación atmosférica por NO₂ (dióxido de nitrógeno) no pueden valorarse de manera aislada. Dado su origen del tráfico urbano, los niveles elevados de NO₂ pueden ir acompañados de niveles altos de partículas en suspensión, así como de otros contaminantes como los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos o los metales pesados.(OYARZÚN G, 2010).

La guía actual de la OMS para NO₂ incluye valores para la exposición de corto y largo plazo. Primeramente, existe un valor guía de corto plazo para el promedio de 1 hora de 110 ppb

[200 µg/m³]. El estándar de largo plazo es anual y corresponde a un promedio de concentraciones de 21 ppb [40 µg/m³]. (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2005).

Riesgo relativo para el modelo estándar. Es el riesgo relativo (RR) está asociado a un cambio en la calidad del aire ΔC como el coeficiente entre la tasa de incidencia del efecto en la salud y un valor de referencia luego (Jorquera, 2018):

$$RR = \frac{y_2}{y_1} = e^{\beta*(C_2-C_1)} = e^{\beta*\Delta C} \quad \text{o} \quad \beta = \frac{\ln(RR)}{\Delta C}$$

Ecuación 3. Riesgo Relativo para el modelo estándar Fuente: (Jorquera, 2018)

Esta define la relación entre el riesgo relativo y el coeficiente de la relación C-R para el modelo estándar. Esta ecuación indica el análisis epidemiológico ambiental de la concentración con respecto al riesgo de mortalidad total en la población estudio. (Jorquera, 2018)

Riesgo relativo en un contexto general. El concepto del riesgo relativo es más amplio, ya que se trata de una herramienta eficaz para efectuar el análisis comparativo de efectos en la salud. (Jorquera, 2018). Es una manera de comparar los resultados de un estudio para una contingencia en la cual comparan los casos de presencia o ausencia de enfermedad y exposición ambiental.

Tabla 1.

Tabla de contingencia en estudio epidemiológico.

Exposición	Número de personas	
	Afectadas (*)	No afectadas(*)
Grupo estudiado	a	b
Grupo de control de referencia	c	d

Fuente: (Jorquera, 2018).

Por lo tanto:

$a/(a+b)$ = la tasa de incidencia de la enfermedad del grupo estudiado

$c/(c+d)$ = refiere a toda la población, representada en por condiciones específicas como (épocas de mejor calidad del aire, luego de un periodo de contaminación).

En los últimos años el aumento de estudios epidemiológicos ambientales ha sido de gran interés debido a la relación que existe entre los contaminantes atmosféricos y los efectos en la salud, relacionando mortalidad prematura, cáncer de pulmón, hospitalizaciones, enfermedades cardiovasculares, visitas constantes al médico, entre otras.

No obstante, para estudios de efectos agudos se debe considerar estudios de series de tiempo que emplean promedios de todos los contaminantes atmosféricos y los asocian con conteos diarios de mortalidad y movilidad de acuerdo a las enfermedades relacionadas.

BenMAP-CE. es un programa informático de código abierto que calcula el número y el valor económico de las muertes y enfermedades relacionadas con la contaminación del aire. El software incorpora una base de datos que incluye muchas de las relaciones de concentración-respuesta, archivos de población y datos económicos y de salud necesarios para cuantificar estos impactos.(EPA-United States Environmental Protection Agency, 2019).

BenMAP-CE determina el cambio en la contaminación del aire ambiente utilizando datos de calidad del aire especificados. Debido a que BenMAP-CE no modela los cambios en la calidad del aire, estos datos deben ingresarse como datos de modelado o generarse a partir de datos de monitoreo de contaminación del aire. (EPA-United States Environmental Protection Agency, 2019). Es así como el Deriva una función del impacto a la salud de la literatura de epidemiología:

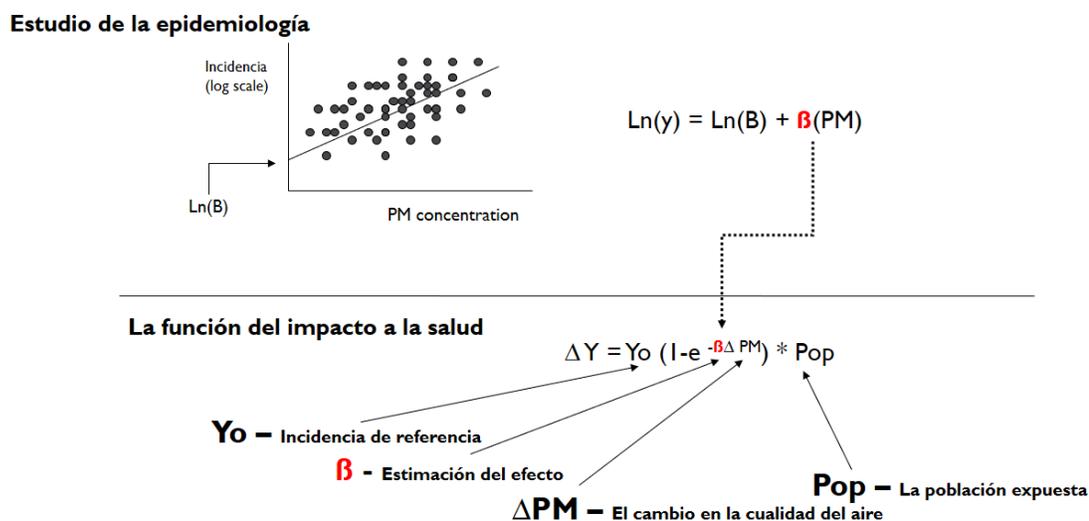


Figura 3. Función de impacto a la salud con respecto a un contaminante.

Fuente: (EPA-United States Environmental Protection Agency, 2019).

Las funciones del impacto a la salud operacionalizan las relaciones respuesta concentración que se derivan de la literatura epidemiológica. De un estudio epidemiológico, se puede determinar la relación entre los cambios en las concentraciones PM y la incidencia del impacto a la salud, como se ve en la cima del rincón a la izquierda. (EPA-United States Environmental Protection Agency, 2019).

Para calcular los impactos a la salud, realizados en Ben MAP-CE.

- Se empieza con el cambio de la concentración del contaminante, aplicado a la población expuesta, las tasas de incidencia de referencia para el impacto a la salud analizado al nivel del país.
- Para la estimación del efecto del estudio epidemiológico, y cálculo del cambio en la incidencia de ese impacto a la salud asociado con ese cambio del contaminante y se requiere de la concentración del mismo.

- En la generación de los mapas, los datos para el cambio de contaminantes, la población y la incidencia de referencia no necesitan estar en la misma escala geográfica.

$$\Delta Y = Y_0 (1 - e^{-\beta \Delta PM}) * Pop$$

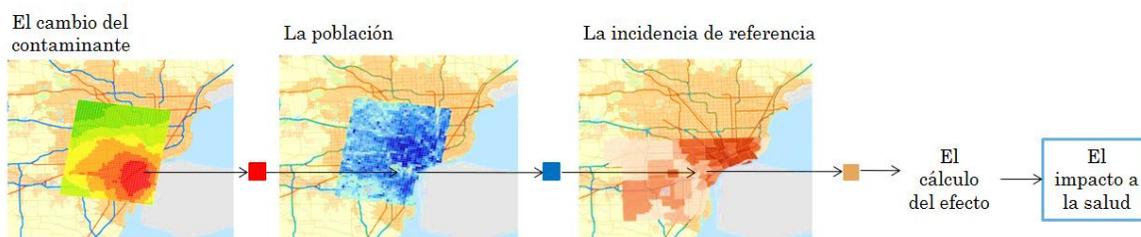


Figura 4. Pasos para calcular los impactos a la salud.

Fuente: (EPA-United States Environmental Protection Agency, 2019)

Interpretando de otra manera la figura 4 se tiene que para calcular los impactos a la salud según el software BenMAP-CE está dado por:

Efecto en la salud = Cambio en la calidad del aire * Estimación del efecto en la salud * Población expuesta * Incidencia de referencia de salud

- **Cambio de calidad del aire.** El cambio en la calidad del aire es la diferencia entre el nivel inicial de contaminación del aire (es decir, la línea base) y el nivel de contaminación del aire después de algún cambio, como una nueva regulación (es decir, el control o monitoreo).
- **Estimación del efecto sobre la salud.** La estimación del efecto sobre la salud es una estimación del cambio porcentual en el riesgo de un efecto adverso sobre la salud debido a un cambio de una unidad en la contaminación del aire ambiente. Los estudios epidemiológicos son una buena fuente para estimar los efectos al igual que los datos suministrados por una entidad de salud de la población en estudio.

- **Población expuesta.** La población expuesta es el número de personas afectadas por la reducción de la contaminación del aire. Esto dependerá del censo del gobierno es una buena fuente de esta información.
- **Incidencia de referencia de salud.** La tasa de incidencia en la salud es una estimación del número promedio de personas que mueren (o sufren algún efecto adverso sobre la salud) en una población determinada durante un período de tiempo determinado. Por ejemplo, la tasa de incidencia de salud podría ser la probabilidad de que una persona muera en un año determinado. Las tasas de incidencia de salud y otros datos de salud generalmente son recopilados por el gobierno. Además, la Organización Mundial de la Salud es una buena fuente para esto.

Los efectos de la contaminación sobre la salud de las poblaciones son estimados por medio de funciones de impacto en la salud (FIS), cuya forma está basada en la evaluación estadística realizada a partir de diferentes estudios epidemiológicos para obtener el riesgo relativo (RR) y el parámetro beta (β). (Aguilar & Correa, 2020).

Para la selección de funciones se debe realizar una búsqueda inicialmente local y regional en la cual se consideraron aspectos como la disponibilidad de información de salud (criterios de valoración o impactos sobre esta) y de población concordante con los grupos etarios evaluados en los estudios epidemiológicos, el tiempo de exposición a las concentraciones (priorizando aquellas de largo plazo), control de covariables ecológicas como: exposición a otros contaminantes, condiciones socioeconómicas, consumo de tabaco, entre otras, concentraciones promedio anuales y grupos etarios que abarcaran toda la población objeto de estudio. (Aguilar & Correa, 2020).

1.2. Estado del Arte

La contaminación ambiental, especialmente la atmosférica se ha convertido en una gran afectación para la salud en todo el mundo. Grandes organizaciones como OMS (Organización Mundial de la Salud) han identificado los contaminantes atmosféricos que causan un impacto en la salud humana dentro de ella entran el ozono (O_3), partículas ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), dióxido de azufre (SO_2), Dióxido de nitrógeno (NO_2) y monóxido de carbono (CO) (OMS, 2018).

Las relaciones NO - NO_2 de las emisiones de vehículos diésel ha sido ampliamente informada que son los que realizan más combustión y son los más contaminantes de este, a pesar, que los vehículos que utilizan este combustible han disminuido en estos últimos años. (Carslaw, et al., 2016; EMEP, 2016; Paoletti et al., 2014; Querol et al., 2014, 2016; Sicard et al., 2013)

No obstante los contaminantes atmosféricos pueden variar en su espacio temporal , lo que tiene un impacto importante en la exposición de las personas y la salud ambiental (Vitolo, Scutari, Ghalaieny, Tucker, & Russell, 2018). Uno de los contaminantes con un impacto significativo en el medio ambiente es el derivado del nitrógeno en el aire lo cual se deriva de la quema de combustibles fósiles. Este se da por el escape de automóviles, las calefacciones, emisiones de gases por parte de la industria que hace que aumente la concentración de este contaminante en la atmosfera.(Hadidi, AlDosary, Al-Matar, & Mudallah, 2016).

Dentro del contexto encontramos el dióxido de nitrógeno (NO_2) que pertenece a la familia de gases altamente reactivos llamada óxidos de nitrógeno (NO_x), que es una mezcla de NO (óxido nítrico) y NO_2 (dióxido de nitrógeno). (Jorquera, 2018). El NO_2 cuando se encuentra en la atmosfera tienen la facilidad de combinarse, son liberados a través de las combustiones que liberan óxido nítrico el cual reacciona y se convierte fácilmente en dióxido de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno son un importante indicador de la contaminación del aire, ya que la concentración del NO_2 ha sido bien correlacionada con la concentración de monóxido de carbono, partículas de hidrocarburos aromáticos policíclicos y otros contaminantes. (de Jesús Torres Noreña et al., 2009).

En un estudio realizado por (Yang et al., 2019a) comenta que Material Particulado ($\text{PM}_{2.5}$), Material Particulado (PM_{10}), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y ozono (O_3) en el oeste de China, las características espacio-temporales de los contaminantes del aire, y su relación con los factores meteorológicos y las fuentes de emisión, y la eficiencia de las estrategias de control de emisiones para la región.

No obstante, se estima que el NO_2 afecta a la salud, hay estudios que han relacionado el riesgo de mortalidad causado por la contaminación del aire y los cambios de temperatura lo cual es un tema de preocupación. En un estudio realizado por (Duan et al., 2019) menciona que hay pocos estudios sobre el efecto de los cambios en la estación y la temperatura en la mortalidad cardiovascular diaria asociada con el dióxido de nitrógeno (NO_2) contaminante del aire. Sin embargo, la contaminación del aire por NO_2 puede tener efectos inmediatos sobre algunos resultados específicos de la enfermedad, como los infartos de miocardio (Jf Argacha, P.Collart, A.Wauters, Y. Coppiertes, P. Sinnaeve, 2016).

El efecto de la exposición a largo plazo del dióxido de nitrógeno (NO_2), en la mortalidad respiratoria y cardiorrespiratoria, que para este último es menos concluyente. Además, existe evidencia de sobre un efecto sobre la mortalidad entre las personas con condiciones potencialmente predisponentes (enfermedad pulmonar obstructiva crónica, diabetes, insuficiencia cardíaca congestiva e infarto de miocardio). (WHO, Health Organization, & Office for Europe, 2013).

Las concentraciones elevadas de NO₂ pueden acumularse a niveles peligrosos y contribuir a efectos adversos para la salud, como la inflamación de las vías respiratorias y la reducción de la función pulmonar. El aumento de las concentraciones de NO₂ no solo afecta gravemente la salud física humana debido a la función pulmonar reducida sino también a los ecosistemas acuáticos por deposición ácida y eutrofización del suelo y el agua (Thomas, 2017).

Estudios recientes indican concentraciones crecientes en Dióxido de Nitrógeno (NO₂) en países en desarrollo, a pesar de las tendencias decrecientes en países desarrollados, probablemente como resultado de las políticas de regulación ambiental en estos últimos años (Kharol, S. K., Martin, R. V., Philip, S., Boys, B., Lamsal, L. N., Jerrett, M., ... & Burnett, R. T., 2015).

El NO₂ se ha utilizado en numerosos estudios epidemiológicos como marcador de la mezcla de contaminantes relacionados con la combustión, en particular los que emiten el tráfico por carretera o las fuentes de combustión en espacios cerrados. En estos estudios, los efectos observados en la salud se podrían haber asociado también con otros productos de la combustión, como las partículas ultrafinas, el óxido nitroso (NO), el material particulado o el benceno. (Organización Mundial de la Salud (OMS), 2005). Aunque en varios estudios, realizados tanto en espacios abiertos como cerrados, se ha tratado de concentrar la atención en los riesgos del NO₂ para la salud, a menudo es difícil descartar la contribución de los efectos de estos otros contaminantes, muy relacionados con él. (Mannshardt & Naess, 2018).

El valor guía actual de la OMS de 40 µg/m³ (media anual) se estableció para proteger al público de los efectos del NO₂ gaseoso en la salud. El fundamento de esto es que, debido a que la mayoría de los métodos de reducción de la concentración son específicos para los NO_x, no están concebidos para controlar otros contaminantes que los acompañan, pudiendo incluso aumentar sus emisiones. Sin embargo, si se vigila el NO₂ como marcador de mezclas complejas de la

contaminación derivada de la combustión se debería utilizar un valor guía anual más bajo. (OMS, 2018).

Las enfermedades respiratorias como la infección respiratoria aguda (IRA) y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC). Son conjunto de patologías que afectan el sistema respiratorio, siendo causa frecuente de morbilidad y mortalidad en los niños y niñas menores de cinco años, mujeres embarazadas y adultos mayores.(Vargas, Onatra, Osorno, Páez, & Sáenz, 2008).

Las fuentes principales de contaminación de origen humano son las quemas de desechos en el área rural, minería y canteras, manufactura, industria química, refinería de petróleo, generadores de energía, motores de combustión e incineradores, el transporte urbano, la producción de energía y las actividades industriales. (Vargas et al., 2008).

Los contaminantes del aire son partículas que se correlacionan los efectos de los principales contaminantes inorgánicos gaseosos como el dióxido de azufre (SO₂), el monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), algunos hidrocarburos (HC) como el benceno, butadieno y los efectos a nivel pulmonar en tres grupos poblacionales niños menores de cinco años, embarazo y adulto mayor. (Vargas et al., 2008).

En Colombia también se habla de aquellas metodologías y programas que ayuden a la disminución de los contaminantes, sin embargo, actualmente el gobierno tiene documentos como Metodología para la caracterización de zonas con exposición a posibles fuentes de contaminación del aire (MinSalud, 2018), como también estipula políticas de prevención y control de la contaminación del aire. (Ministerio de Ambiente, 2010).

Colombia cuenta con normatividad que en la actualidad está bajo el reglamento de Protección y Control de la Calidad del Aire esta unificado en el Decreto 1076 del 2015,(Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015), que incluye otras normas como de emisiones

contaminantes generadas por fuentes fijas (Resolución 909 de 2008) y fuentes móviles (Resolución 910 de 2008), la actualización de la norma de calidad del aire (Resolución 610 de 2010) que actualmente es la resolución 2254 de 2017, los cuales tiene actualmente regularizado los límites permisibles dentro de los siguientes rangos:

Tabla 2. Niveles Máximos Permisibles de contaminantes criterios en el aire.

Contaminante	Nivel Máximo Permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de Exposición
PM ₁₀	50	Anual
	100	24 horas
PM _{2.5}	25	Anual
	50	24 horas
SO ₂	50	24 horas
	100	1 hora
NO ₂	60	Anual
	200	Hora
O ₃	100	8 horas
CO	5.000	8 horas
	35.000	1 hora

Fuente: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

El Gobierno de Colombia, también cuenta con una política de mejoramiento de la calidad del aire en el CONPES 3943 el cual tiene como objetivo general reducir la concentración de contaminantes que afectan la salud y el ambiente, los cuales van encaminados a reducir las emisiones contaminantes al aire provenientes de fuentes móviles, reducir las emisiones contaminantes al aire provenientes de fuentes fijas, mejorar las estrategias de prevención, reducción

y control de la contaminación del aire (CONPES, 2018). No obstante, también estas políticas van asociadas a algunos objetivos del plan de desarrollo nacional 2018-2022 hacia el mejoramiento de la calidad del aire, del agua y del suelo, actividades productivas comprometidas con la sostenibilidad y la mitigación del cambio climático, para así dar cumplimiento a una de las metas de pasar de 22 % a 35 % de las estaciones que cumplen el Objetivo 3 OMS. (Gobierno de Colombia, 2018).

Es así, como en diferentes partes de Colombia, se han realizado investigaciones con respecto a la mejor de la calidad del aire y los efectos en la salud que este trae. Actualmente se viene trabajando en diversos programas de salud ambiental, no obstante, en el área metropolitana del Valle de Aburrá, se tiene un sistema de vigilancia epidemiológica sobre la calidad de aire en esta parte de Colombia, donde establece estructuras técnico científicas que desarrollen acciones de vigilancia que permitan identificar poblaciones en riesgo, caracterizar la exposición a contaminantes del aire exterior y cuantificar los efectos adversos que esta exposición representa para la salud humana y la calidad de vida, con el fin de proveer a las autoridades políticas, sanitarias, ambientales y otros actores implicados información que se apoye sobre evidencia científica que permita definir prioridades y aclarar acciones públicas para mejorar la gestión de la calidad del aire y la definición de políticas públicas saludables. (Daniels Cardozo, Martínez López, Arbeláez Montoya, & Saldarriaga, 2007).

En Barranquilla actualmente se cuenta con red de monitoreo de calidad de aire – RMCA, la cual, se encuentra conformada por tres (03) estaciones de Monitoreo (dos fijas y una Móvil), que se encuentran ubicadas en tres áreas estratégicas del distrito, estas son: la escuela de policía Antonio Nariño (ESANA) la cual es una estación urbana y fija categorizada como estación de punto crítico, dicha estación tiene como objetivo determinar las concentraciones más altas en el dominio del

SVCA en la ciudad de Barranquilla, así como verificar el cumplimiento de normas ambientales y trabajar en la gestión de alertas por contaminación atmosférica. (Verde, 2021).

Metodología

Capitulo 2

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudio

El área de estudio del proyecto corresponde a Barranquilla, una de las principales y más importantes ciudades de Colombia, ubicada en la parte occidental del Rio Magdalena, y con desembocadura en el Mar Caribe. Actualmente la ciudad es una de las principales de la Región Caribe contando con comercio e industria, con 154 km² de área y una población de alrededor de 1.200.000 habitantes. (DANE, 2018).



Figura 5. Ubicación de la Ciudad de Barranquilla. **Fuente:** Google Earth.

El área de estudio se caracteriza por tener pocos días de lluvia; los totales anuales no superan los 1000 mm. El número de días (60 aprox) de lluvia durante el año varía entre 50 y 100 mm.(IDEAM, 2019). La temporada de lluvias primaria se extiende de septiembre a noviembre, y

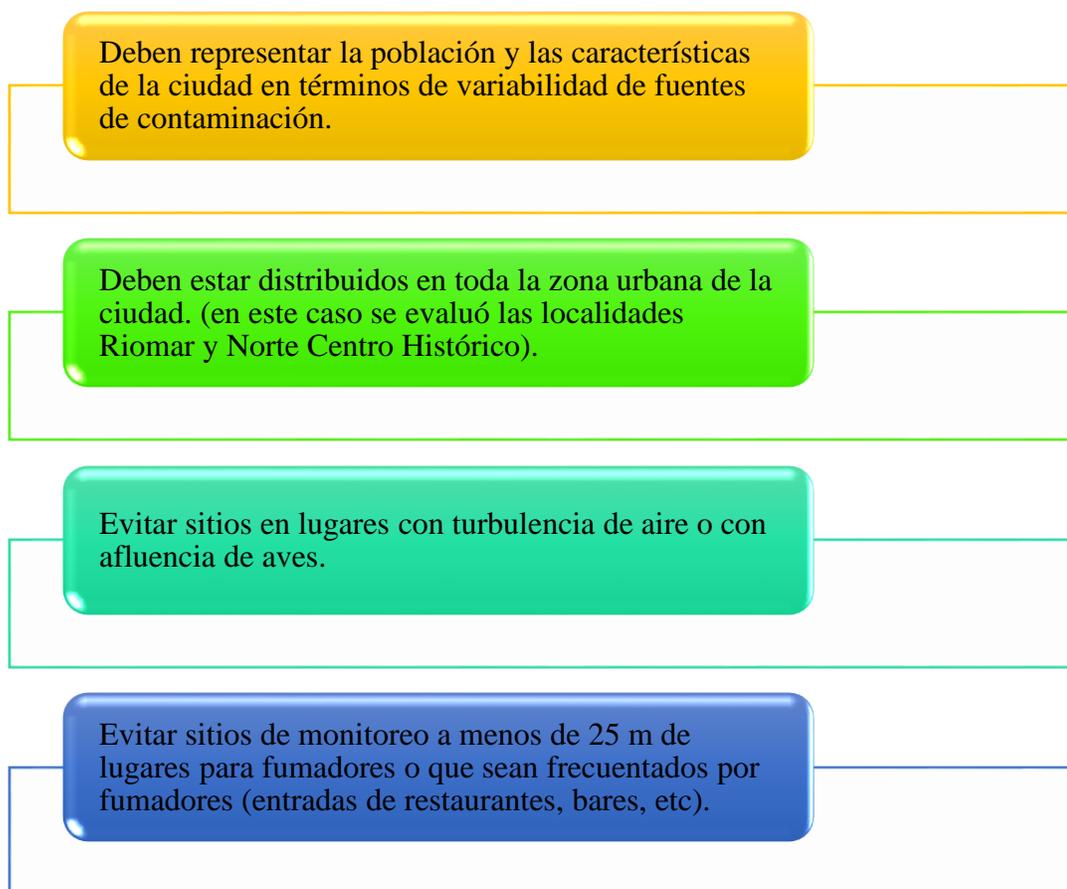
en la primera mitad del año, hay una corta temporada de lluvias en mayo. Las estaciones secas ocurren entre diciembre y abril, la principal; y una segunda, con menor intensidad en junio, julio y agosto. (IDEAM, 2019).

El área de estudio cuenta con una extensa área industrial a lo largo de la ribera del río Magdalena, junto con varios puertos que almacenan y exportan carbón mineral y coque, además, cuenta con varios incineradores de residuos peligrosos y hornos de ladrillos. Sin embargo, Barranquilla tiene una amplia producción en cuanto a farmacéutica, química, calzado, carrocerías de autobús, productos lácteos, embutidos, bebidas, jabones, materiales de construcción, grasas y aceites vegetales; y posee un puerto por el cual cubre dos rutas principales, el Río Magdalena, que comunica con el interior del país (ventaja que no poseen otros puertos de la costa caribeña) y el mar Caribe (Barranquilla, 2021).

2.2 Muestreo en el área de estudio

Puntos de Monitoreo. En un periodo de dos semanas, se realizó la medición de Dióxido de Nitrógeno (NO_2), en el cual se ubicaron ciento catorce (114) puntos de monitoreo en la ciudad de Barranquilla- Atlántico como objeto de estudio.

Estas estaciones fueron seleccionadas, considerando factores de área abierta, que permitan la libre circulación de aire, evitando lugares donde es probable que se vean afectados por turbulencias; así mismo para que la captación de Dioxido de Nitrógeno (NO_2), se consideraron fuentes puntuales que mostraran los diferentes factores que en su combustión tienen la presencia de este contaminante, para que así se analizara la variabilidad del Dioxido de Nitrógeno en la ciudad. Dentro de las consideraciones para la selección de puntos, se realizó una búsqueda de literatura (de Hoogh et al., 2016), en la cual consideraban una distancia entre punto y punto mínima de 500m y la consideración que entre mas puntos se podría analizar mejor la concentración en una zona.



Gráfica 1. Consideración para selección de puntos de monitoreos.

Para la realización se estimó un período de muestreo de dos semanas en el mes de marzo del año 2019 (16/03/2019 al 30/03/2019) en las localidades Riomar y Norte Centro Histórico como se mencionó anteriormente, el cual conto con 114 puntos de monitoreo en Barranquilla. A continuación, en la figura 6 se muestra la selección de puntos.

Tabla 3. *Coordenadas de algunos puntos de monitoreo.*

CÓDIGO	COORDENADAS	
1330441	11,0101611	-748150431
1330442	11,0080771	-74,8172362
1330443	11,0066917	-748190074
1330444	11,0036728	-7482005078
1330445	11,0021552	-748208012
1330446	11,0011481	-748189934
1330447	11,0030336	-748183238
1330448	11,0073647	-748162321
1330449	11,0053371	-74,8172556
1330450	11,0093341	-74,8130784
1330451	11,0125883	-74,8185887
1330452	11,0109757	-74,8200904
1330453	11,0080483	-74,8224061
1330454	11,0054348	-74,8236557
1330455	11,0037921	-748244547
1330456	11,0052097	-74,8265052
1330457	11,0070168	-74,8261508
1330458	11,0101176	-74,825045
1330459	11,0105126	-74,8245492
1330460	11,0128973	-74,8232363

Fuente: (Mendoza Hernández, 2021)

2.3. Tubos pasivos para captación del Dióxido Nitrógeno.

En esta investigación, para la captación del Dióxido de Nitrógeno (NO₂), las mediciones de concentración se realizaron en dos pasos, la primera es la utilización de muestreadores pasivos que ofrecen un medio simple y económico para medir los contaminantes del aire en y que no requieren de gran magnitud para su instalación. (DefraWorking Group, 2008).

Para esta investigación se usaron tubos de difusión Palmes para muestreo pasivo de NO_2 , los cuales funcionan mediante difusión molecular. En los compuestos se moverán de un área de alta concentración a un área de baja concentración; debido a que estos en el aire se encuentran en una concentración elevada que, en el tubo, por lo que se difunden en el, acumulando y absorbiendo en la parte acrílica del tubo comprendido por un caucho termoplástico gris. Debido a que los compuestos se absorben, se mantiene baja la concentración en el tubo y, por lo tanto, la difusión continúa. La tasa de movimiento de los compuestos en el tubo se denomina tasa de absorción. Esta es una tasa conocida y se utiliza en los cálculos durante el análisis. Los tubos de difusión pasiva usados fueron de 71,0 mm de largo x 11,0 mm de diámetro interno preparado con 20% de TEA / agua, modelo DIF 100 RTU de Gradko[®].

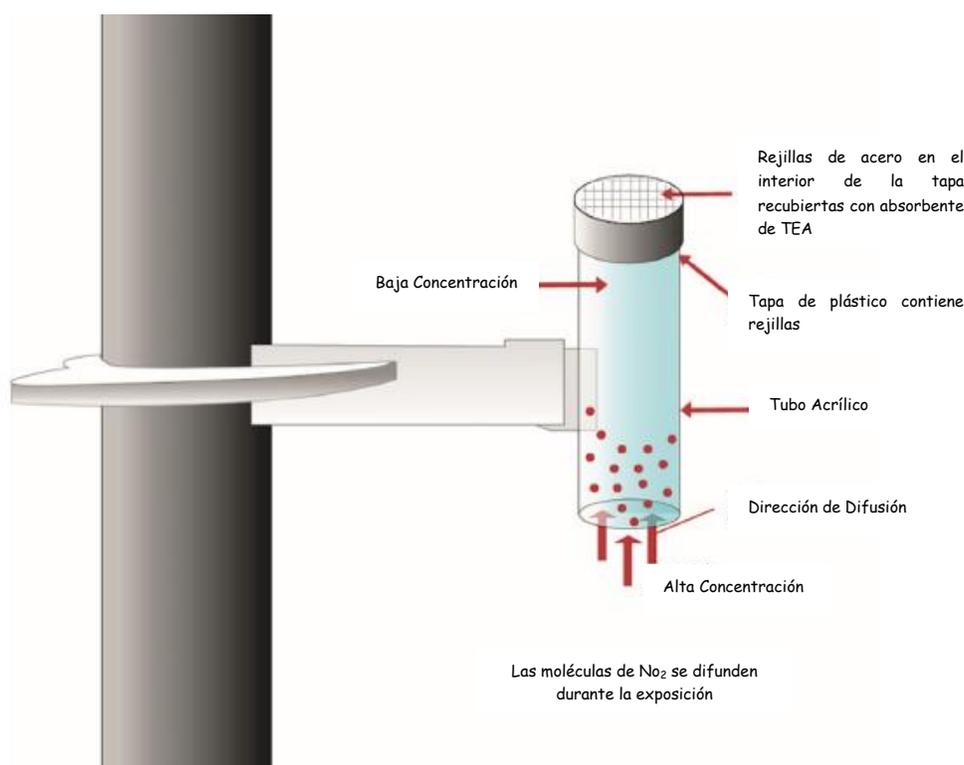


Figura 7. Principio de los muestreadores pasivos (tubos Palmes para captación de NO_2).

Fuente: (Agudelo-Castañeda et al., 2020)

2.3.1. Procedimiento:

Para realizar el proceso de muestreo en campo se requirieron tubos de difusión con las especificaciones anteriormente mencionadas (7 cm de alto y 1,5 cm de ancho), soportes de tubo, hojas de registro donde se coloca el código de cada tubo al igual que la hora en que fue instalado, coordenadas y fecha de desinstalación (anexo1.). También se contempla un mapa en el cual va señalado los sitios de monitoreos seleccionados.

No obstante, se realizaron grupos en los cuales fueron divididos los 114 puntos de monitoreos, y teniendo en cuenta consideraciones como el no uso ningún tubo que estuviese agrietado, dañado o que tuvieran extremos desiguales que puedan evitar que las tapas se cierren correctamente. Todos los tubos debían tener la misma dimensión en términos de longitud y diámetro interno y externo.





Figura 8. Monitoreo con los muestreadores pasivos (tubos Palmes para captación de NO_2)

Fuente: (Mendoza Hernandez, 2021)

Para llevar a cabo el monitoreo, se realizó un detallado seguimiento asegurando que cada uno estuvieran claramente etiquetado con un número de identificación único. El etiquetado debe ser resistente a la intemperie (es decir, etiquetas impermeables o pluma permanente). Luego, los tubos son dispuestos en una bolsa plástica sellable o en un recipiente de plástico limpio. Durante todo el monitoreo se llevaron tubos en blanco, los cuales se identificaron y sus números de código deben anotarse en el formulario de campo, es importante especificar luego de que esta información es proporcionada al laboratorio.

Es así, como se estableció un protocolo de monitoreo considerando los siguientes pasos:

- **Localización del punto de Monitoreo:** Seleccionar el sitio adecuado para colocar el tubo de difusión, una vez seleccionado se debe considerar que el extremo inferior del tubo esté abierto y expuesto a la libre circulación de aire para que pueda ingresar y absorber de NO_2 ; este es conducido a una capa delgada donde se concentra.

No obstante, los tubos no deben fijarse directamente a las paredes, incluso cuando el objetivo es monitorear en la fachada de un edificio, debe usarse un bloque espaciador de al menos 5 cm entre la superficie y el tubo.

- **Montaje del equipo:** En cada sitio de monitoreo se seleccione un tubo, el cual debe registrarse su número de identificación y el sitio en el que se va a exponer en un formulario de campo. Estos deben estar sujetos con unas cuerdas o material que lo mantenga en posición fija este tubo puede ser colocado en un poste de luz. El equipo se coloca verticalmente y luego pasa a ser insértado en el soporte con la tapa blanca hacia abajo. Una vez la tapa del extremo absorbente (de color gris) hacia arriba, retire la tapa del extremo inferior (de color blanco), se asegura que este fijo el tubo con su respectivo soporte.
- **Retiro de la tapa inferior:** la tapa blanca debe estar orientada hacia abajo y se deja el tubo durante un período de exposición de 2 semanas. Se conserva la tapa en un lugar seguro.
- **Formato de Campo:** se lleva una hoja en la cual se realiza el registro asegurándose de que la fecha y las horas se registran, al igual que la identificación del tubo la cual esta codificada. Adicional en este formato se registra cualquier información que ayude a identificar la ubicación por lo que ayudar a explicar los resultados cuando los obtenga.
- **Retiro de los equipos:** la muestra desde su ubicación 2 semanas después de la colocación, una vez en el punto de monitoreo se coloca la tapa blanca que se conservó, luego de forma segura se coloca en el extremo del tubo, en la ubicación. Se anotó cualquier detalle relacionado con la condición del tubo, los cambios en las condiciones del sitio o cualquier cosa que pueda afectar los resultados. Posteriormente se registra la fecha y la hora de recolección en la hoja de formato de campo.

2.3.2. Análisis de laboratorio:

Los tubos de difusión como bien se ha mencionado funcionan mediante un proceso denominado difusión molecular. Durante la difusión molecular, los compuestos se moverán desde un área de alta concentración a un área de baja concentración. Los compuestos en el aire están en una concentración más alta que los del tubo, por lo que los compuestos se difunden en el tubo y se acumulan en el absorbente al final del tubo.

Debido a que los compuestos se absorben, se mantiene la baja concentración en el tubo y, por lo tanto, la difusión continúa. La tasa de movimiento de los compuestos en el tubo se denomina tasa de absorción. (Defra Working Group, 2008) Esta es una tasa conocida y se utiliza en los cálculos durante el análisis.

El principio básico sobre el que operan los muestreadores de tubos de difusión es el de la difusión molecular, con moléculas de un gas que se difunden desde una región de alta concentración (extremo abierto del muestreador) a una región de baja concentración (extremo que absorbe el muestreador). El movimiento de las moléculas de gas (1) a través del gas (2) se rige por la ley de Fick, que establece que el flujo es proporcional al gradiente de concentración. (Mecánica et al., 2015)

Se utilizan diversas técnicas de análisis para los diferentes tubos de difusión. El laboratorio determina la concentración de compuestos en el momento (en este caso, UV / visible utilizando un espectrofotómetro). Esto se usa luego en un cálculo con la tasa de absorción para calcular la concentración promedio de compuestos que estaban presentes en el aire durante el período de monitoreo. (Defra Working Group, 2008). Una vez las muestras fueron recolectadas estas fueron enviadas al laboratorio ambiental de Gradko[©] en Inglaterra por la cual sería tratadas en el UV CARY1 espectrofotómetro. Los tubos de difusión pasiva para mediciones ambientales se evaluaron

según las normas europeas BS EN-13528 (En 13528, s/f). Las concentraciones de iones de nitrito y, por tanto, NO₂ adsorbidos químicamente se determinan cuantitativamente por UV / Visible Espectrofotometría con una curva de calibración derivada del análisis de soluciones estándar de nitrito (métodos acreditados por UKAS). Los óxidos de nitrógeno y el ozono se miden mediante el método de quimioluminiscencia y absorción de luz ultravioleta, respectivamente.

2.4. Cálculo de impactos ambientales y efectos para la salud.

Para la interpretación de los resultados se sistematizo en una tabla dinámica en el programa Excel, donde, se analizo la concentración dada por los 114 puntos monitoreados y que comprenden las localidades de Riomar y Norte Centro Histórico de la ciudad de Barranquilla. Los resultados fueron analizados por gráficos, con el propósito de determinar las variaciones de concentraciones en los diferentes puntos de monitoreo. Para conocer la distribución y puntos de concentración en los puntos de monitoreos localizados en la ciudad de Barranquilla se realizó por el programa QGIS3 versión 3.8.3, por medio de puntos de concentración y evidenciando con escala los lugares donde más se elevó las concentraciones dando al detalle zonas con mayor o menor concentración.

Luego fueron estimados los efectos sobre la salud. Los efectos de la contaminación sobre la salud de las poblaciones son estimados por medio de funciones de impacto en la salud, cuya forma está basada en la evaluación estadística realizada a partir de diferentes estudios epidemiológicos para obtener el riesgo relativo (RR) y el parámetro beta (β).

Sin embargo, existen modelos estadísticos que permiten analizar a corto plazo la tasa de incidencia de un efecto genérico, para el caso de la presente investigación se llevó a cabo un análisis por medio del software BenMAP-CE que relaciona el cambio en la concentración de la contaminación con ciertos efectos sobre la salud, como a su vez hace una relación a menudo se

conoce como la función de impacto en la salud (HIF) o la función de concentración-respuesta (C-R). BenMAP-CE aplica esa relación a la población que experimenta el cambio en la exposición a la contaminación para calcular los impactos en la salud.

Para calcular los impactos a la salud, realizados en Ben MAP-CE, se debe considerar que:

- Se empieza con el cambio de la concentración del contaminante, aplicado a la población expuesta, con las tasas de incidencia de referencia para el impacto a la salud analizado al nivel de la ciudad.
- Se incluye la estimación del efecto del estudio epidemiológico.
- Se calcula el cambio en la incidencia de ese impacto a la salud asociado con ese cambio del contaminante.

BenMAP-CE también calcula el valor económico de los efectos de salud evitados después de calcular los cambios en la salud, puede estimar el valor económico multiplicando la reducción del efecto en la salud por una estimación del valor económico basado en que:

$$\text{Valor económico} = \text{Efecto sobre la salud} * \text{Valor del efecto sobre la salud}$$

Este valor económico va relacionado al valor de una vida estadística es el valor monetario que un grupo de personas está dispuesto a pagar para reducir ligeramente el riesgo de muerte prematura en la población.

La base de datos BenMAP-CE incluye varias funciones diferentes y funciones de valoración para otros efectos sobre la salud, se aclara que el software no tiene capacidades de modelado de calidad del aire y por lo tanto, se debe proporcionar datos creados externamente para trabajar.

Resultados y Discusión

Capítulo 3

3. Resultados y discusiones

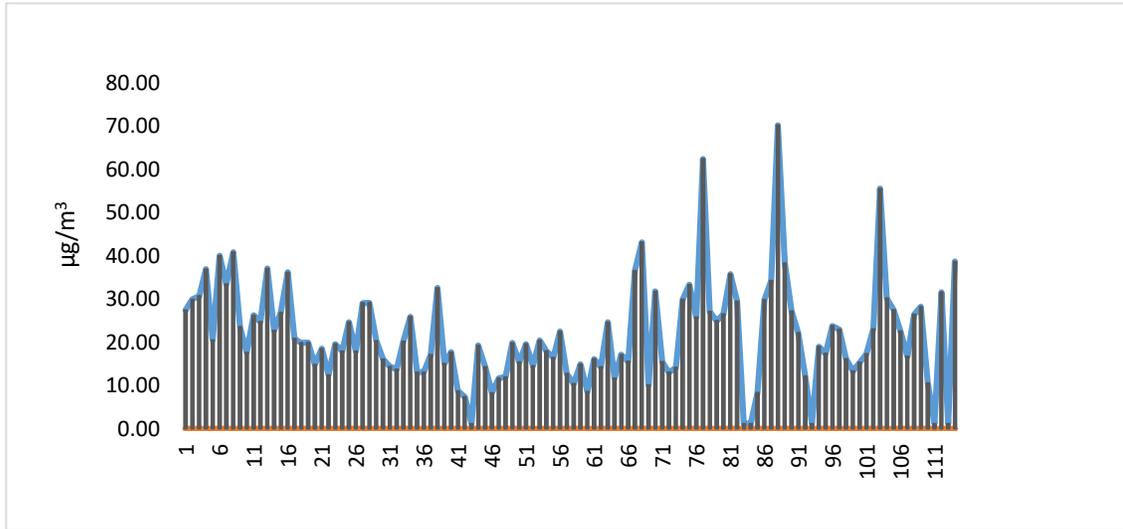
Para el monitoreo del Dióxido de Nitrógeno NO_2 , es importante la ubicación y el tipo de equipos que se a utilizar, debido a la influencia que puede traer al momento de analizar las concentraciones captadas. En el presente capitulo, se analizará tanto las concentraciones encontradas como la influencia que este contaminante puede traer consigo a los habitantes de la ciudad de Barranquilla.

3.1. Concentración de Dióxido de Nitrógeno NO_2

Basado en los resultados obtenidos por medio de las dos semanas de monitoreo realizados en la ciudad de Barranquilla, se logró cuantificar la concentración de Dióxido de Nitrógeno (NO_2), que es emitido desde diferentes puntos de las localidades Riomar y Norte Centro Histórico de la ciudad, estas muestras fueron tomadas en una época seca en el distrito de Barranquilla.

En el gráfico $\text{N}^{\circ}2$, se observa la concentración de dióxido de nitrógeno (NO_2) en los 114 puntos muestreados dentro de la ciudad de Barranquilla durante la época seca. La cual registra un valor superior de $70,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y un valor inferior de $0,57 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En él se puede evidenciar la concentración elevada en el punto que corresponde FL009 en la localidad de Riomar (Anexo 2), el cual se encuentra ubicado en el sector de una empresa de fabricación de vidrios, y metalurgia y adicionalmente es una de las vías más concurridas vehicularmente.

En lo que respecta a la concentración inferior representada, se encuentra en la localidad del Norte Centro Historico de la ciudad, corresponde a los puntos AM021 y AM026 (Anexo 2), en él se encuentra zonas residenciales y alta presencia de vegetación, a pesar de que se encuentran en vías que comunican con principales de la ciudad, la afluencia vehicular en esta zona no es tan concurrida como en otras, adicionalmente, cerca de estos puntos de monitoreo no se encuentran industrias, o actividades que generen aumento del Dióxido de Nitrógeno.



Gráfica 2. Concentración de NO₂ en puntos de monitoreos en la ciudad de Barranquilla.

Fuente: (Mendoza Hernandez, 2021)

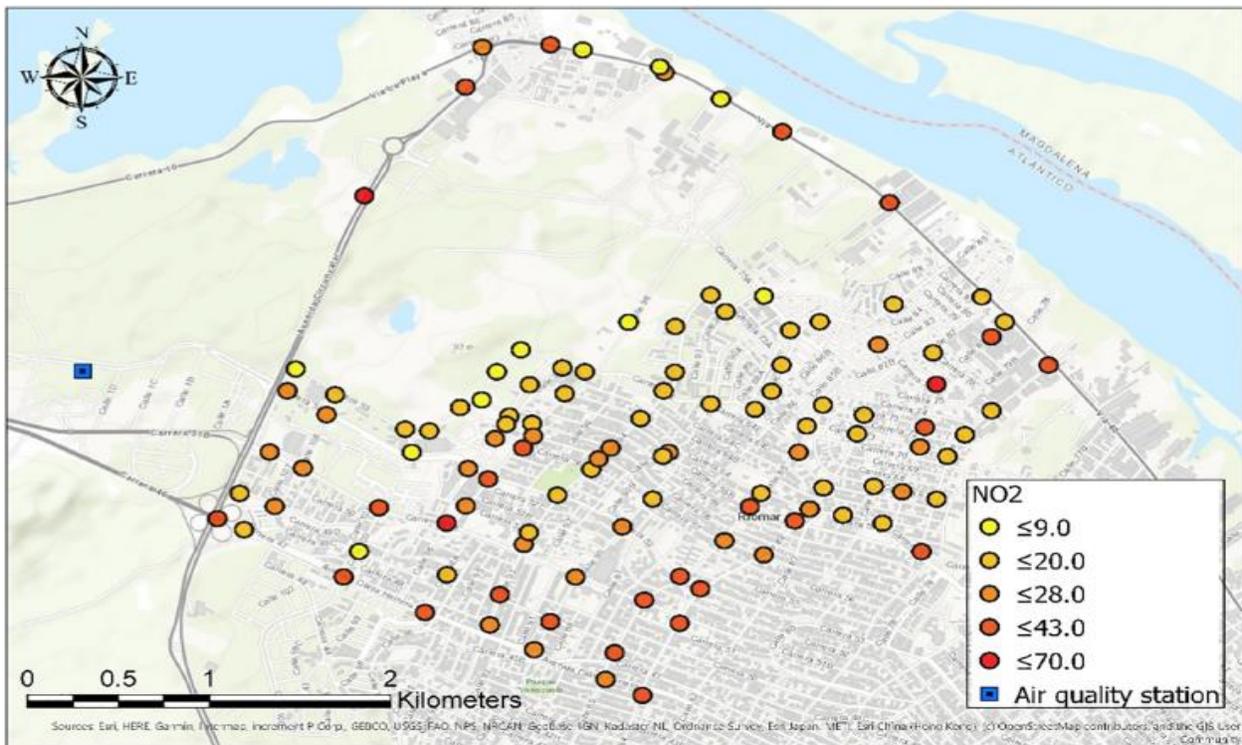
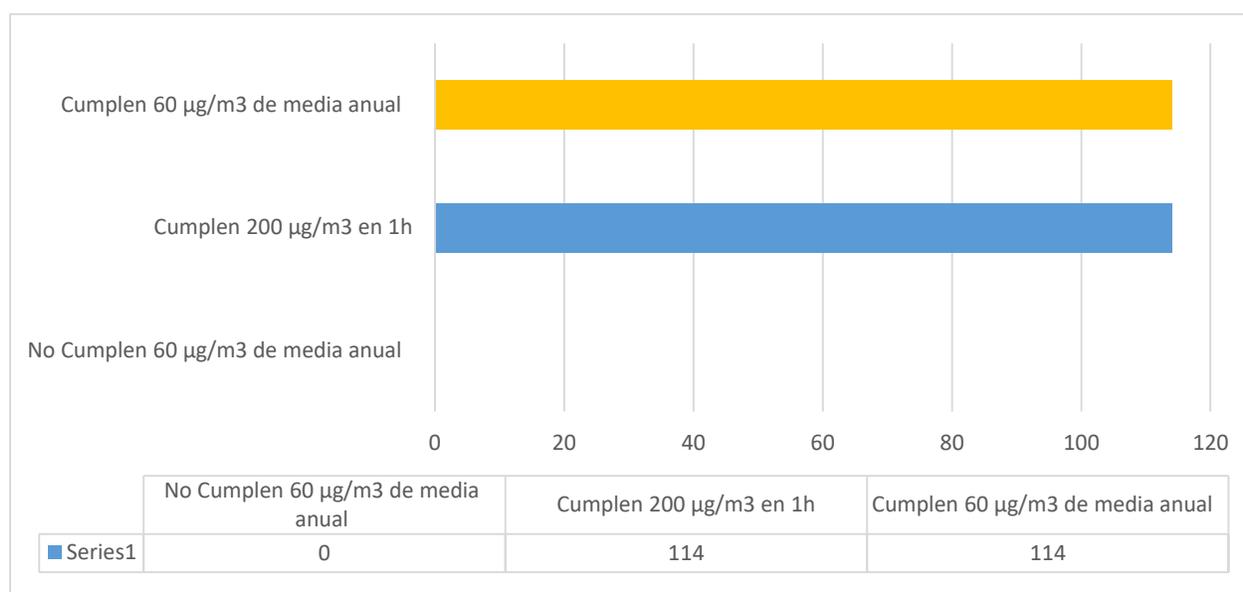


Figura 9. Concentración de Dióxido de Nitrógeno en la ciudad de Barranquilla.

Fuente: (Agudelo-Castañeda et al., 2020)(Mendoza Hernandez, 2021).

En el grafico N°3 se encontrará la relación para observar los límites permisibles o máximos para el contaminante atmosférico Dióxido de Nitrógeno, en el cual se comparan la normatividad nacional Resolución 2254 del 2017 emitida por el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, donde se estipulan los límites permisibles para concentraciones con exposición de 1 hora al igual que para anualmente.

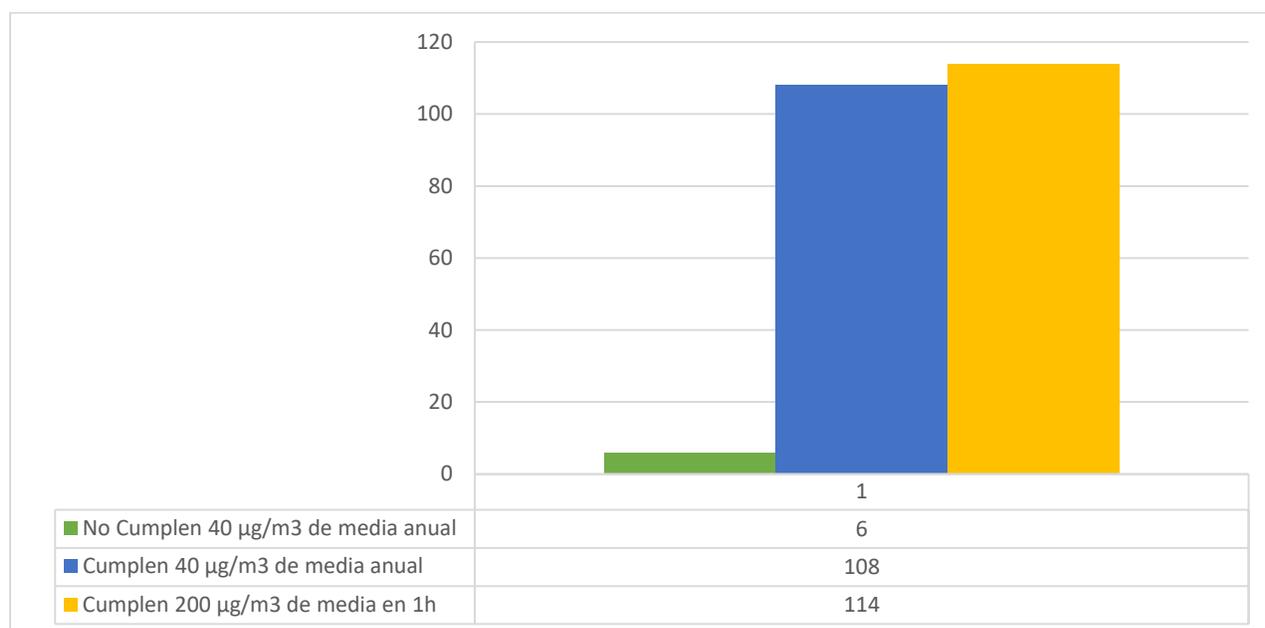


Gráfica 3. Cumplimiento de la norma Res. 2254 del 2017.

Fuente:(Mendoza Hernandez, 2021).

Si bien se observa, que las concentraciones encontradas durante el monitoreo cumplen con lo establecido por la normatividad colombiana, donde para monitoreos de 1 hora no deben superar $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y anuales $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para el caso del presente monitoreo se trabaja con la media anual debido a que no se realizaron monitoreos cada hora. No obstante, si se compara con la media por hora, este si no cumpliría en los puntos AM021 y AM026 (Anexo 2).

Así mismo, en el gráfico N°4, se realizó el análisis con los límites que establece la Organización Mundial de la Salud (OMS), para el contaminante atmosférico Dióxido de Nitrógeno, en el cual está destinado como valor límite 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para la media anual y 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media en 1h.



Gráfica 4. Cumplimiento de límites establecidos por la OMS.

Fuente:(Mendoza Hernandez, 2021).

Para el caso de comparación con límites de la OMS se observa que para las concentraciones encontradas durante el monitoreo se evidencia que 6 puntos NO cumplen con el límite de la media anual (40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), debido a las altas concentraciones encontradas como:

Tabla 4. Puntos con altas concentraciones.

Concentración	Nombre del Punto	Localidad	Características
40,05	AM118	Norte	calle 84 con 46 Vía concurrida vehicular
43,17	RM089	Riomar	calle 84 # 51b Vía concurrida vehicular
40,88	AM117	Norte	calle 76 con 85 Vía concurrida vehicular
62,45	FL008	Riomar-Norte	Fabricación de cementos, vía principal, otras industrias en el área de influencia

70,27	FL009	Riomar-Norte	Fabricación de vidrios, Metalurgia, vía principal, otras industrias en el área de influencia
55,57	AM029	Norte	av. circunvalar, por el puente

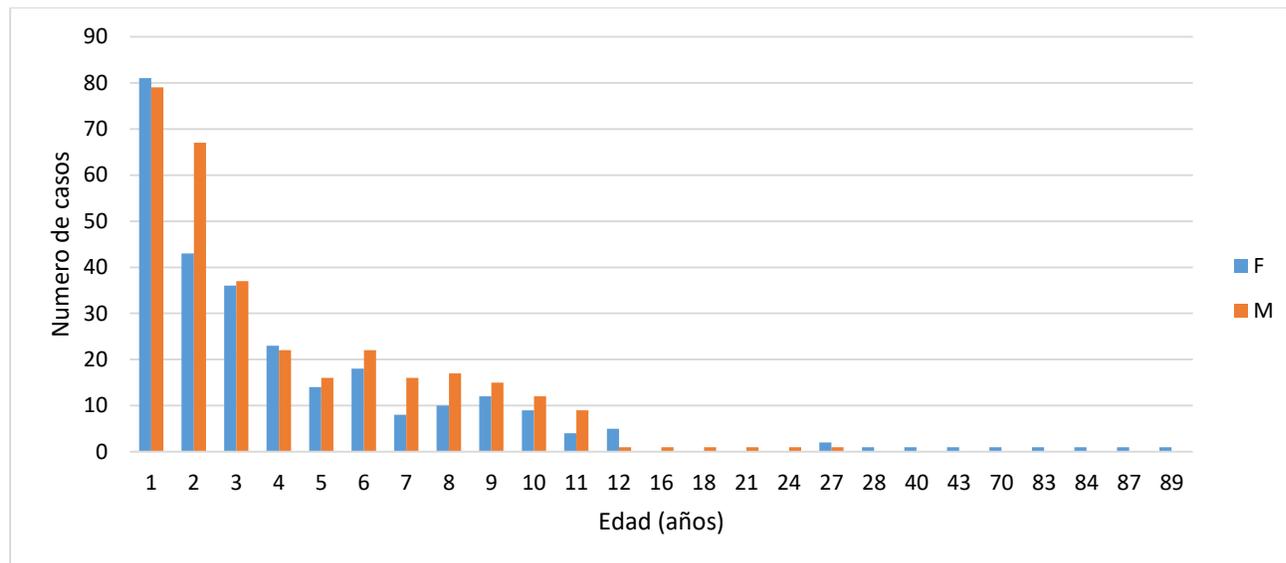
Fuente:(Mendoza Hernandez, 2021).

Los puntos de monitoreo que representaron altas concentraciones de Dióxido de Nitrógeno hace referencia a las investigaciones, estudios, literatura que asocia la generación de este contaminante a lo relacionado con las industrias, quema de combustibles fósiles, combustión vehicular. Sin embargo, es importante que la presencia en el aire de este contaminante contribuye a la formación y modificación de otros contaminantes del aire tales como el ozono y las partículas en suspensión, así como a la aparición de la lluvia ácida.

Para la evaluación de los efectos sobre la salud que trae la contaminación por Dióxido de Nitrógeno es importante considerar que evaluar este contaminante de forma aislada no es posible, por lo que sus orígenes como antes mencionados están acompañados de niveles de partículas en suspensión, entre otros.

Actualmente, el Dióxido de Nitrógeno y enfermedades respiratorias si se encuentran correlacionados en cuanto a periodos de exposición largos frente a la presencia de este contaminante.(Ayres, Robert Maynard, 2006). Estos pueden provocar una disminución de la función pulmonar y aumentar el riesgo de la aparición de otros síntomas respiratorios como bronquitis aguda, tos y flema. Según estudios la población más vulnerable son los niños, aunque también hay relación con mortalidad en otros grupos de edades. En la Ciudad de Barranquilla evidencia que la población a sufrir estas enfermedades son los niños y casos puntuales en adultos mayores, la mayoría relacionados a viviendas cercanas a un área industrial y de alto tráfico vehicular.

Con base en la información suministrada por el ente de Salud del Distrito de Barranquilla, la población más afectada por enfermedades respiratorias son los niños que se encuentran comprendido entre Primera infancia (7 días de nacido a 5 años 11 meses, 29 días), seguidamente por la población de Infancia (6 años a 11 años 11 meses 29 días), luego adolescencia (12 a 17 años) y los que menos recurren a centros de salud por enfermedades respiratorias son los adultos y la población de adulto mayor. Cabe resaltar que esta información está relacionada a los casos que son registrado por alguna entidad de salud del distrito de Barranquilla a la Secretaria de Salud y correspondientes al año de monitoreo (2019).



Gráfica 5. Número de casos por edad- sexo de frecuencia a enfermedades respiratorias en población de la ciudad de Barranquilla.

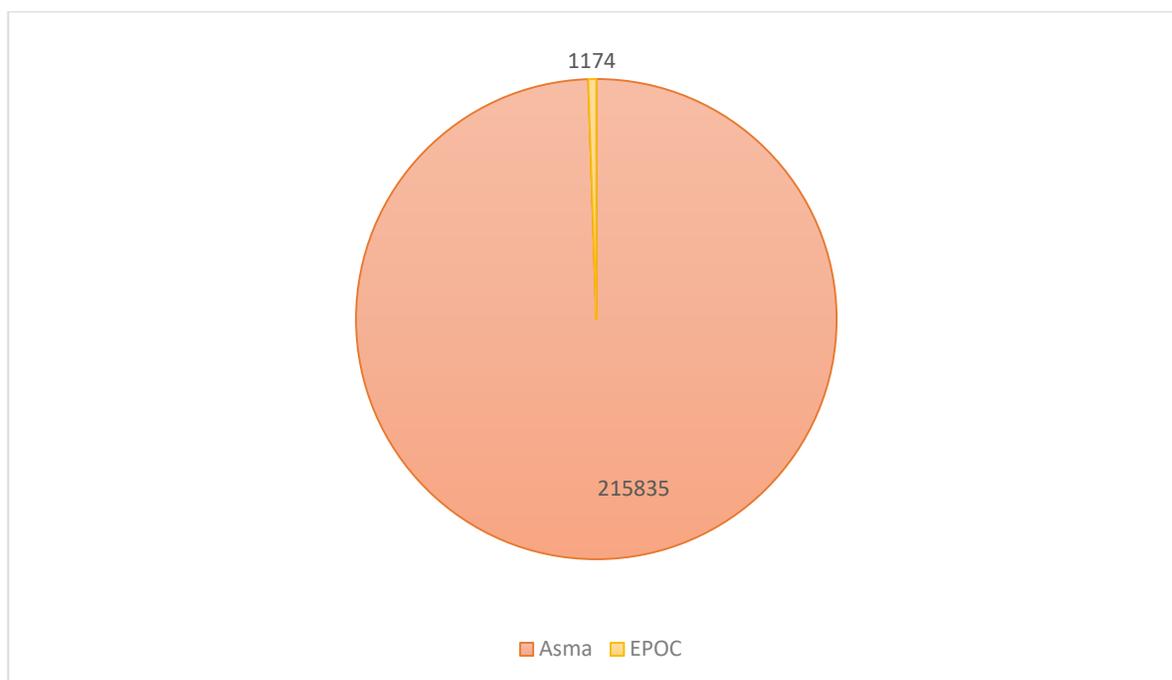
Fuente:(Mendoza Hernandez, 2021).

Estos fueron reportados en localidades Suroccidente y Centro Norte Histórico de la ciudad donde se evidencia el mayor número de casos por enfermedades respiratorias, y se puede atribuir a la cantidad de comercio, afluencia vehicular, e industrias en esta zona de la ciudad. Sin embargo, se les atribuye a las malas prácticas que se presenta en cierta población. Según estudios de (Jinhong

Xian, Dongsong Sun, Wenjing Xu, Yuli Han, Jun Zheng, Jiancao Peng, 2020), en ciertas condiciones la línea de atención, adecuaciones de vivienda, alimentación y condiciones ambientes son factores que llevan al aumento de estas enfermedades, que como bien se menciona antes pueden estar asociadas a contaminantes atmosféricos.

En cuanto a las enfermedades que más frecuentan los Barranquilleros, se encuentran el asma, mucosidad de las vías altas respiratorias, EPOC (enfermedad pulmonar obstructiva crónica) e infecciones respiratorias. No obstante, para la determinación de la presencia de estas enfermedades se consideraron hábitos de las personas que ingresan a los centros de salud. 647

Según los datos suministrados actualmente la población está más afectada por el asma y EPOC, de los 647 casos reportados durante el 2019 se tiene que:



Gráfica 6. Reporte de enfermedades frecuentes en la población de Barranquilla para el 2019

Fuente:(Mendoza Hernandez, 2021).

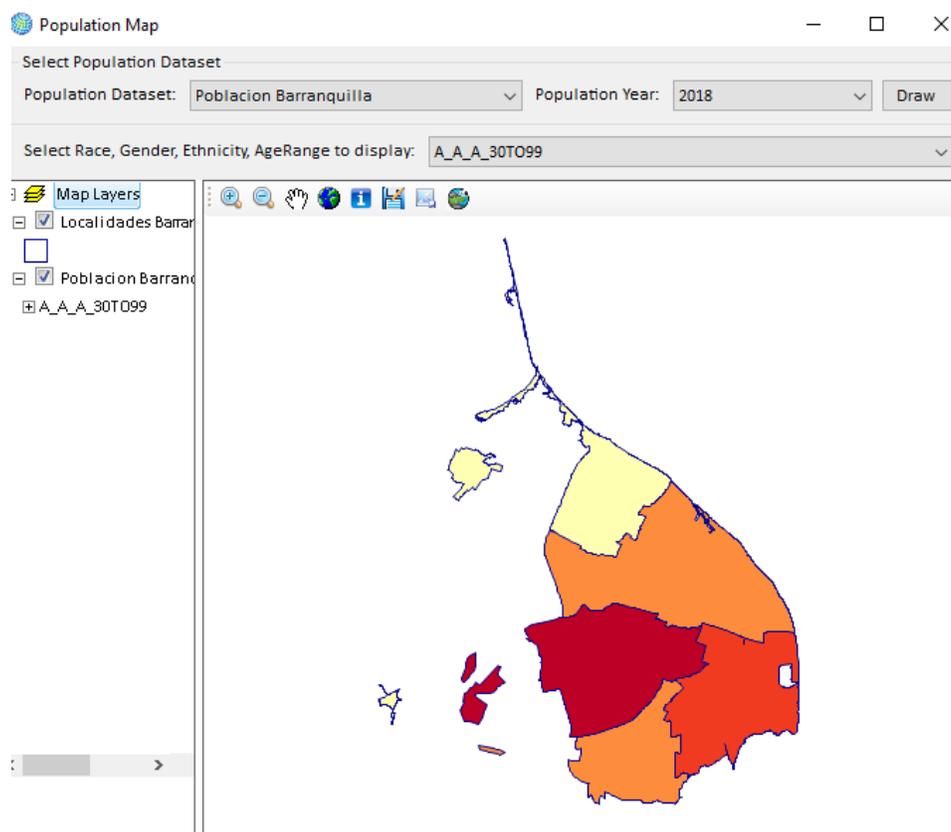
Si bien para conocer a fondo la relación que existe directamente entre contaminante y enfermedad es necesario la realización de métodos estadísticos como lo es el modelo de Poisson que permite analizar la tasa de incidencia de un efecto y la concentración del contaminante. Para ello se requiere monitoreos continuos por periodos largos para que el modelo se pueda correr y ser significativamente.

No obstante, el Dióxido de Nitrógeno (NO_2), como bien se ha mencionado es un contaminante que no se puede evaluar solo por lo que está siempre acompañado de otros contaminantes, lo que dificulta su aislamiento para ser evaluado solo. Así mismo, la formulación de encuestas epidemiológicas son herramientas que contribuyen a la detención de fuentes de contaminación e influencia de efectos adversos a la salud.

Los estudios epidemiológicos proporcionan evidencia general de la relación matemática entre la duración de respirar contaminación del aire y efectos negativos de la salud, y también pueden proporcionar información sobre la forma de la relación concentración-respuesta, incluyendo si la asociación es lineal o si hay evidencia de un límite fijo que causa problemas específicos (es decir, concentraciones por debajo de las cuales no se observan efectos negativos para la salud).

Si quiere determinar en cuales efectos de salud hay que concentrarse para implementar un estudio de los gastos y beneficios o de los efectos en la salud, hay que seguir un proceso que incluye unas preguntas que tratan del nivel de confianza que tenga el investigador en la relación entre la contaminación y el efecto, y la cantidad de información disponible. Es por ello que se utilizó un software llamado BenMap-CE, que analiza los Conceptos Básicos del Análisis de Beneficios, no obstante, como bien se ha mencionado no se puede evaluar el contaminante solo, es así como se

consideraron estudios bases de contaminantes que pueden estar presente cuando se dé la combustión para se obtuvo lo siguiente:



Gráfica 7. Población estudiada (Barranquilla dividida por localidades).

Fuente:(Mendoza Hernandez, 2021).

Para este se suministraron datos del último censo realizado por el DANE para el año 2018, en el podemos evidenciar a Barranquilla por localidades donde su proporción de población está dada por:

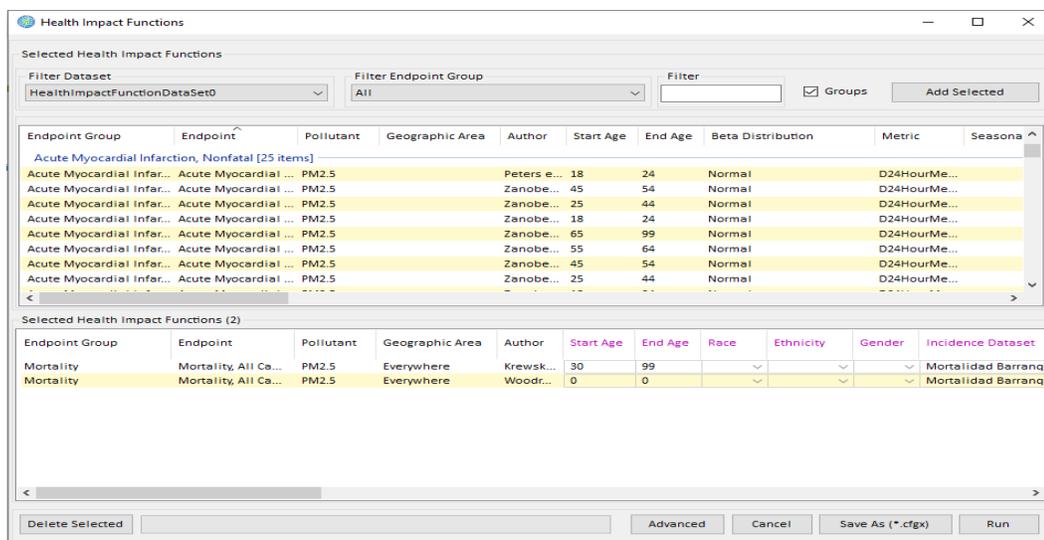
Tabla 5. Población de estudio.

Localidad		COLUMN	ROW	Población	< 1 año	> 30
Riomar		1	1	78,000	1,716	35,880
Norte	Centro	2	2	320,000	7,040	147,200
Histórico						
Sur Occidente		3	3	550,000	12,100	253,000
Metropolitano		4	4	340,000	7,480	156,400
Sur Oriente		5	5	370,000	8,140	170,200
Corregimiento	Juan	6	6	8,375	184	3,853
Mina						
Corregimiento	La	7	7	21,400	471	9,844
Playa						

Fuente: (DANE, 2018).

Para decidir cuáles estudios epidemiológicos a usar, hay un número de requisitos y recomendaciones, para el programa se evalúa mas los contaminantes criterios por lo cual deben ser estudios puntuales en cuanto a la salud no superpuestos, y debe haber una serie-tiempo, la integración de casos, o los estudios de cohortes, puesto que estos serán nuestra base de datos para poder evaluar. La población debe tener un tamaño suficiente y óptimamente habrá involucrado múltiples contaminantes para aumentar la habilidad de generalizar y aplicar en cuanto a la relación concentración-respuesta.

Para la versión con la que se trabajó de BenMAP 1.5.0 que hay más de cien funciones del impacto a la salud incluidas como predeterminadas. Para ellos se basó en un estudio con el que cuenta el programa y que asocia varias enfermedades del dióxido de nitrógeno como del material particulado. (Costa et al., 2014).

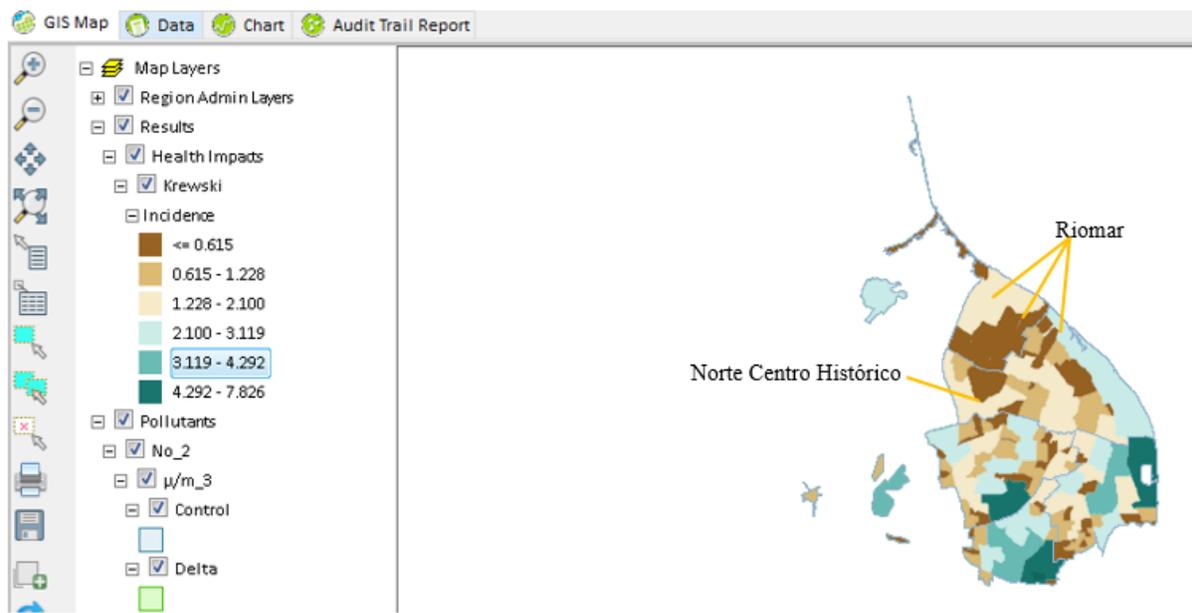


Gráfica 8. Estudios a evaluar de las enfermedades presentes en Barranquilla.

Fuente:(Mendoza Hernandez, 2021).

Una vez seleccionadas las enfermedades respiratorias a evaluar, se procedió a estimar el efecto sobre la salud en relación a un cambio en la unidad en la contaminación del aire. Para el presente análisis se asociaron estudios del contaminante Dióxido de Nitrógeno como de Material Particulado para que el software pueda realizar la estimación, debido a que el contaminante solo es complicado de estudiar, el software Benmap cuenta con una base de estudios para realizar esta estimación y focalizar las zonas que se verían mas afectadas por este contaminante.

Es así, como en la siguiente gráfica podemos observar la población que se puede ver afectada por el contaminante Dióxido de Nitrógeno. Para esta ocasión solo se consideraron las enfermedades de asma y EPOC debido a los datos suministrados por el ente de salud. Es importante resaltar que en el gráfico se aprecian todas las localidades de la ciudad de Barranquilla debido a la información de salud suministrada, sin embargo, para las localidades estudiadas (Norte Centro Histórico y Riomar)

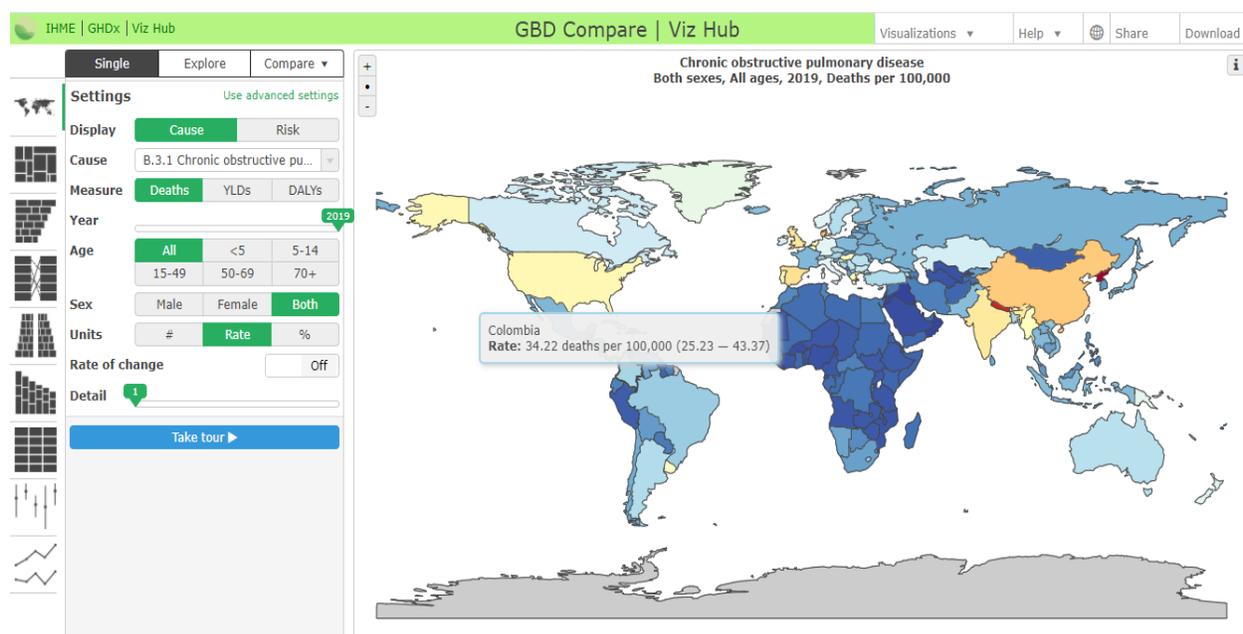


Gráfica 9. *Estimación de exposición a enfermedades por contaminación del aire.*

Fuente:(Mendoza Hernandez, 2021).

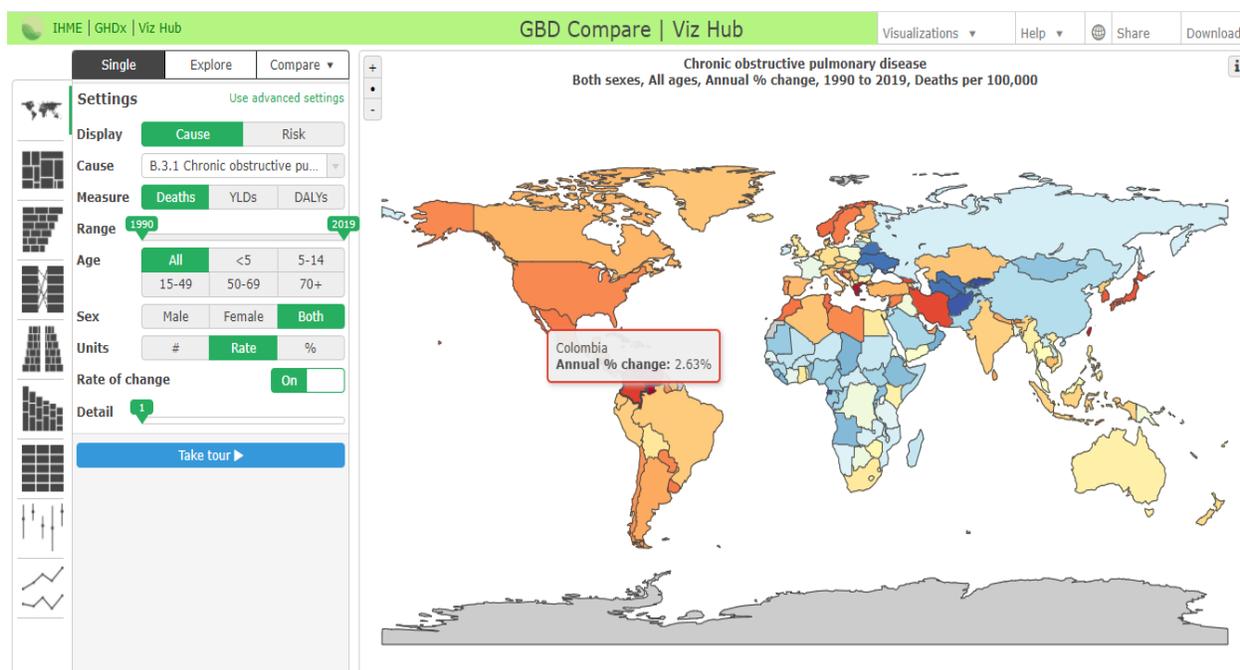
Con base a lo anterior se puede observar las afecciones que puede traer el contaminante Dioxido de Nitrogeno a la población barranquillera, si bien el área de estudio de las localidades Riomar y Norte Centro histórico se verán afectadas debido al aumento del parque automotor y la zona industrial que lo rodea, no obstante, en la escala representa en la grafica 9, corresponde a la incidencia de este contaminante con respecto a las concentraciones dada, para la cual la localidad Norte Centro Historico, cuenta con variedad de población entre la edades de primera infancia y adulto dando una incidencia de afectación entre 1.228 y 2.100 valores basados en la frecuencia de los datos de salud suministrados, sin embargo, la localidad de Riomar presenta una mayor incidencia de afectación debido a que esta si cuenta con área de influencia directa la zona industrial dando valores en la escala de 2.100 y 3119,y reportes a las entidades de salud sobre problemas de enfermedades respiratorias de las evaluadas para esta grafica.

Actualmente, Colombia desde 1990 hasta el 2019 ha presentado una tasa 14,22 muertes por enfermedades que están asociadas a contaminantes atmosférico, todas han causado la muerte a distintas las edades y géneros, y la mayoría atribuibles a las partículas ambientales de la contaminación del aire, esto es basado en el análisis que realiza *Institute for Health Metrics and Evaluation*. Es así, que para determinar las enfermedades respiratorias frecuentes se baso en estudios y estimaciones a nivel mundial donde se relaciona que el contaminante Dióxido de Nitrógeno se asocia a enfermedades respiratorias que son las que afectan a los barranquilleros



Gráfica 10. Tasa de muertes por enfermedades asociadas a la contaminación del aire.

Fuente: (IHME, 2019)



Gráfica 11. Porcentaje de evaluación con respecto al objetivo anual de reducción de enfermedades asociadas a la contaminación del aire.

Fuente: (IHME, 2019)

3.2. Estrategias para disminuir las afecciones ambientales y enfermedades respiratorias por el NO₂

Como bien se ha comentado a lo largo del presente trabajo las afecciones a la salud y al ambiente están dadas por el contaminante Dióxido de Nitrógeno los cuales son responsables de importantes efectos sobre la salud y el medio ambiente, en los cuales se encuentran asociados problemas respiratorios o daño pulmonar, mayor susceptibilidad a las infecciones, daño celular, irritación ocular y pérdida de las mucosas.

El NO₂ puede reaccionar con la humedad presente en la atmósfera para formar ácido nítrico que puede ser causa de corrosión de las superficies metálicas y detener el crecimiento de plantas. La fuente principal de Dióxido de Nitrógeno es la combustión de combustibles fósiles como petróleo, carbón o gas natural como bien se ha comentado a lo largo de este trabajo. Por ello son característicos de áreas urbanas e industriales. El dióxido de nitrógeno sus emisiones más importantes corresponden a los vehículos (la combustión de gasoil produce 40 veces más óxidos de nitrógeno que la de gasolina) e industrias. También dentro de las actividades que contribuyen se encuentran las incineradoras, las fábricas de vidrio y las cementeras, las cuales todas se encuentran representadas en la ciudad de Barranquilla y cercana a los puntos de monitoreos.

Para determinar cuáles son las estrategias que permitirían la disminución de las afecciones ambientales y enfermedades respiratorias cabe resaltar que serán medidas a largo plazo y algunas a mediano plazo, puesto que su implementación va más allá de los costos y cambio de visualización a encontrar soluciones sostenibles.

En lo que muchas ciudades han implementado es fomentar que el parque vehicular tenga ciertas restricciones con respecto al pico y placa dando así menos circulación vehicular, el cual conlleva a disminución de la contaminación por emisiones. También se habla de aquellas

estrategias que corresponden a la implementación de espacios verdes que tienen como función captar contaminantes que se encuentran suspendidos en la atmósfera y brindar un aire más limpio. Para iniciar el cambio en la ciudad de Barranquilla se propone un programa de salud ambiental el cual debe contemplar indicadores correspondientes a la salud ambiental y una relación a los diversos contaminantes de aire que se presente en la ciudad.

Implementar un programa de gestión enfocado para la calidad del aire desde una perspectiva de salud ambiental tiene como objetivos generar capacidades sociales para afrontar los problemas de la contaminación atmosférica en su dimensión y contexto, tomando como base la salud de la población estudio y el desarrollo de acciones con una visión integral de las causas que generan el problema y las estrategias para lograr su solución.

Este modelo busca la solución del problema, ya que es importante para reducir las fuentes contaminantes y crear una cultura de prevención y manejo de riesgos en todos los grupos de población. Esto conlleva reducir amenazas en el territorio, los ecosistemas y las comunidades, y disminuir la vulnerabilidad social frente a la amenaza de contaminación.

Para ello es necesario un abordaje del problema desde su complejidad, conociendo las causas estructurales que lo provocan y los efectos que tiene, así como desarrollar capacidades institucionales, socio-organizativas, técnicas e instrumentales a los diferentes niveles donde se da el problema. Para un análisis detallado se relaciona en el siguiente mapa conceptual se analiza los principales problemas que aborda las principales causas y efectos de la contaminación del aire:

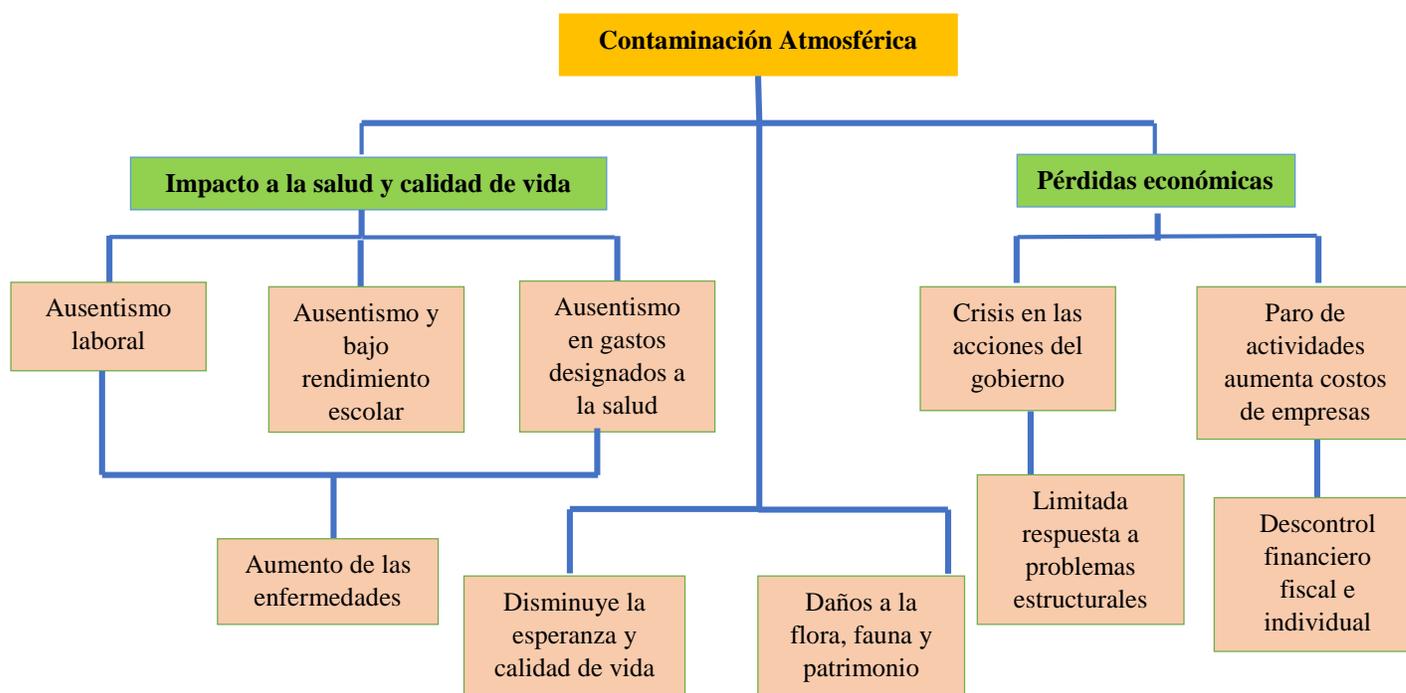


Figura 10. principales problemas que aborda las principales causas y efectos de la contaminación del aire.

Los programas enfocados a la mejora de la calidad del aire es una prioridad para la calidad de vida y salud de un territorio y su población. Por ello un modelo de gestión para lograr la calidad del aire ha de considerar las siguientes características básicas, propuestas por García Bátiz (2006), la cual comenta unos tiempos a largo plazo, trabajar en red, ser participativo, transparente y eficaz.

Para una planificación a largo plazo implica aspectos como:

- Restablecer el equilibrio en la atmósfera, conocer la situación real del problema:
 - Identificar las fuentes que más contribuyen al mismo.
 - Cuantificar y monitorear esas fuentes.
 - Evaluar y vigilar el impacto que tienen sobre la salud del territorio y la población.

Así mismo la generación de planes, proyectos, programas y estrategias que permitan la participación de diferentes entidades e incluso de la población permitirá la identificación de esas causas estructurales del problema para priorizar aquellas que propagan reducir los contaminantes mediante el uso de tecnologías, mejora de combustibles, vigilar y aplicar la normatividad y fomentar la cultura de prevención y manejo de riesgos, así como mantener espacios reductores de contaminantes.

Compartir las visiones sobre el problema y la búsqueda de soluciones. Replantear las políticas de desarrollo urbano, transporte, energéticas, fiscales, ambientales y de salud pública, y generar consensos y compromisos para el bien colectivo deben ser parte del desarrollo de esas estrategias para que los ciudadanos también accedan a información de carácter pública y se involucren en ellas.

Dentro de esta planificación es importante trabajar en red a todos los niveles y en forma cooperativa (todas las localidades de la ciudad de Barranquilla) y con todos los involucrados tanto en la generación del problema como en su solución.

Sigue siendo importante la participación amplia y representativa a fin de mantener un diálogo continuo en el análisis y solución del problema, que involucre a las autoridades de salud, ambientales, los sectores productivos y los grupos de la comunidad (jóvenes, adultos, escuelas, universidades, investigadores, líderes de la comunidad, especialistas).

No obstante, un esquema de trabajo eficaz en ello ha de considerar la vigilancia pública y evaluación permanente del desempeño de las instituciones y los sectores involucrados en la generación del problema y su solución, con el fin de conocer y evaluar permanentemente los resultados obtenidos en el logro de los objetivos de la calidad del aire, a partir de los compromisos

generados. La transparencia en la ejecución de estrategias y acciones, recursos y resultados obtenidos por los planes, programas y proyectos aplicados, manteniendo siempre una cultura de rendición de cuentas y estrategias de comunicación accesibles a todo tipo de públicos.

Para la implementación de todas las estrategias que van encaminadas a la mejora del ambiente por parte de las emisiones atmosféricas es importante toda aquella información acerca del estado de salud de la población correspondiente a un factor o riesgo ambiental con el fin de proveer información útil para apoyar los procesos de toma de decisiones e iniciativas.

Se propone que se establezcan indicadores dentro de un marco de trabajo que permita integrarlos con otras medidas o programas a nivel local e incluso proponer a ciudades que se ajustan a integrarlos.

Estos indicadores deben ser confiable considerando el factor ambiental-estado de salud que se estudia y que lo ideal que es que se pueda recopilar de una forma rutinariamente (basado en planes de trabajo). La selección de indicadores puede estar orientados a:

- Aquellos objetivos de salud pública que estén asociados a estudios epidemiológicos con el fin de que sean base de estudio para los modelos estadísticos de la tasa de incidencia en una población.
- Accesibilidad a diferentes puntos de la ciudad promocionando medidas que contribuyan a una base de datos epidemiológicos para la ciudad.
- Mediciones constantes para generar bases de datos más congruentes en periodos de tiempo diario, mensual y anual.
- Incorporar acciones, estrategias, intervenciones por parte de salud pública y las entidades ambientales.

- Generar programas intersectoriales para el monitoreo y vigilancia de la contaminación atmosférica y la salud (morbilidad, mortalidad, ausentismo escolar y laboral, costos económicos, daños a los ecosistemas) en grupos vulnerables y zonas críticas, entre universidades, entes de salud, entes regulatorios en materia ambiental y sector productivo.
- Establecer cronogramas para que la obtención de los resultados sea oportuno y coordinado bajo un plan de trabajo.
- Proponer plataformas digitales y vigentes con información actualizada y de manera pública para que la población de la ciudad esté al tanto del estado de la calidad del aire.
- Información actualizada y pública para la población que genere conciencia para cambios y acciones que contribuyan a cambios en el ambiente.

No obstante, para que un programa sea eficiente y busque la reducción de la afectación ambiental y las enfermedades es necesario también contar con indicadores ambientales enfocados al sector de salud pública, que aporten información que sean factibles para llevar a cabo las estrategias. Los indicadores pueden variar con el tiempo, puesto que, este dependerá de los avances tecnológicos y mejoramiento de nuestra comprensión de las relaciones entre los factores ambientales y la salud de la población.

Es así como, la selección de indicadores ambientales en salud pública (Daniels Cardozo et al., 2007) puede estar orientado a:

- Indicadores de peligro que corresponde aquellas actividades que identifican potencial de exposición a un contaminante o a una condición de peligro.
- Indicadores de exposición estos son los que puede identificarse en la persona u organismo si existe la presencia de una sustancia o combinación de sustancias que pueden ser perjudiciales para la salud.

- Indicadores de efecto en la salud aquellas enfermedades o condiciones que identifican efectos adversos de la exposición a peligros ambientales conocidos o sospechados.
- Indicador de intervención programas o políticas que minimizan o previenen un riesgo ambiental, una exposición o un efecto en la salud.

Actualmente en Colombia hay ciudades donde ya se implementan indicadores ambientales epidemiológicos para la vigilancia de la calidad del aire (Daniels Cardozo et al., 2007), el cual puede adaptarse estos indicadores, al igual que la asignación de aquellos entes participativos que puedan suministrar en periodos de tiempo información para uso de análisis.

Tabla 6. *Indicadores ambientales epidemiológicos para la vigilancia de la calidad del aire*

Indicador	Fuente de información	Frecuencia
Indicador de Peligro		
<ul style="list-style-type: none"> • Concentración de contaminantes criterios y no convencionales con efectos carcinogénicos. • Número de días por encima de la norma. 	Red de Monitoreo de la Calidad del aire	Horario, diario, mensual y anual
<ul style="list-style-type: none"> • Proporción de incremento del consumo de combustible gasolina y diésel 	Ministerio de Minas y Energía	Mensual
<ul style="list-style-type: none"> • Proporción de incremento de la densidad vehicular 	Secretaria Tránsito y Transporte	Mensual
<ul style="list-style-type: none"> • Proporción de incremento de emisiones de fuentes fijas y móviles. 	Autoridades Ambientales y Alcaldía de Barranquilla	Semestral
Indicador de efecto en la salud		
<ul style="list-style-type: none"> • Número y proporción de consultas de urgencia por enfermedades respiratorias, asma, EPOC. 	Registros hospitalarios	Semanal
<ul style="list-style-type: none"> • Proporciones de incidencia de enfermedad respiratoria, asma y enfermedad cardiovascular en adultos 	Estadísticas secretaria distrital de Barranquilla	Mensual
<ul style="list-style-type: none"> • Tasas de mortalidad general, respiratoria, cardiovascular y por cáncer de pulmón en adultos. 	Certificados y base de datos de actas de defunción	Anual

• Proporciones de incidencia en menores de 14 años por enfermedad respiratoria en niños	Eps, IPS, hospitales, salud pública	Mensual
• Número y proporción de consultas de urgencia por enfermedad respiratoria en niños	Eps, IPS, hospitales, salud pública	Semanal
• Frecuencia de consumo de medicamentos para el asma (opcional)	Eps, IPS, hospitales, salud pública	Semestral
• Ausentismo escolar por enfermedad respiratoria	Eps, IPS, hospitales, salud pública	Mensual
• Ausentismo laboral por enfermedad respiratoria • Proporción de morbilidad sentida por causas respiratorias, asma auto percibida. • Promedio función ventilatoria en grupos seleccionados.	Encuestas poblacionales y estudios espaciales	Mensual u ocasional
Indicador de intervención		
• Tasa de reconversión de vehículos al uso de combustibles limpios	Secretaria de Tránsito y transporte	Semestral
• Tasa de disminución de emisiones vehiculares.	Autoridades Ambientales y Alcaldía de Barranquilla	Semestral

Formular los elementos necesarios para establecer o fortalecer programas de vigilancia, medidas orientadas a mejorar la calidad del aire, prevenir su deterioro y medidas destinadas a disminuir el impacto de la contaminación del aire sobre la salud durante los estados de alerta en exteriores en una zona determinada.(Korc, Marcelo E.; Maisonet, 2002). Se sugiere que un grupo local de trabajo multidisciplinario e interinstitucional, liderado por una institución del gobierno local, la cual sea responsable de elaborar y coordinar de las estrategias propuestas. Una vez establecido el grupo local de trabajo, la implementación de las estrategias debe tener en cuenta una fase de diagnóstico y una fase de elaboración.

En la fase de diagnóstico se deberá establecer las causas de la contaminación del aire en la zona de interés y evaluar su impacto en la sociedad. Es importante conocer la frecuencia y

resultados de monitoreos de aquellas fuentes fijas, con el fin de realizar un breve diagnóstico de la contaminación del aire en interiores, en este estudio se deberán efectuar las siguientes acciones:

- Definir los límites geográficos de la zona de interés de acuerdo con las condiciones topográficas y meteorológicas, las divisiones políticas y el uso de tierras.
- Caracterizar las emisiones a la atmósfera de los contaminantes incluidos en los estándares nacionales de calidad ambiental del aire, a través de la recopilación, revisión y síntesis de los inventarios de emisiones y estudios existentes.
- Elaborar un inventario de emisiones en exteriores mediante métodos rápidos de evaluación.
- Evaluar la distribución espacial y temporal de las concentraciones de los contaminantes incluidos en los estándares nacionales de calidad ambiental del aire a través de la recopilación, análisis e interpretación de los datos existentes.

No obstante, para que las estrategias que ayuden a la disminución del contaminante atmosférico dióxido de nitrógeno y mitigar las afecciones ambientales y enfermedades respiratorias se deberá incluir elementos que nos exprese o informes las fuentes de contaminación, el estado actual de la calidad del aire y el impacto de la contaminación del aire en la sociedad:

Tabla 7.

Elementos a considerar para las estrategias a disminución de contaminante atmosférico NO₂

Elementos	Explicación
Zona de interés	Información general
	Descripción de las fuentes de contaminación del aire.
	Estado de la calidad del aire existente.
	Impacto de la contaminación del aire en la sociedad.

Objetivos y metas	Aquellos que estén enfocados en el cumplimiento de las estrategias a implementar enfocándose a la vigilancia de la calidad del aire y salud.
Programación de las medidas de acción	<ul style="list-style-type: none"> - Medidas para establecer o fortalecer el programa de vigilancia de la calidad del aire y la salud; - medidas para mejorar la calidad del aire y prevenir su deterioro; - Medidas para establecer o fortalecer el programa de vigilancia de la calidad del aire y la salud; - medidas para mejorar la calidad del aire y prevenir su deterioro; - Medidas para aplicar durante los estados de alerta
Cronograma, financiamiento y asignación de roles y responsabilidades	Se establecerá el plan de trabajo, las responsabilidades al igual que la estimación de un presupuesto.

Fuente: (Korc, Marcelo E.; Maisonet, 2002)

No obstante, es importante conocer las características del área de estudio como la geografía, el clima, el transporte, la industria, la población y el desarrollo urbano. Para ello se debe considerar información general sobre la zona de interés y se contempla incluir una descripción de Geografía y clima, límites geográficos, condiciones topográficas y climáticas, comportamiento de la atmósfera, uso de suelos.

También es importante el conocimiento del tipo de transporte e industria (tipo, cantidad y calidad del combustible que se consume, volumen y edad del parque automotor, índice de motorización y tendencias de crecimiento en este terreno, distribución del transporte urbano, situación actual de las rutas, número y tipo de industrias) aspectos que nos ayudara analizar la fuente de contaminación. Por otro lado, de información de interés entra lo relacionado a:

- Población y desarrollo urbano.
- Estructura y tendencias del crecimiento demográfico.
- Desarrollo urbano y sus actividades socioeconómicas.
- Distribución demográfica y geográfica de los empleos.
- Ubicación de los servicios de saneamiento básico, como, por ejemplo, rellenos sanitarios y plantas de tratamiento de aguas residuales

La información base o general es importante para la estimación del impacto en la sociedad con respecto a la contaminación del aire que se presente en el área de estudio. Los indicadores que se han mencionado para la elaboración de las estrategias y para dar la estimación del impacto en la salud deben ser relevantes para las políticas de salud que se pretende establecer y sensibles a los cambios de orientación de estas políticas.

En tal caso, se esperaría que una mejoría en la calidad del aire derive en una reducción en el número de ocurrencias del indicador de efecto sujeto a vigilancia. Por ello, es importante que se evalúe la literatura epidemiológica sobre los efectos de la contaminación del aire durante el proceso de selección de los indicadores de efectos en la salud (Korc, Marcelo E.; Maisonet, 2002).

Los indicadores deben ser simple y puntuales al igual que considerar un aspecto como lo es lo económico para que este sea llevado a cabo. Lo que se pretende es que se trabaje con datos de buena calidad y previamente recopilados. Algunos de los indicadores de efectos en la salud recomendados en la literatura sobre la contaminación del aire son los siguientes(Korc, Marcelo E.; Maisonet, 2002):

- Mortalidad total.
- Mortalidad por enfermedades respiratorias.

- Admisiones en hospitales por enfermedades respiratorias.
- Visitas a salas de emergencia por enfermedades respiratorias.

La verificación de la vigilancia epidemiológica estaba basada en que existente recopilación de datos basados en los indicadores de efecto dentro de alguna de estas categorías para su zona de interés.

El plan de trabajo que se estipule debe estar coordinar con la institución competente para la selección e inclusión de indicadores en el programa, puesto que estos son los que colocaran en marcha para la ejecución de las estrategias. Eventualmente, la disponibilidad de los datos sobre los efectos en la salud y las mediciones de calidad del aire permitirán llevar a cabo estudios epidemiológicos de series cronológicas, con los que se podrá estimar el impacto de la contaminación del aire en la salud de la población. En el caso de que no exista la experiencia para realizar este tipo de estudios, se sugiere, como primer paso, usar la metodología desarrollada por la OMS (Organización Mundial de la Salud).

Contemplando lo anterior, es importante para establecer las medidas para mejorar la calidad del aire y prevenir su afección ambiental y el aumento de las enfermedades respiratorias que se asocian a él. A continuación, se describen todas aquellas gestiones que conlleve a implementar las medidas orientadas a mejorar la calidad del aire y su afección ambiental y el aumento de las enfermedades respiratorias en la ciudad de Barranquilla, contemplando los problemas identificados en el diagnóstico de línea de base (información suministrada por el ente de salud y complementado con el monitoreo realizado).

Para iniciar la gestión de debe indicar la justificación, los objetivos y metas, los resultados esperados, cronograma y plan de trabajo para alcanzar estos objetivos, no obstante, se contemplan

aspectos como el presupuesto, las instituciones responsables y los indicadores para la medición del éxito.

Las medidas deberán estar coordinadas con la estrategia nacional CONPES AIRE 3943, Estrategia Nacional de Calidad del aire 2019-2022 y el Plan de Desarrollo Nacional 2018- 2022, Pacto por la Sostenibilidad, las cuales están orientadas a lo que se presenta en la situación actual del área de estudio y eficientes en función de los costos. Como se ha mencionado anteriormente, la ejecución de estrategias o medidas para que sean efectivas están relacionadas en función de los costos los cuales pasaran por un proceso evaluativo económicamente.

Este será significativo, para el análisis costo-beneficio y de costo-efectividad. Sin embargo, ciertas medidas se deben establecer inmediatamente, con anterioridad a la aprobación del plan y sin que sea indispensable realizar análisis económicos, tal puede ser el ejemplo, de aquellas medidas que se deberían aplicar inmediatamente las medidas y que se adopten a escala local y algunas de las medidas aplicadas durante los estados de alerta dado por las concentraciones encontradas en el área de estudio.

Las medidas locales para mejorar la calidad del aire deberán incluir disposiciones políticas, administrativas, técnicas y sociales. Estas deberán implementarse gradualmente, tomando en cuenta las actividades nacionales. Basada en estudios y que se pueden adaptar se contemplan las siguientes estrategias dando responsabilidades a sectores con el fin de involucrar a todos es así como se disponen aquellas como:

- Disposiciones políticas:
 - Formulación de métodos y edictos distritales que incentiven el uso de tecnologías eficientes y sostenibles en cuanto al consumo de la energía (industrias) y que sean

menos contaminantes, así como el empleo de fuentes de energía menos contaminantes o que sean renovables.

- Aumentar la inclusión del componente de calidad del aire en los planes locales de desarrollo y en las actividades relativas a la planificación urbana.
- Fortalecer los programas para mejorar el sistema de gestión del tráfico y la infraestructura de transporte local.

Para la parte administrativa y técnicas que contempla entidades ambientales como de salud se tiene:

- Establecer y fortalecer las instituciones encargadas de elaborar e implementar el programa de salud ambiental en conjunto con las instituciones responsables del programa de vigilancia epidemiológica de la ciudad.
- Constitución de comités técnicos interdisciplinarios en los que estén representadas diversas instituciones para apoyar la preparación e implementación del programa de salud ambiental.
- Fortalecimiento de la aplicación de las medidas otras medidas adoptadas a nivel nacional que sean implementadas en la ciudad, como los programas de revisión técnica de vehículos, la mejora de la calidad de los combustibles y el acatamiento de los límites máximos permisibles por parte de las industrias y del transporte público y privado.
- Fomento de compromisos voluntarios para la reducción de contaminantes del aire.
- Fortalecer el desarrollo que se viene generando en entorno ecológico y áreas verdes.
- Implementación de programas para mejorar el sistema de gestión del tráfico y la infraestructura de transporte.

- Implementación de planes locales de desarrollo y de ordenamiento territorial urbano y rural que incluyan el componente de calidad del aire.
- Promoción del desarrollo y del consumo de tecnologías eficientes en cuanto al uso de la energía y que sean menos contaminantes.
- Sensibilización pública y fomento de cambios de conducta.

Artículo
publicado en
revista de
alto impacto

Capítulo 4

4. Artículo publicado en revista de alto impacto

El artículo científico publicado en la revista Science of the Total Environment, titulado Assessment of the NO₂ distribution and relationship with traffic load in the Caribbean coastal city con DOI <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137675>: A su vez, los resultados parciales de la investigación fueron presentados con el título Analysis of NO₂ spatial variability in a Caribbean city en la siguiente conferencia internacional: 12th International online conference on air quality, science & application en Thessaloniki, Greece, 5 June 2020.

Science of the Total Environment 720 (2020) 137675



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv



Short Communication

Assessment of the NO₂ distribution and relationship with traffic load in the Caribbean coastal city



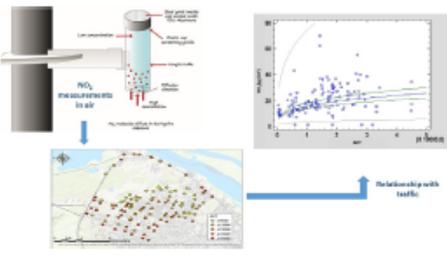
Dayana Agudelo-Castañeda^{a,*}, Fabrício De Paoli^b, Wendy B. Morgado-Gamero^c, Martha Mendoza^a, Alexander Parody^d, Aymer Y. Maturana^a, Elba C. Teixeira^e

^a Department of Civil and Environmental Engineering, Universidad del Norte, Km 5 via Puerto Colombia, Barranquilla, Colombia
^b MDN Ingeniería y Oceanografía, Cra 49C # 100 - 103, Barranquilla, Colombia
^c Department of Exact and Natural Sciences, Universidad de la Costa, Calle 58#55-66, Barranquilla, Colombia
^d Engineering Faculty, Universidad Libre Barranquilla, Cra 46 No 48-170, Barranquilla, Colombia
^e Postgraduate Program in Remote Sensing, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, RS 91501-970, Brazil

HIGHLIGHTS

- NO₂ ambient concentrations measured in a coastal Caribbean city.
- 137 Passive diffusion tubes from Gradko® were installed.
- NO₂ correlation with load traffic load was higher than with maximum traffic.
- Multiregression as very effective method to understand NO₂ distributions
- Scientific evidence for the relationship between NO₂ and traffic

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:
Received 26 November 2019

ABSTRACT

NO₂ ambient concentrations were measured in a coastal Caribbean city. Barranquilla is a Caribbean city located in the North of Colombia that has a approximately 1.200.000 inhabitants and possesses a warm, humid climate. In

Figura 11. Producto, Artículo Publicado.

Fuente:(Agudelo-Castañeda et al., 2020)(Mendoza Hernandez, 2021)



Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment



Short Communication

Assessment of the NO₂ distribution and relationship with traffic load in the Caribbean coastal city



Dayana Agudelo-Castañeda ^{a,*}, Fabrício De Paoli ^b, Wendy B. Morgado-Gamero ^c, Martha Mendoza ^a, Alexander Parody ^d, Aymer Y. Maturana ^a, Elba C. Teixeira ^e

^a Department of Civil and Environmental Engineering, Universidad del Norte, Km 5 via Puerto Colombia, Barranquilla, Colombia

^b MDPA Ingeniería y Oceanografía, Cra 49C # 100 – 103, Barranquilla, Colombia

^c Department of Exact and Natural Sciences, Universidad de la Costa, Calle 58#55-66, Barranquilla, Colombia

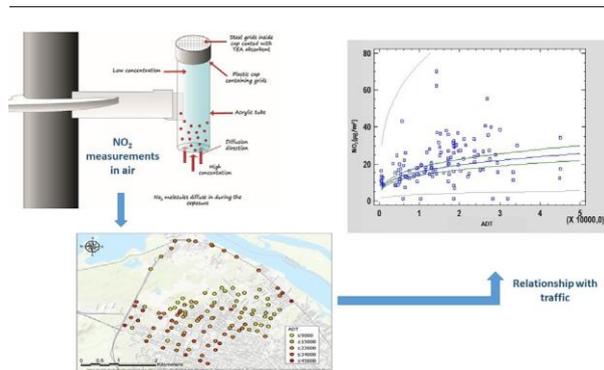
^d Engineering Faculty, Universidad Libre Barranquilla, Cra 46 No. 48-170, Barranquilla, Colombia

^e Postgraduate Program in Remote Sensing, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, RS 91501-970, Brazil

HIGHLIGHTS

- NO₂ ambient concentrations measured in a coastal Caribbean city.
- 137 Passive diffusion tubes from Gradko® were installed.
- NO₂ correlation with load traffic load was higher than with maximum traffic.
- Multiregression as very effective method to understand NO₂ distributions
- Scientific evidence for the relationship between NO₂ and traffic

GRAPHICAL ABSTRACT



article info

Article history:

Received 26 November 2019

Received in revised form 22 January 2020

Accepted 1 March 2020

Available online 03 March 2020

Editor: Pavlos Kassomenos

Keywords:

Spatial distribution of NO₂

Diffusive sampling

Spatial variability Regression

model

Application of a neural network

abstract

NO₂ ambient concentrations were measured in a coastal Caribbean city. Barranquilla is a Caribbean city located in the North of Colombia that has approximately 1.200.000 inhabitants and possesses a warm, humid climate. In order to obtain the concentration of the contaminant in an adequate resolution, 137 Passive diffusion tubes from Gradko® were installed. Tubes prepared with 20% Triethanolamine/De-ionised water were located at the roadside between 1 and 5 m from the kerb edge. The sampling period was two weeks, from 3/16/2019 to 3/30/2019. Samples were analyzed on the UV CARY1 spectrophotometer by Gradko®. Results showed an average of $19.92 \pm 11.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, with a maximum and minimum value of 70.27 and $0.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. NO₂ correlation with load traffic load was higher than with maximum traffic. The expected results include the analysis of the areas of the city with high concentrations of this pollutant that exceed the limit values established by the WHO in six (6) points; however, they never exceed the local legal limit for annual exposure, which is significantly less restrictive. Overall, the multiregression analysis is a very effective method to enrich the understanding of NO₂ distributions. It can provide scientific evidence for the relationship between NO₂ and traffic, beneficial for developing the targeted policies and measures to reduce NO₂ pollution levels in hot spots. This research may subsidize knowledge to serve as a tool for environmental and health authorities.

© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

* Corresponding author.

E-mail address: mdagudelo@uninorte.edu.co (D. Agudelo-Castañeda).

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137675> 0048-

9697/© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Urban air pollutant distribution is a concern in environmental and health studies. Nitrogen dioxide (NO_2), one of the most concerning air pollutants, may contribute to the formation of atmospheric particles through various photochemical reactions, including atmospheric nitrous acid, nitrate particles, which form an essential fraction of $\text{PM}_{2.5}$ and, in the presence of ultraviolet light, of ozone (O_3) that leads photochemical smog events (Jenkin and Clemitshaw, 2000; Rani et al., 2011). It is a severe problem in large cities because the primary sources of anthropogenic NO_2 emissions are combustion processes, vehicular traffic load, industrial boilers, and shipping. Under certain weather conditions, elevated NO_2 concentrations in urban areas with high population density can accumulate to dangerous levels and contribute to adverse health effects, such as inflammation of the airways, reduced lung function, and asthma development during infancy (Hassoun et al., 2019). Epidemiological studies have shown that bronchitis symptoms in asthmatic children increase in association with long-term exposure to NO_2 and reduced lung function growth (Achakulwisut et al., 2019). The increase of NO_2 concentrations not only severely affects human physical health due to reduced lung function but also to aquatic ecosystems due to acid deposition and eutrophication of soil and water (Thomas and Devasthale, 2017; WHO, 2006a, 2006b). Understanding near-road NO_2 impacts are essential due to the number of people living close to primary transportation sources (Kimbrough et al., 2017).

Passive diffusion tubes are lightweight, economical, and need no maintenance, on-site energy, and pumping. There are various methods of measuring atmospheric pollutants, within which passive sampling offers many advantages depending on the objective of the investigation.

The advantages of this method include its operational simplicity and its minimal need for labor, as well as the ease of its use due to the lack of maintenance and calibration of air pumps, the possibility of prolonged sampling times, minimum probability of committing personal errors, the general reliability of the acceptable method (NTP 151). However, peak values may not be observed or temporal variability, as in other automatic equipment. NO_2 diffusion tubes are an indicative monitoring technique: although ideal for screening studies and for identifying areas of high concentration, they do not offer the same precision and accuracy as the automatic chemiluminescence analyzer (Defra Working Group, 2008). In addition to the possibility of knowing the concentration of the pollutant at several points simultaneously in order to cover an extensive area when there is limited monitoring equipment cost-effectively. Even though they do not use a vacuum pump, passive diffusion tubes are exposed to the air, and the level of sampling is monitored through the level of diffusion of the pollutant into the sampler (Fick's law of diffusion) (Vintar Mally and Ogrin, 2015). By this means, passive diffusion tubes require more extended sampling periods, such as 24 h or more. The passive sampling method has an extensive use with several applications on the occupational exposure monitoring and mapping of the spatial variation of pollutant concentrations over geographical areas in cities (Felix et al., 2019; Lanzafame et al., 2016).

Barranquilla, driven by unprecedented economic growth, the explosive increase in urbanization and population, can experience severe NO_2 air pollution problems. Recent studies indicate increasing concentrations of NO_2 in developing countries, despite declining trends in developed countries, probably as a result of environmental regulation policies in the latter (Geddes et al., 2016; Zhang et al., 2017). However, many of

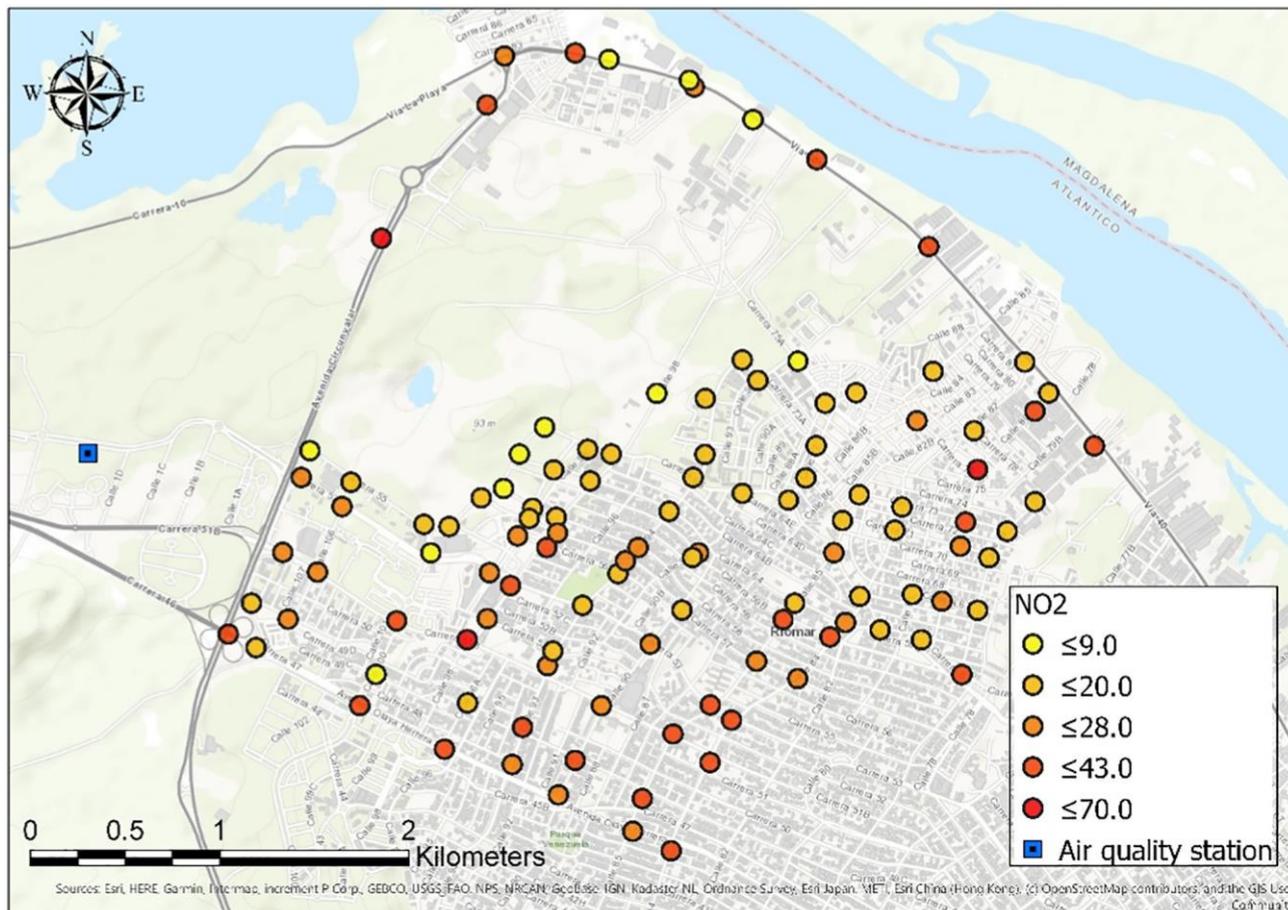


Fig. 1. Location of passive diffusion tubes for the sampling of NO_2 and measured concentrations.

the studies have been focused on megacities with different climates and deficiency in the number of monitoring points for NO_2 . Therefore, it is essential to perform a spatial assessment of the relationship between NO_2 and local environmental conditions, while few studies exist in Caribbean cities where local environmental conditions may be different. Moreover, the study area has a high pollution and traffic load in a Caribbean coastal city.

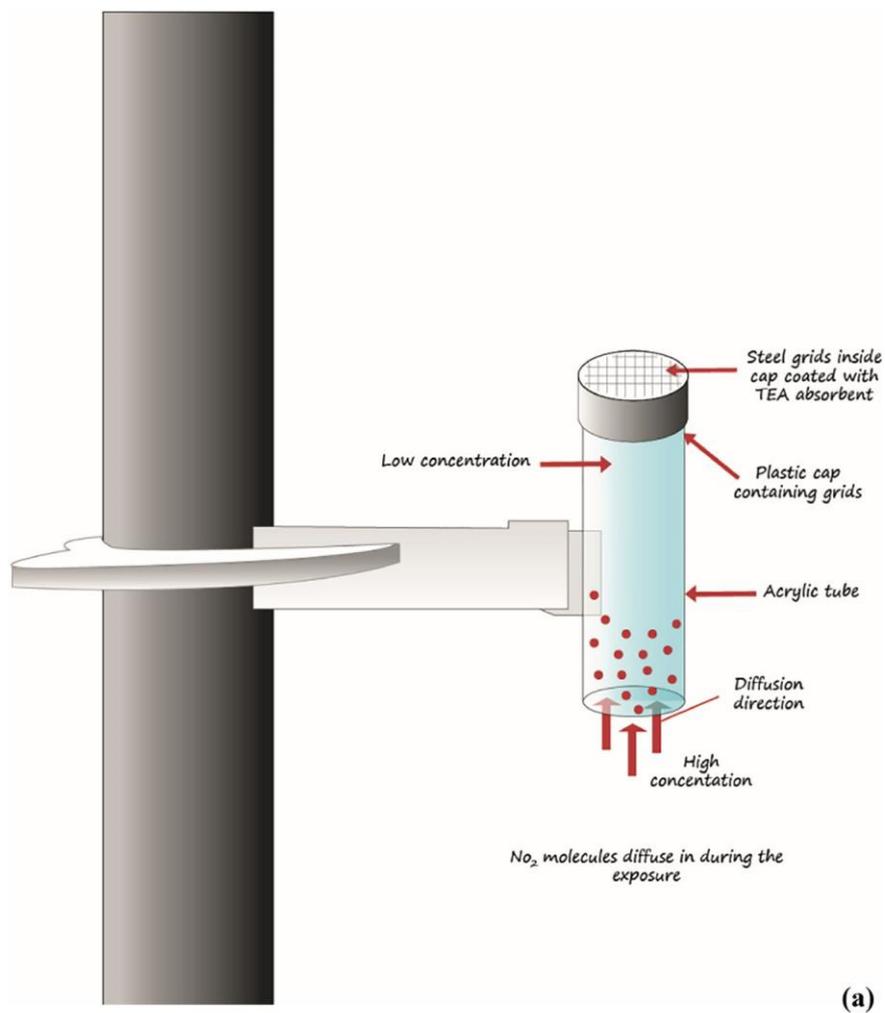


Fig. 2. Diffusion tube for passive sampling of NO_2 diagram (a) and installation process (b).

2. Material and methods

2.1. Study area

Barranquilla, one of the principals and most important cities of Colombia, is located on the western edge of the Magdalena River, 7.5 km from its mouth in the Caribbean Sea. The study area is the main economic center of the Caribbean Region of Colombia, principally commerce, and industry, with 154 km² of area and a population of about 1,193,952 inhabitants (Barranquilla, 2018). Among the industries may be included vegetable fats and oils, pharmaceuticals, chemicals, footwear, bus bodies, dairy products, sausages, beverages, soaps, building materials, furniture, plastics, cement, metalworking parts, clothing, and boats. Moreover, the maritime and fluvial terminals are engines of the industrial and commercial development of the Caribbean Region. Few industries use diesel as combustible, while mostly all use natural gas. The port of Barranquilla covers two main routes, the Magdalena River, which communicates with the interior of the country (advantage not possessed by other ports on the Caribbean coast) and the Caribbean Sea, which millions of tons traded with Europe and Asia. The study area has an extensive industrial area along the banks of the Magdalena River, along with several ports that store and export mineral coal and coke. Also, it has several incinerators of hazardous waste and brickkilns.

The study area is characterized by few rainy days; annual totals do not exceed 1000 mm. The number of rainy days during the year ranges from 50 to 100 mm. The annual regime is bimodal type; the primary rain season extends from September to November, and in the first half of the year, there is a short rainy season in May. Dry seasons occur between December and April, the main one, and a second one, with lower intensity in June, July, and August (IDEAM, 2019).

2.2. Sampling strategy, equipment, and traffic data

The sampling period was two weeks from 3/16/2019 to 3/30/2019 in the areas called Riomar and Norte Centro Historico in 114 points of Barranquilla. Fig. 1 shows the passive diffusion tubes' location. The passive diffusive samplers were positioned across different sites, on lampposts, street signs, a fence, or other appropriate sites according to Selecting Passive Diffusion Tubes Site criteria (Defra Working Group, 2008). Some of these criteria include an immediate area opened, which had allowed the free air circulation and avoided locations where they were likely to be affected by turbulence. Palmes diffusion tubes for passive sampling of NO₂ work by a process called molecular diffusion where compounds will move from an area of high concentration to an area of low concentration, as may be observed in Fig. 2. The compounds in the air are at a higher concentration than those in the tube, so the compounds diffuse into the tube and collect on the absorbent at the end of

the tube (Masey et al., 2017). More information on the theory behind molecular diffusion and the calculations of NO₂ concentrations may be found in the DEFRA Practical Guidance (Defra Working Group, 2008). Diffusion tubes were located at the roadside between 1 and 5 m from the kerb edge and placed at a height between 2 and 3 m to not underestimate the concentrations to which pedestrians are exposed. It was measured hourly traffic counts during *peak hours volume* (PHV in veh/h) and *average daily traffic* (ADT in veh/day). PHV was obtained using manual traffic counts. For each sampling site location, considering the road type, ADT was estimated using PHV measured data in a complete day.

2.3. Overview of NO₂ concentration measurement

In this research, the NO₂ concentration measurements were conducted in two steps: sample collection and laboratory analysis. Samples were collected for 337 h average. Acrylic tubes fitted with grey thermoplastic rubber caps were used (Fig. 2a). Passive diffusion tubes of 71.0 mm length x 11.0 mm internal diameter prepared with 20% TEA/water, model DIF 100 RTU from Gradko© Environmental (Gradko, 2012a), were installed as observed in Fig. 2b. Diffusion tubes were stored in sealable clean plastic bags, and afterward in plastic containers in a refrigerator to avoid contamination during transportation, including blanks as control. All tubes were clearly labeled with a unique sample code. A survey sheet was filled with site details and timings for each sample and provided to the laboratory.

Moreover, the 2018 hourly mean data of NO₂ of the study area was obtained from the local air quality station (Fig. 1) in order to understand the atmospheric chemistry. Values were measured every 5-min, and 1-h means were calculated after the validation methods were applied. Nitrogen oxides (NO, NO₂ and NO_x) and ozone (O₃) were measured by automatic analyzers of ENVIRONNEMENT S.A. models AC32M and O342M, respectively. Nitrogen oxides and ozone are measured by the chemiluminescence and UV light absorption method, respectively. Equivalent EPA methods are RFNA-0202-146 and EQOA-0206-148.

2.4. Laboratory analysis

Fig. 3 shows the passive diffusion tubes collection and analyzing procedures diagram. The analysis of NO₂ passive tubes was conducted at Gradko© Environmental laboratory in England by UV CARY1 spectrophotometer. Passive diffusion tubes for ambient measurements were evaluated under European Standards BS EN-13528 Part 1-3:2002/3 (EN 13528, 2002). The concentrations of nitrite ions and hence NO₂ chemically adsorbed are quantitatively determined by UV/Visible Spectrophotometry with a calibration curve derived from the analysis of standard nitrite solutions (UKAS Accredited Methods) (Gradko,



Fig. 3. Diffusive tubes collection and analyzing procedures diagram.

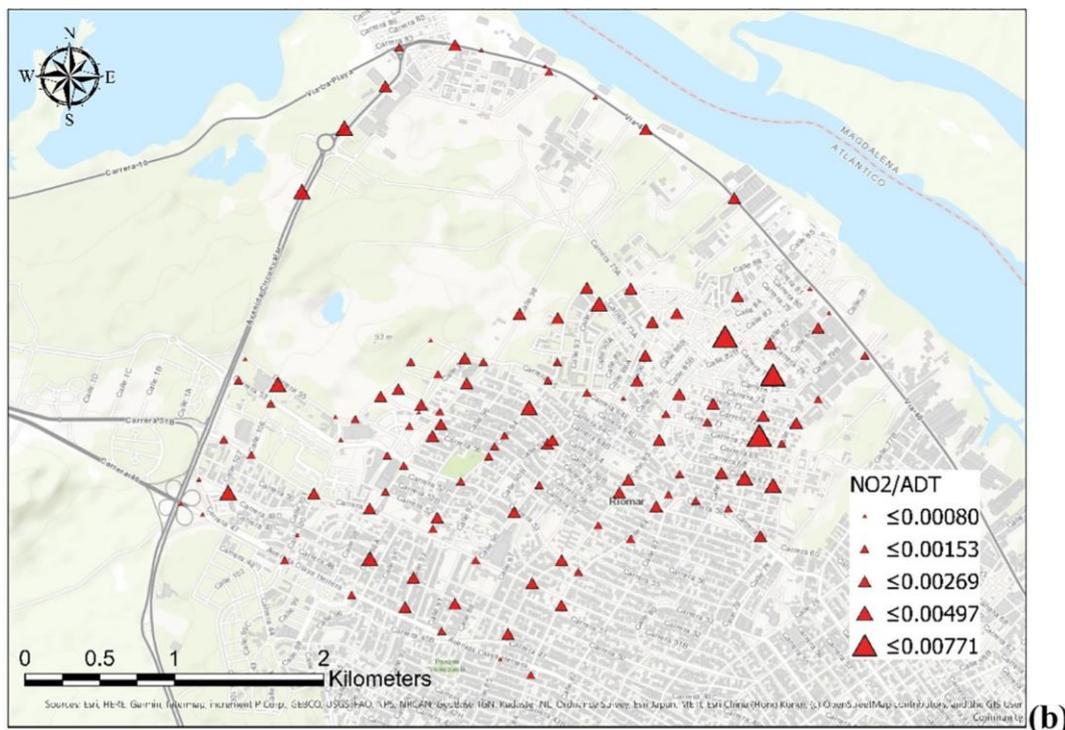
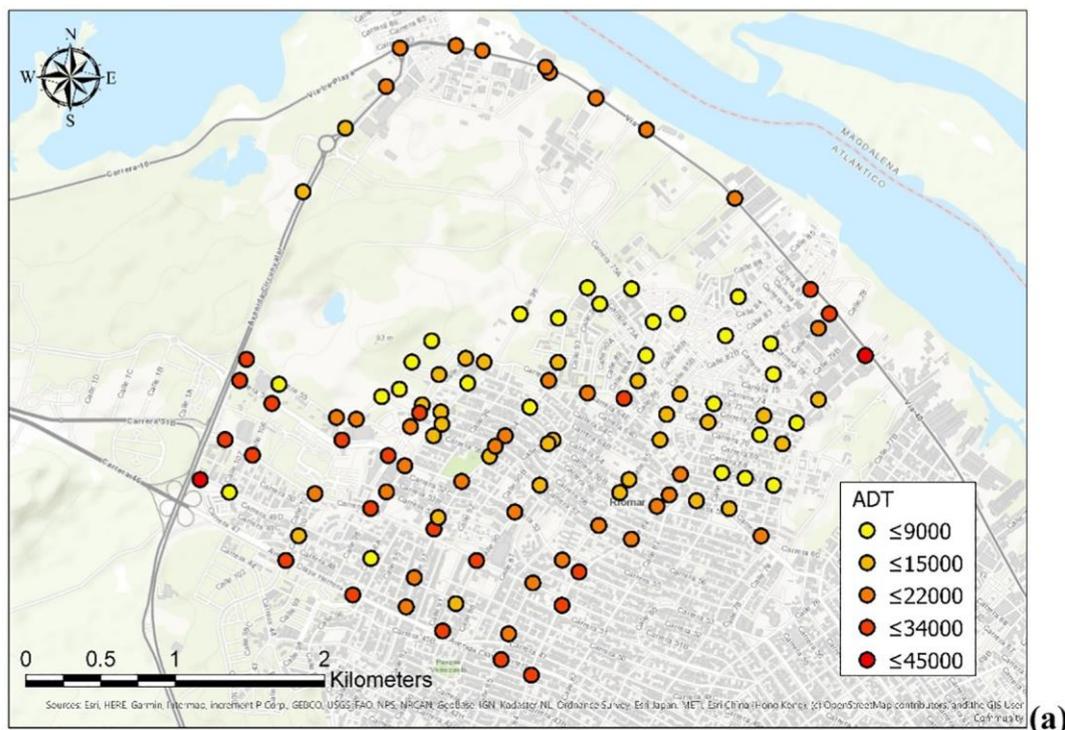


Fig. 4. a,b. Average daily traffic - ADT (a) and relation between NO₂ concentration/ADT (b).

2012b) as reference. Results have been corrected to a temperature of 293 K (20°). Uncertainty or overall M.U. was ±9.7%. The method detection limit (MDL) was 1.11 µg/m³.

Table 1
ANOVA of NO₂ and PHV.

Source	Sum of squares	Df	Mean square	F-ratio	P-value
Model	55,855.67	1	55,855.67	465.80	0.0000
Residual	15,349.05	128	119.9145		
Total	71,204.72	129			

2.5. Data analysis for NO₂ variation and traffic load assessment

The data was systematized in a spreadsheet by location data, ID passive sampler, exposure data, NO₂ concentration (µg/m³), and ADT (veh/ day) as independent variables. Data analysis was performed to

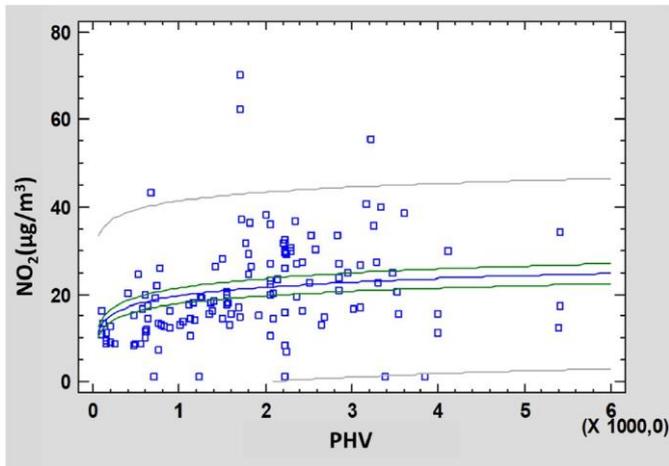


Fig. 5. Plot of fitted model between NO₂ and PHV

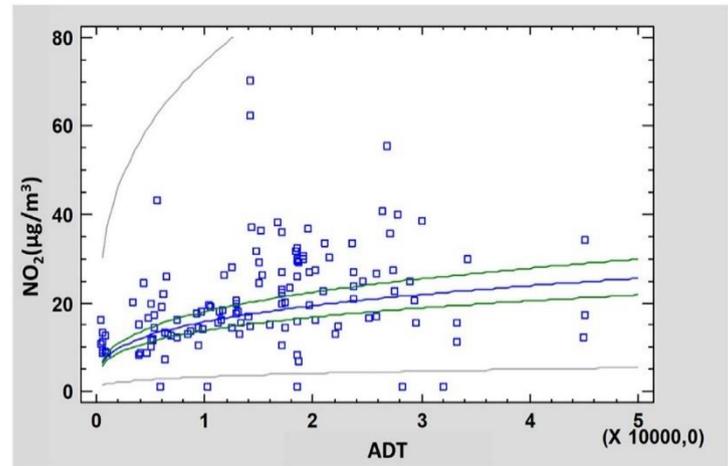


Fig. 6. Plot of fitted model between NO₂ and ADT

determine the significant statistical relationship and degree of association between variables: NO₂ concentration µg/m³, and ADT with a 95% confidence level ($p < 0.05$). A logistic regression model was performed to establish the variable's influence of non-compliance with the maximum concentration of NO₂. This influence was corroborated by a Bayesian neural network that allows identifying the situations in which the NO₂ concentration exceeded the WHO guidelines. With the purpose of knowing if the variables PHV and ADT may demonstrate whether there is a high degree of explanation for exceeding the NO₂ standard.

3. Results

Results showed an average of 19.92 and with a standard deviation of ± 11.50 µg/m³, with a maximum and minimum value of 70.27 and 0.57 µg/m³, respectively. Fig. 1 shows the results of NO₂ concentration over the study area during the sampling period. It can be seen the relatively low level of NO₂ concentration in the study area. In comparison with other studies made in Europe, results indicate an urban background environment and not near road street location values (Cyrus et al., 2012). In order to better understand the results, ADT was analyzed (Fig. 4), too, and compared with NO₂. NO₂ concentration/ADT results show 0.0008 up to 0.00771. Some hot spots clearly show a relation with high traffic areas, although others with industrial areas. One major source of high values of NO₂ is the usage of diesel and petrol generators for electricity during the electric power outage in industries or local commerce (ul-Haq et al., 2014). Thus, the highest values corresponded to industries because of the significant electrical blackouts in the study area. Although, NO₂ concentration/ADT were obtained in high traffic roads, intersections in the study area. Some points presented high values in 4-lanes vehicular intersections downwind locations after the roadways, too. Fig. 1 shows, too, high NO₂ values near the river caused by some local harbors.

Multi-regression statistical analysis was performed for the NO₂ concentration and peak hour volume (PHV). Analysis of variance (ANOVA) results may be observed in Table 1, where p -value < 0.05 for Eq. (1) with an adjusted R² of 78.44%. A logarithmic fitted model was obtained with

intervals showed in Fig. 5.

$$\text{NO}_2 \approx -12.8936 + 4.59836 \ln(\text{PHV}) \quad (1)$$

where,

NO₂: concentration of nitrogen dioxide in µg/m³. PHV:

peak hour volume in veh/h.

For further analysis, multi-regression statistical analysis was performed for the NO₂ concentration and ADT. ANOVA results showed significance (Table 2), where p -value was < 0.05 for Eq. (2) with an adjusted R² of 92.86%. An exponential fitted model was obtained with intervals showed in Fig. 6.

$$\text{NO}_2 \approx e^{(0.29953 \ln \text{ADT})} \quad (2)$$

where,

NO₂: concentration of nitrogen dioxide in µg/m³. ADT:

average daily traffic in veh/day.

Moreover, Goodness-of-Fit Tests for Residuals using the Kolmogorov-Smirnov normality test were done, where the p -value was higher than 0.05, showing normality in the results (Table 3). Residuals from models demonstrated significant spatial autocorrelation, as evidenced by a significant correlation of the residuals. These results indicate that for more traffic load, higher NO₂ values may be obtained.

Applied artificial neural networks classified by WHO guideline value of 40 µg/m³ (for annual exposure) may be observed in Fig. 7 and Table 4, where six (6) samples surpassed this standard. However, just two (2) results obtained exceeded the annual local legal limit (60 and 200 µg/m³; for annual exposure h and 1 h, respectively) (MINAMBIENTE, 2017). (Although the measurements were made for two weeks, and both the WHO guideline value and the local legal limits are based on different exposure periods, these were used as a reference taking into account that there are no officially established parameters for the measurement period used in this study. In addition, as mentioned by WHO, "it is clear that the effects of nitrogen dioxide are due more to concentration than to duration of exposure or to total dose (expressed as C × T)" (WHO, 2006a, 2006b), the comparison is acceptable. High ozone levels are typical in the coastal cities, including the study area. As stated above, Fig. 7b shows for certain values of traffic load (ADT)

Table 2
ANOVA of NO₂ and ADT.

Source	Sum of squares	Df	Mean square	F-ratio	P-value
Model	1018.759	1	1018.759	1664.15	0.0000
Residual	78.3589	128	0.6121789		
Total	1097.118	129			

Table 3
Kolmogorov-Smirnov test.

	Normal
DPLUS	0.08856723
DMINUS	0.09492463
DN	0.09492463
P-Value	0.1957059

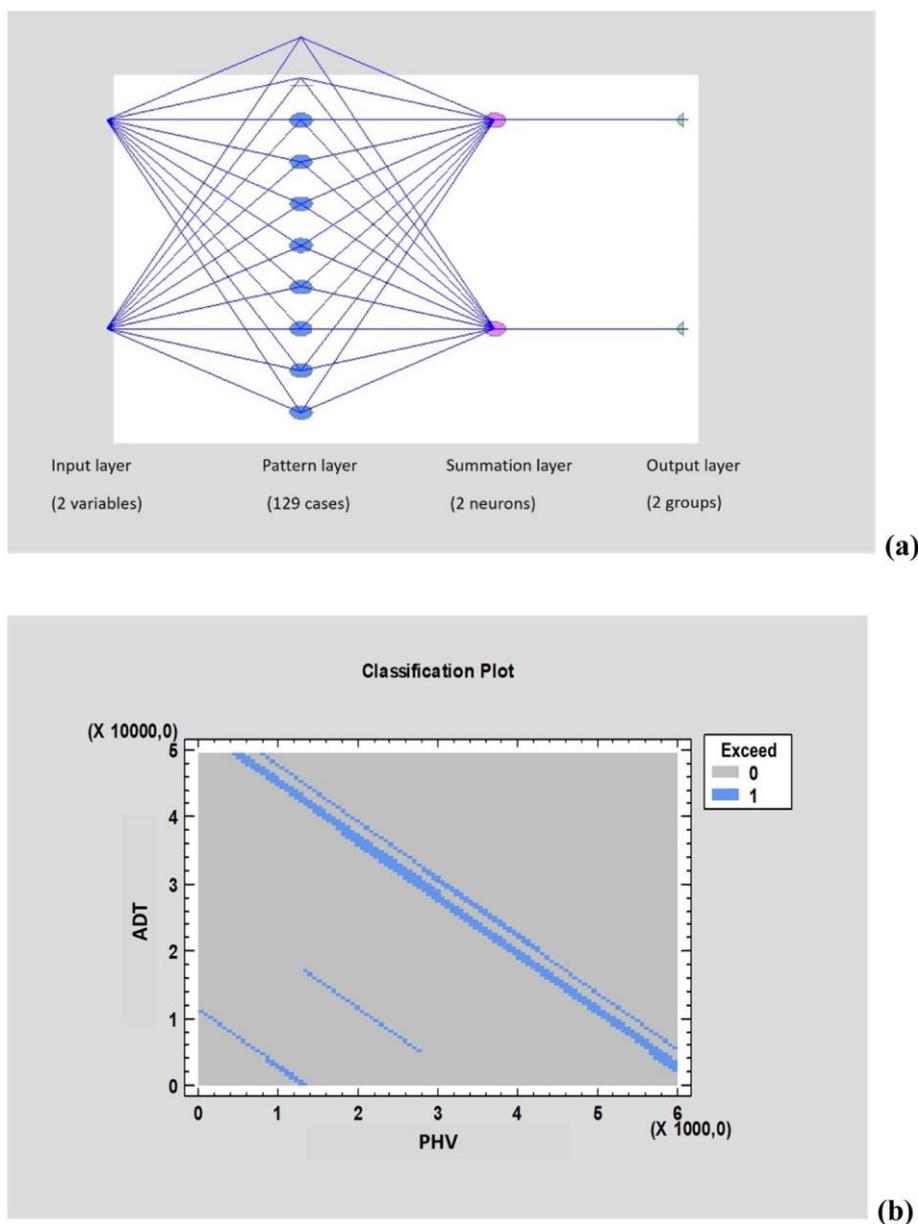


Fig. 7. a,b. Schematic representation of multilayer perceptron neural network used to classify NO_2 concentration by WHO standards (a) and estimated values for meeting standards (b).

and peak traffic per hour (PHV), NO_2 concentrations may be higher than WHO guidelines. For example, for 4816 of PHV and 12,984 of ADT, NO_2 concentrations exceeded than WHO limits are present ($\text{N}_{40} \mu\text{g}/\text{m}^3$). However, the comparison with the air quality standard for the annual average is limited because we sampled only one 2-week period. These are outstanding results because values were lower than WHO standards for almost all points, and lower than local legal limits for all the points evaluated, even though the study area has several stationary sources, harbors, and high traffic. The neural network (Fig. 7) was applied to evaluate if PHV and ADT variables may demonstrate an explanation

Table 4

Training set.		
Exceed	Members	Percent correctly Classified
0	123	97.56098
1	6	66.66667
Total	129	96.12403

for the exceeding WHO guidelines through the percentage of correctly classified cases as a result of the training of the network. A 96.12% of cases were correctly classified, which demonstrates the capacity of the PHV and ADT variables to explain the exceeding of the WHO guidelines. Probably, emitted NO and transformed to NO_2 , reacts rapidly with other air pollutants such as organic compounds or accumulated photo-chemical ozone formed in the coastline (Adame et al., 2010) caused by the high outgoing longwave radiation field during December–May in the Caribbean. Although, the correlation of NO_2 with other air pollutants is low (Fig. 8) and with wind velocity ($R^2 = 0.1276$). Other studies reported similar results, where NO_2 showed low correspondence with weather variables (i.e., wind velocity) and air pollutants, perhaps being more local/episodic than remote/seasonal (Jury, 2017).

In order to better understand the relationship between NO_2 and local sources, ratio values with 2018 hourly mean data of the air quality station were calculated (Fig. 1). NO_2 and O_3 can be observed together as OX ($\text{OX} = \text{NO}_2 + \text{O}_3$), i.e., the total amount of photochemical oxidants. Fig. 8 shows the variation of the daily mean $[\text{NO}_2]/[\text{NO}_x]$ (a), $[\text{NO}_2]/[\text{OX}]$ (b), and O_3 as a function of NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$). In some studies, analysis of

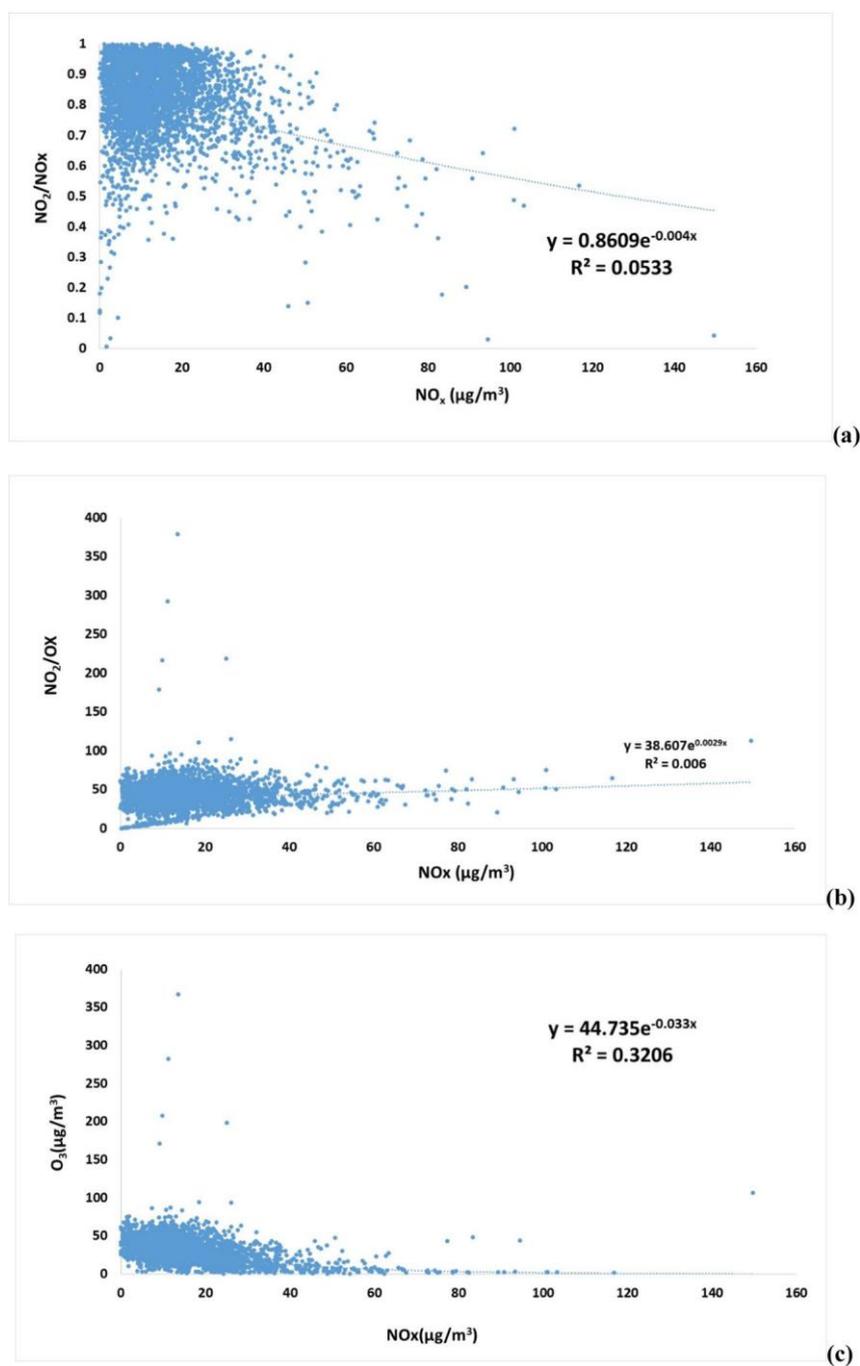


Fig. 8. a,b. Variation of daily mean [NO₂]/[NO_x] (a), [NO₂]/[OX] (b) and O₃ as a function of NO_x.

these ratios have been used to explore the ground-level O₃ concentration variations and the relationship between NO₂ data (Clapp and Jenkin, 2001), because a photostationary state relationship exists between these pollutants. The exponential relationship observed in Fig. 8 reveals that for lower values of the [NO₂]/[OX] ratio, there are low values of NO_x, implying that in these instants, OX concentrations are predominantly marked by high O₃ concentrations.

Moreover, for increasing the NO_x concentrations, a significant part of OX is in the form of NO₂. Mostly, all values of [NO₂]/[NO_x] were 1, explained by the oxidation process of NO to NO₂, with concentrations of NO_x being marked mainly by the concentration of NO₂. Also, the relationship of NO₂ with O₃ is low, thus implying that the latter is influenced by the atmospheric boundary layer, typical of coastal areas. Probably, formation and accumulation of ozone are favoured by the conditions

under a pure sea-land breeze: that is, perpendicular wind directions toward the coastline, active recirculation of air masses, and formation of residual ozone layers above the sea (Adame et al., 2010). However, further studies should be conducted to understand the precise relationship between NO₂ and O₃ and obtain fitted functions.

4. Conclusions

In this investigation, the aim was to do a spatial assessment of the NO₂ relationship with traffic load in a Caribbean coastal city. The findings of this research provide insights into the urban NO₂ distribution. This approach will prove useful in expanding our understanding of how the spatial variability of NO₂ in Caribbean cities. Hot spots of the

study area included stationary sources, harbors, and a high traffic load impacted intersection.

Overall, the multiregression analysis is a very effective method to enrich the understanding of NO₂ distributions. It can provide scientific evidence for the relationship between NO₂ and traffic, beneficial for developing the targeted policies and measures to reduce NO₂ pollution levels in hot spots. This research may subsidize knowledge to serve as a tool for environmental and health authorities.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

We thank Universidad del Norte for financial support. We acknowledge all grad and postgrad students for their help during sampling. Also, the local environmental agency of the mayor's office: the Barranquilla Air Quality Monitoring Network. EPA – Barranquilla Verde, Barranquilla, Colombia. We thank Dr. Julián Arellana for kindly providing the traffic data.

References

- Achakulwisut, P., Brauer, M., Hystad, P., Anenberg, S.C., 2019. Global, national, and urban burdens of paediatric asthma incidence attributable to ambient NO₂ pollution: estimates from global datasets. *Lancet Planet. Heal.* 3, e166–e178. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(19\)30046-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(19)30046-4).
- Adame, J.A., Serrano, E., Bolívar, J.P., de la Morena, B.A., 2010. On the tropospheric ozone variations in a coastal area of southwestern Europe under a mesoscale circulation. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 49, 748–759. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2097.1>.
- Barranquilla, 2018. Alcaldía de Barranquilla. [WWW Document]. URL http://www.barranquilla.gov.co/index.php?option=com_content&view=article&id=27&Itemid=118, Accessed date: 31 July 2018.
- Clapp, L.J., Jenkin, M.E., 2001. Analysis of the relationship between ambient levels of O₃, NO₂ and NO as a function of NO_x in the UK. *Atmos. Environ.* 35, 6391–6405. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00378-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00378-8).
- Cyrys, J., Eeftens, M., Heinrich, J., Ampe, C., Armengaud, A., Beelen, R., Bellander, T., Beregszaszi, T., Birk, M., Cesaroni, G., Cirach, M., de Hoogh, K., De Nazelle, A., de Vocht, F., Declercq, C., Dedele, A., Dimakopoulou, K., Eriksen, K., Galassi, C., Graulevičiene, R., Grivas, G., Gruzjeva, O., Gustafsson, A.H., Hoffmann, B., Iakovides, M., Ineichen, A., Krämer, U., Lanki, T., Lozano, P., Madsen, C., Meliefste, K., Modig, L., Mölter, A., Mosler, G., Nieuwenhuijsen, M., Nonnemacher, M., Oldenwening, M., Peters, A., Pontet, S., Probst-Hensch, N., Quass, U., Raaschou-Nielsen, O., Ranzi, A., Sugiri, D., Stephanou, E.G., Taimisto, P., Tsai, M.Y., Vaskövi, É., Villani, S., Wang, M., Brunekreef, B., Hoek, G., 2012. Variation of NO₂ and NO_x concentrations between and within 36 European study areas: results from the ESCAPE study. *Atmos. Environ.* 62, 374–390. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.080>.
- Defra Working Group, 2008. Diffusion Tubes for Ambient NO₂ Monitoring: Practical Guidance for Laboratories and Users., AEA Energy and Environment. EN 13528, 2002. Ambient Air Quality - Diffusive Samplers for the Determination of Concentrations of Gases and Vapours - Requirements and Test Methods. European Standards.
- Felix, E., Gidhagen, L., Alonso, M.F., Nahirny, E.P., Alves, B.L., Segersson, D., Amorim, J.H., 2019. Passive sampling as a feasible tool for mapping and model evaluation of the spatial distribution of nitrogen oxides in the city of Curitiba, Brazil. *Air Qual. Atmos. Heal.* 12, 837–846. <https://doi.org/10.1007/s11869-019-00701-z>.
- Geddes, J.A., Martin, R.V., Boys, B.L., van Donkelaar, A., 2016. Long-term trends worldwide in ambient NO₂ concentrations inferred from satellite observations. *Environ. Health Perspect.* 124, 281–289. <https://doi.org/10.1289/ehp.1409567>.
- Gradko, 2012a. Technical Data Sheet: Nitrogen Dioxide.
- Gradko, 2012b. Technical Data Sheet: Nitrogen Dioxide.
- Hassoun, Y., James, C., Bernstein, D.I., 2019. The effects of air pollution on the development of atopic disease. *Clin. Rev. Allergy Immunol.* 403–414 <https://doi.org/10.1007/s12016-019-08730-3>.
- IDEAM, . Atlas climatológico de Colombia, accessed in 2019. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>.
- Jenkin, M.E., Clemitshaw, K.C., 2000. Ozone and other secondary photochemical pollutants: chemical processes governing their formation in the planetary boundary layer. *Atmos. Environ.* 34, 2499–2527. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00478-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00478-1).
- Jury, M.R., 2017. Caribbean air chemistry and dispersion conditions. *Atmosphere (Basel)* 8. <https://doi.org/10.3390/atmos8080151>.
- Kimbrough, S., Chris Owen, R., Snyder, M., Richmond-Bryant, J., 2017. NO to NO₂ conversion rate analysis and implications for dispersion model chemistry methods using Las Vegas, Nevada near-road field measurements. *Atmos. Environ.* 165, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.06.027>.
- Lanzafame, R., Monforte, P., Scandura Pier, F., 2016. Comparative analyses of urban air quality monitoring systems: passive sampling and continuous monitoring stations. *Energy Procedia* 101, 321–328. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.041>.
- Masey, N., Gillespie, J., Heal, M.R., Hamilton, S., Beverland, I.J., 2017. Influence of wind-speed on short-duration NO₂ measurements using Palmes and Ogawa passive diffusion samplers. *Atmos. Environ.* 160, 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.04.008>.
- MINAMBIENTE, 2017. Resolución número 2254 del 01 de Noviembre de 2017: norma de calidad del aire en Colombia. Bogotá.
- Rani, B., Singh, U., Chuhan, A., Sharma, D., Maheshwari, R., 2011. Photochemical smog pollution and its mitigation measures. *J. Adv. Sci. Res.* 2, 28–33.
- Thomas, M.A., Devasthale, A., 2017. Typical meteorological conditions associated with extreme nitrogen dioxide (NO₂) pollution events over Scandinavia. *Atmos. Chem. Phys.* 17, 12071–12080. <https://doi.org/10.5194/acp-17-12071-2017>.
- ul-Haq, Z., Tariq, S., Ali, M., Mahmood, K., Batool, S.A., Rana, A.D., 2014. A study of tropospheric NO₂ variability over Pakistan using OMI data. *Atmos. Pollut. Res.* 5, 709–720. <https://doi.org/10.5094/APR.2014.080>.
- Vintar Mally, K., Ogrin, M., 2015. Spatial variations in nitrogen dioxide concentrations in urban Ljubljana, Slovenia. *Morav. Geogr. Reports* 23, 27–35. <https://doi.org/10.1515/mgr-2015-0015>.
- WHO, 2006a. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide. Global update 2005. Summary of risk assessment. <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>.
- WHO, 2006b. Air Quality Guidelines Global Update 2005. Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide. 92 890 2192 6 Copenhagen.
- Zhang, L., Lee, C.S., Zhang, R., Chen, L., 2017. Spatial and temporal evaluation of long term trend (2005–2014) of OMI retrieved NO₂ and SO₂ concentrations in Henan Province, China. *Atmos. Environ.* 154, 151–166. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.11.067>.

Conclusiones y recomendaciones

Capítulo 5

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

Para concluir, esta investigación permitió evaluar las concentraciones de Dióxido de Nitrógeno (NO₂) en la ciudad de Barranquilla, analizar el cumplimiento de la normatividad nacional y estándares internacionales de los niveles permisibles para este contaminante y evaluar cuales son aquellas enfermedades respiratorias frecuentes los barranquilleros que están asociadas al contaminante, siendo así se concluye que:

- La calidad del aire en la ciudad de Barranquilla con respecto al contaminante atmosférico Dióxido de Nitrógeno (NO₂) se concentra en áreas de la ciudad la cual donde se encuentra alta afluencia vehicular y las industrias.
- De los 114 puntos monitoreados en la ciudad de Barranquilla específicamente en las localidades Norte Centro Histórico y Riomar las concentraciones de los monitoreos registraron un valor superior de 70,27 µg/m³, y un valor inferior de 0,57 µg/m³, los cuales sobrepasan los umbrales permisibles establecidos por la OMS (40 µg/m³ de media anual), mientras que para la normatividad nacional (Resolución 2254 del 2017) cumplen con el umbral o límite permisible establecido.
- Los equipos pasivos utilizados en el presente trabajo (Tubos Palmes), resultaron ser eficiente, para determinar las concentraciones de Dióxido de Nitrógeno en diferentes puntos de manera simultánea.

- En cuanto a las enfermedades frecuentes de los barranquilleros, la información suministrada por parte de la entidad de salud, evidencia que la población más vulnerable a sufrir enfermedades respiratorias y que de cierto modo afectadas por la contaminación del aire son los comprendidos en la primera infancia (7 días de nacido a 5 años 11 meses, 29 días) y de sexo femenino.
- Evaluar el Dióxido de Nitrógeno solo o aislado es complicado debido a que siempre está en conjunto con otros contaminantes debido al estado en el que se emite, estudios asocian ciertas enfermedades respiratorias como el asma y EPOC (enfermedad pulmonar obstructiva crónica), con el Dióxido de Nitrógeno por lo fácil que es respirarlo. No obstante, para evaluar el impacto que tendría la concentración con respecto a estas enfermedades mencionadas, se utilizó el software BenMap-CE, el cual localizo las localidades Norte Centro Historico y Riomar de la ciudad de Barranquilla que se verán afectadas en por la concentración de este contaminante, y lo cual nos conduce a darle prioridad de implementación de estrategias para la mejora de la calidad del aire en él.
- Por otro lado, el desarrollo de estrategias que debe estar conjugado con aspectos que van desde lo técnico, económico, ambiental, social, político y administrativo para que el abordaje de su implementación se pueda llevar a cabo.
- Las políticas, programas, planes y proyectos que se han establecido en materia de mitigación de esta problemática, parten de los instrumentos de planificación en la ciudad y en sus localidades, es necesario la implementación para que el impacto y la eficiencia se pueda evidenciar.

Para que las estrategias se puedan implementar es necesario la realización de mesas de trabajo y coordinación con el programa de calidad de aire de la ciudad de Barranquilla, se están llevando a cabo lo relacionado con los controles de emisiones, así como su monitoreo, no obstante, es

importante que dentro de estas se empiecen a proponer e implementar aquellas que estén relacionadas con epidemiología ambiental para el caso de contaminantes persistentes en el aire y la relación con efectos adversos en la salud.

5.2. Recomendaciones

La implementación de estrategias, de nuevos equipos de monitoreo, políticas para la gestión de la calidad del aire es una prioridad para la calidad de vida y salud de un territorio y comunidad. Por ello un modelo de gestión para lograr la calidad del aire es necesario para la ciudad estudio Barranquilla, siendo así lo contemplado durante este trabajo se realiza las siguientes recomendaciones:

- Para futuros estudios donde se quiera evaluar al detalle todas las localidades, se recomienda la implementación de más puntos de muestreos, así mismos monitoreos más frecuentes contemplando las épocas que se presentan en la ciudad de Barranquilla.
- La aplicación de modelos estadísticos que hacen relación al análisis de forma cuantitativa requerirá de monitoreos mensuales para un periodo mínimo de 1 año para que la relación de la tasa de incidencia y tasa de concentración sea significativa.
- Fomentar investigaciones enfocadas a la epidemiología ambiental con el fin de crear una base de estudios para analizar a fondo las variaciones que presenta la ciudad.
- Generar conceptos de salud ambiental urbana en la ciudad de Barranquilla, así como proyectos con una visión colectiva y a largo plazo, incluyente de todos los grupos sociales, que priorice la salud y la calidad de vida, así como la construcción de espacios saludables y de valores que tengan como objetivo el bien común.
- Generar programas intersectoriales para el monitoreo y vigilancia de la contaminación atmosférica y la salud (morbilidad, mortalidad, ausentismo escolar y laboral, costos

económicos, daños a los ecosistemas) en grupos vulnerables y zonas críticas, entre investigadores, universidades, instituciones de salud, medio ambiente y sector productivo.

- Educar a la población en valores de cooperación social, prevención de riesgos y catástrofes, equidad y solidaridad con los grupos de la población más vulnerables y los que más sufren la contaminación atmosférica.
- Formular e implementar de estrategias para la mitigación del deterioro de la calidad del aire a nivel de cada localidad y distrital, con el fin que en un futuro estas puedan ser expuestas para una reestructuración mucho más rigurosa a nivel nacional de parámetros normativos, debido a que el país no está alineado con los estándares internacionales establecidos por la Organización Mundial de la Salud, los cuales son indicados para la garantía de un ambiente sano y apto para la salud humana.

Bibliografía

- Agudelo-Castañeda, D., De Paoli, F., Morgado-Gamero, W. B., Mendoza, M., Parody, A., Maturana, A. Y., & Teixeira, E. C. (2020). Assessment of the NO₂ distribution and relationship with traffic load in the Caribbean coastal city. *Science of the Total Environment*, 720, 137675. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137675>
- Aguilar, D., & Correa, M. A. (2020). *Evaluación del impacto de la contaminación atmosférica por PM_{2.5} sobre la mortalidad de la población en el valle de Aburrá*. 54.
- Alatorre, A. G., & Llanos, M. del C. (2014). Contaminación Atmosférica en Tepic, Nayarit, México Air Pollution in Tepic, Nayarit, Mexico. *Revista EDUCATECONCIENCIA*, Volumen 4(4), 34–47.
- Alves, L. B., & Sócio-espacial, E. D. E. M. (2013). *EVALUACIÓN DE CONCENTRACION DE DIOXIDO DE NITROGENO EN SALTA CAPITAL UN ANÁLISIS ESTADÍSTICO ESTRUCTURAL*. 4(1994), 1689–1699.
- Amoatey, P., Omidvarborna, H., Baawain, M. S., & Al-Mamun, A. (2019). Emissions and exposure assessments of SO_X, NO_X, PM_{10/2.5} and trace metals from oil industries: A review study (2000–2018). *Process Safety and Environmental Protection*, 123, 215–228. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.014>
- Ayres, Robert Maynard, R. R. (2006). *Air pollution and health* (N. J. D. por W. S. Londres: Imperial College Press; Hackensack, Ed.).

- Barranquilla, A. D. de. (2021). Barranquilla Información General. Recuperado de <https://www.barranquilla.gov.co/descubre/conoce-a-barranquilla/territorio>
- Carslaw, D. C., Murrells, T. P., Andersson, J., & Keenan, M. (2016). Have vehicle emissions of primary NO₂ peaked? *Faraday Discussions*, *189*, 439–454. <https://doi.org/10.1039/c5fd00162e>
- Celis, J. E., Morales, J. R., Zaror, C. A., & Carvacho, O. F. (2007). Contaminación del aire atmosférico por material particulado en una ciudad intermedia: El caso de Chillán (Chile). *Informacion Tecnologica*, *18*(3), 49–58. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642007000300007>
- Comisión Nacional del Medio Ambiente, C. (2009). *Antecedentes para la revisión de las normas primarias de calidad de aire para dióxido de azufre (SO₂), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂)*. Recuperado de https://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2015/proyectos/Informe_final_NPCA_-_KAMBIENTAL_rev_05.pdf
- CONPES, C. N. de P. E. y S.-R. de C. (2018). Consejo Nacional de Política Económica y Social - República de Colombia [CONPES], 2018. *Consejo Nacional de Política Económica y Social - República de Colombia*, pp. 61–62.
- Costa, S., Ferreira, J., Silveira, C., Costa, C., Lopes, D., Relvas, H., ... Paulo Teixeira, J. (2014). Integrating health on air quality assessment - Review report on health risks of two major european outdoor air pollutants: PM and NO₂. *Journal of Toxicology and Environmental Health - Part B: Critical Reviews*, *17*(6), 307–340. <https://doi.org/10.1080/10937404.2014.946164>
- DANE. (2018). *Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018 Barranquilla*,

Atlántico. 36. Recuperado de <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/presentaciones-territorio/191003-CNPV-presentacion-Huila.pdf>

Daniels Cardozo, F., Martínez López, E., Arbeláez Montoya, M. P., & Saldarriaga, J. F. (2007).

Sistema de Vigilancia Epidemiológica sobre la Calidad del Aire en el Valle del Aburrá.

Recuperado de

http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/lsdocSaludPublica/vigilancia_epidemiologica.pdf

de Hoogh, K., Gulliver, J., Donkelaar, A. van, Martin, R. V., Marshall, J. D., Bechle, M. J., ...

Hoek, G. (2016). Development of West-European PM_{2.5} and NO₂ land use regression models incorporating satellite-derived and chemical transport modelling data.

Environmental Research, 151(2), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.07.005>

de Jesús Torres Noreña, H., Montoya Izquierdo, P. M., & Guillermo Castaño González, J. (2009).

Determinación de NO₂ atmosférico mediante captadores pasivos y cromatografía de intercambio iónico Measurement of atmospheric NO₂ by passive samplers and ion interchange chromatography. *Ingeniería y desarrollo. Universidad del Norte.*, 25, 25–47.

Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/n25/n25a02.pdf>

De Pablo, F., López, A., Rivas Soriano, L., Tomás, C., Diego, L., González, M., & Barrueco, M.

(2006). Relationships of daily mortality and hospital admissions to air pollution in Castilla-León, Spain. *Atmosfera*, 19(1), 23–39.

Defra Working Group. (2008). *Tubos de difusión para monitoreo ambiental de NO₂: Guía práctica para Laboratorios y Usuarios*. AEA Energía y Medio Ambiente.

Duan, Y., Liao, Y., Li, H., Yan, S., Zhao, Z., Yu, S., ... Jiang, H. (2019). Effect of changes in season and temperature on cardiovascular mortality associated with nitrogen dioxide air

pollution in Shenzhen, China. *Science of the Total Environment*, 697, 134051.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134051>

EMEP. (2016). *Air pollution trends in the EMEP region between 1990 and 2012*.

En 13528. (s/f). Calidad del aire ambiental: muestreadores difusivos para la determinación de concentraciones de gases y vapores - Requisitos y métodos de prueba Estándares europeos. 2008.

EPA-United States Environmental Protection Agency. (2019). Environmental Benefits Mapping and Analysis Program - Community Edition (BenMAP-CE). Recuperado de <https://www.epa.gov/benmap>

Galvis, Boris, & Rojas, N. Y. (2006). Relación entre PM 2.5 y PM 10 en la ciudad de Bogotá. *Scielo*, 3(2), 336-353. Recuperado de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892006000100013&lng=es&tlng=es.

García-Reynoso, J. A., Grutter, M., & Cintora-Juárez, D. (2007). Evaluación del riesgo por contaminantes criterio y formaldehído en la Ciudad de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 23(4), 169–175.

García Bátiz, M. L. (2006). *Conceptos y visiones teóricas sobre la gestión ambiental. Documento de trabajo, módulo de Gestión Ambiental, Primer Diplomado de Salud Ambiental: Contaminación del Aire, Maestría en Ciencias de la Salud Ambiental*.

Gobierno de Colombia, D. (2018). *Plan Nacional De Desarrollo 2018-2022, Pacto Por Colombia, Pacto por la Equidad* (p. 1457). p. 1457. Recuperado de <https://id.presidencia.gov.co/especiales/190523->

PlanNacionalDesarrollo/documentos/BasesPND2018-2022.pdf

- Gutiérrez Oyarce, A., Ferrero, A., Estarlich, M., Esplugues, A., Iñiguez, C., & Ballester, F. (2018). Exposición ambiental a dióxido de nitrógeno y salud respiratoria a los 2 años en la Cohorte INMA-Valencia. *Gaceta Sanitaria*, 32(6), 507–512. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2017.05.012>
- Hadidi, L. A., AlDosary, A. S., Al-Matar, A. K., & Mudallah, O. A. (2016). An optimization model to improve gas emission mitigation in oil refineries. *Journal of Cleaner Production*, 118, 29–36. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.01.033>
- Hassoun, Y., James, C., & Bernstein, D. I. (2019). The Effects of Air Pollution on the Development of Atopic Disease. *Clinical Reviews in Allergy and Immunology*, 57(3), 403–414. <https://doi.org/10.1007/s12016-019-08730-3>
- IDEAM. (2010). *Principio De Medición Y Procedimiento De Calibración Para La Medición Del Dióxido De Nitrógeno (No2) En La Atmósfera (Quimioluminiscencia En Fase Gaseosa)*. (2), 1–23.
- IDEAM. (2019). Atlas climatológico de Colombia,. Recuperado de <http://atlas.ideam.gov.co/%0AvisorAtlasClimatologico.html>
- IHME. (2019). Institute for Health Metrics and Evaluation. Recuperado de <https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/>
- Jf Argacha, P.Collart, A.Wauters, Y. Coppiertes, P. Sinnaeve, M. C. (2016). *Air pollution and ST segment elevation myocardial infarction: a crossover case study from the Belgian STEMI registry 2009–2013*. Recuperado de [https://www.internationaljournalofcardiology.com/article/S0167-5273\(16\)31583-2/fulltext](https://www.internationaljournalofcardiology.com/article/S0167-5273(16)31583-2/fulltext)

Jinhong Xian, Dongsong Sun, Wenjing Xu, Yuli Han, Jun Zheng, Jiancao Peng, S. Y. (2020).

Urban air pollution Xian Jinhong.pdf. *Elsevier*, 258(113696). Recuperado de

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749119350420?via%3Dihub>

Jorquera, H. G. (2018). *Introducción a la Contaminación Atmosférica* (Ediciones; E. UC, Ed.).

Chile: Alfaomega.

Korc, Marcelo E.; Maisonet, M. (2002). Directrices para la elaboración de planes de acción

locales para mejorar la calidad del aire. *Ops/Cepis/Pub/02.75*, 46. Recuperado de

https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_docman&view=download&category_slug=mandates-strategies-9832&alias=44638-directrices-elaboracion-planes-accion-locales-mejorar-calidad-aire-spanish-only-638&Itemid=270&lang=es

Mackenzie-L-Davis-Y-Susan-J-Master. (2005). *Ingeniería Y-Ciencias-Ambientales*. México DF:

Mc-Graw-Hill.

Madrid Salud. (2016, junio). Dióxido de nitrógeno y Salud. *Salud Publica del ayuntamiento de*

Madrid. Recuperado de <https://madridsalud.es/dioxido-de-nitrogeno-y-salud/>

Mannshardt, E., & Naess, L. (2018). Air quality in the USA. *Significance*, 15(5), 24–27.

<https://doi.org/10.1111/j.1740-9713.2018.01190.x>

Mecánica, F. DE, Por, P., & Diego Cruz Freire Darwin Vinicio Chimbo Chimbo, J. (2015).

ESTUDIO DE SO₂ y NO₂ EMPLEANDO MUESTREO PASIVO EN LA ZONA

INDUSTRIAL DE VÍA A LA COSTA - GUAYAQUIL.

Mendoza Hernandez, M. A. M. (2021). *EVALUACIÓN DE LA AFECTACIÓN AMBIENTAL Y*

ENFERMEDADES RESPIRATORIAS ASOCIADAS AL CONTAMINANTE ATMOSFÉRICO

NO₂ MEDIANTE LA APLICACIÓN DE PROGRAMAS Y TECNOLOGÍAS EN

BARRANQUILLA - ESTUDIO DE CASO.

Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2010). Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire de 2010. *Ministerio de Ambiente, vivienda y desarrollo territorial*, p. 50. Recuperado de https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/contaminacion_atmosferica/Politica_de_Prevencion_y_Control_de_la_Contaminacion_del_Aire.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Decreto 1076 del 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.*

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Resolución 2254 de 2017 - Niveles Calidad del Aire.* (p. 11). p. 11.

MinSalud. (2018). Metodología para la caracterización de zonas con exposición a posibles fuentes de contaminación del aire. *Subdirección de Salud Ambiental*, 2–23. Recuperado de http://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/WHA68-REC1/A68_2015_REC1-

Molina Esquivel, Enrique, & Meneses Ruiz, E. (2003). Evaluación epidemiológica del impacto de los contaminantes del aire. Propuesta metodológica. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 41, 2–3. Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30032003000200002

Noriega Elío, Mariano, Franco Enríquez, Jesús Gabriel, Montoya Ruiz, Aishshah, Garduño Andrade, María de los Ángeles, León Cruz, Laura Elena, Martínez Alcántara, Susana, & Cruz Flores, A. C. (2009). Deterioro de las condiciones de trabajo y de salud en México. *Scielo*. Recuperado de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-

01382009000100006&lng=es&tlng=es.

OMS. (2018). Organización Mundial de la Salud. Recuperado de Calidad del aire y salud website: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2005). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre Actualización*, 5(1), 1–21. Recuperado de https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf%0Ajsessionid=970454FA25DFB60943EBC3409FF7E87B?sequence=1

OYARZÚN G, M. (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la salud. *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, 26(1), 16–25. <https://doi.org/10.4067/s0717-73482010000100004>

Paoletti, E., De Marco, A., Beddows, D. C. S., Harrison, R. M., & Manning, W. J. (2014). Ozone levels in European and USA cities are increasing more than at rural sites, while peak values are decreasing. *Environmental Pollution*, 192, 295–299. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.04.040>

Querol, X., Alastuey, A., Pandolfi, M., Reche, C., Pérez, N., Minguillón, M. C., ... Reina, F. (2014). 2001-2012 trends on air quality in Spain. *Science of the Total Environment*, 490, 957–969. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.074>

Querol, X., Alastuey, A., Reche, C., Orío, A., Pallares, M., Reina, F., ... Millán, M. (2016). On the origin of the highest ozone episodes in Spain. *Science of the Total Environment*, 572,

379–389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.193>

Querol, Xavier. (2008). Calidad del aire, partículas en suspensión y metales. Air quality, particles and metals. *Rev. Esp. Salud Pública*, 82(5), 447–454. Recuperado de http://www.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272008000500001&lng=es&nrm=iso&tlng=es%5Cnhttp://scielo.isciii.es/scielo.php?pid=S1135-57272008000500001&script=sci_arttext&tlng=pt

Sbarato, Dario, S. V. (2015). *Contaminación del aire* (E. Las Brujas, Ed.). Recuperado de <http://ezproxy.uninorte.edu.co:2507/a/41889>

Sicard, P., De Marco, A., Troussier, F., Renou, C., Vas, N., & Paoletti, E. (2013). Decrease in surface ozone concentrations at Mediterranean remote sites and increase in the cities. *Atmospheric Environment*, 79, 705–715. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.042>

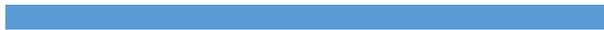
Thomas, M. A., & Devasthale, A. (2017). Typical meteorological conditions associated with extreme nitrogen dioxide (NO₂) pollution events over Scandinavia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(19), 12071–12080. <https://doi.org/10.5194/acp-17-12071-2017>

Torre-lópez, D. (2011). Cuantificación De Dióxido De Nitrógeno Con Captadores Pasivos Tipo Radiello. *Revista Cubana de Química*, XXIII(2), 66–71.

Vargas, S., Onatra, W., Osorno, L., Páez, E., & Sáenz, O. (2008). Contaminación Atmosférica Y Efectos Respiratorios En Niños, En Mujeres Embarazadas Y En Adultos Mayores Tt - Pollution and Respiratory Effects on Children, Pregnant Women and Old Aged People. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 11(1), 31–45. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262008000100006&lang=en%0Ahttp://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v11n1/v11n1a06.pdf

- Verde, E. B. (2021). *Reporte Mensual de la Calidad de Aire, en la Ciudad de Barranquilla* (p. 46). p. 46. Recuperado de https://barranquillaverde.gov.co/storage/app/media/calidad-aire/0221_reporte_ica.pdf
- Vitolo, C., Scutari, M., Ghalaieny, M., Tucker, A., & Russell, A. (2018). Modeling Air Pollution, Climate, and Health Data Using Bayesian Networks: A Case Study of the English Regions. *Earth and Space Science*, 5(4), 76–88. <https://doi.org/10.1002/2017EA000326>
- Weichenthal, S., Crouse, D. L., Pinault, L., Godri-Pollitt, K., Lavigne, E., Evans, G., ... & Burnett, R. T. (2016). Oxidative burden of fine particulate air pollution and risk of cause-specific mortality in the Canadian Census Health and Environment Cohort (CanCHEC). *Environmental Pollution*, 146, 92–99. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935115301742>
- WHO, Health Organization, W., & Office for Europe, R. (2013). *Review of evidence on health aspects of air pollution-REVIHAAP Project Technical Report*.
- Yang, J., Ji, Z., Kang, S., Zhang, Q., Chen, X., & Lee, S.-Y. (2019a). Spatiotemporal variations of air pollutants in western China and their relationship to meteorological factors and emission sources. *Environmental Pollution*, 254, 112952. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2019.07.120>
- Yang, J., Ji, Z., Kang, S., Zhang, Q., Chen, X., & Lee, S. Y. (2019b). Spatiotemporal variations of air pollutants in western China and their relationship to meteorological factors and emission sources. *Environmental Pollution*, 254, 112952. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.120>

ANEXOS



ANEXO 1. Tabla de coordenadas y registro de salida de campo.

Código	Coordenadas		Fecha/Hora Inicio	De	Fecha /Hora Fin
1330441	11,0101611	-748150431	8:45 a. m.		10:00 a. m.
1330442	11,0080771	-74,8172362	8:54 a. m.		10:04 a. m.
1330443	11,0066917	-748190074	9:01 a. m.		10:08 a. m.
1330444	11,0036728	-7482005078	9:08 a. m.		10:12 a. m.
1330445	11,0021552	-748208012	9:14 a. m.		10:15 a. m.
1330446	11,0011481	-748189934	9:20 a. m.		10:19 a. m.
1330447	11,0030336	-748183238	9:26 a. m.		10:25 a. m.
1330448	11,0073647	-748162321	9:39 a. m.		10:34 a. m.
1330449	11,0053371	-74,8172556	9:34 a. m.		10:27 a. m.
1330450	11,0093341	-74,8130784	9:46 a. m.		10:40 a. m.
1330451	11,0125883	-74,8185887	9:54 a. m.		10:47 a. m.
1330452	11,0109757	-74,8200904	9:59 a. m.		10:46 a. m.
1330453	11,0080483	-74,8224061	10:04 a. m.		10:50 a. m.
1330454	11,0054348	-74,8236557	10:09 a. m.		10:57 a. m.
1330455	11,0037921	-748244547	10:12 a. m.		10:53 a. m.
1330456	11,0052097	-74,8265052	10:21 a. m.		11:02 a. m.
1330457	11,0070168	-74,8261508	10:28 a. m.		11:04 a. m.
1330458	11,0101176	-74,825045	10:34 a. m.		11:07 a. m.
1330459	11,0105126	-74,8245492	10:38 a. m.		11:11 a. m.
1330460	11,0128973	-74,8232363	10:47 a. m.		11:14 a. m.
1330461	11,01746	-74,81397	8:56 a. m.		10:02 a. m.
1330462	11,01886	-74,81269	9:07 a. m.		10:05 a. m.
1330463	11,01919	-74,81222	9:15 a. m.		10:08 a. m.
1330464	11,0179	-74,81032	9:23 a. m.		10:12 a. m.
1330465	11,01714	-74,81103	9:30 a. m.		10:14 a. m.
1330466	11,01514	-74,81106	9:40 a. m.		10:17 a. m.
1330467	11,01257	-74,81022	10:12 a. m.		10:21 a. m.
1330468	11,01272	-74,812928	10:16 a. m.		10:24 a. m.
1330469	11,01161	-74,81149	10:30 a. m.		10:28 a. m.
1330470	11,012	-74,8108	10:33 a. m.		10:31 a. m.
1330471	11,01324	-74,81013	10:37 a. m.		10:34 a. m.
1330472	11,01638	-74,80846	10:49 a. m.		10:38 a. m.
1330473	11,01749	-74,80812	10:57 a. m.		10:40 a. m.
1330474	11,01659	-74,80534	11:06 a. m.		10:46 a. m.
1330475	11,01302	-74,80638	11:16 a. m.		10:49 a. m.
1330476	11,0135	-74,80727	11:28 a. m.		10:53 a. m.
1330477	11,01134	-74,80909	11:37 a. m.		10:58 a. m.
1330478	11,01177	-74,80907	11:52 a. m.		11:10 a. m.
1330479	11,00986	-74,80507	12:03 p. m.		11:16 a. m.

1330480	11,01281	-74,80447	12:10 p. m.	11:20 a. m.
1330481	11,127	-74,44325	9:01 a. m.	
1330482	11,161	-74,49374	9:18 a. m.	9:46 a. m.
1330483	11,112	-74,49347	9:28 a. m.	9:50 a. m.
1330484	11,1166	-74,49304	9:38 a. m.	9:55 a. m.
1330485	11,1128	-74,4923	9:44 a. m.	9:58 a. m.
1330486	11,112	-74,4919	9:50 a. m.	10:00 a. m.
1330487	11,1224	-74,49112	9:58 a. m.	10:05 a. m.
1330488	11,215	-74,4929	10:15 a. m.	10:09 a. m.
1330489	11,1281	-74,48566	10:27 a. m.	10:13 a. m.
1330490	11,1248	-74,48566	10:36 a. m.	10:15 a. m.
1330491	11,118	-74,48538	10:46 a. m.	10:19 a. m.
1330492	11,108	-74,4927	10:57 a. m.	10:20 a. m.
1330493	11,153	-74,495	11:08 a. m.	10:24 a. m.
1330494	11,0554	-74,4856	11:14 a. m.	10:29 a. m.
1330495	11,0543	-74,4935	11:17 a. m.	10:30 a. m.
1330496	11,122	-74,4951	11:33 a. m.	10:35 a. m.
1330497	11,056	-74,4991	11:43 a. m.	10:40 a. m.
1330498	11,174	-74,491444	12:06 a. m.	10:50 a. m.
1330499	11,193	-74,49226	12:12 a. m.	10:53 a. m.
1330500	11,112	-74,4928	12:22 a. m.	
1330501	11,0128	-74,4848	8:52 a. m.	9:10 a. m.
1330502	11,0119	-74,4841	9:05 a. m.	9:15 a. m.
1330503	11,0121	-74,8073	9:19 a. m.	9:18 a. m.
1330504	11,02179	-74,80744	9:27 a. m.	9:25 a. m.
1330505	11,02392	-74,80659	9:36 a. m.	9:45 a. m.
1330506	11,02634	-74,80396	9:43 a. m.	9:50 a. m.
1330507	11,02437	-74,80229	9:49 a. m.	10:05 a. m.
1330508	11,02331	-74,8016	9:58 a. m.	10:15 a. m.
1330509	11,0213	-74,80243	10:03 a. m.	10:20 a. m.
1330510	11,0205	-74,8033	10:08 a. m.	10:25 a. m.
1330511	11,02311	-74,7480279	10:14 a. m.	10:32 a. m.
1330512	11,0206	-74,80955	10:21 a. m.	10:39 a. m.
1330513	11,02106	-74,80469	10:32 a. m.	10:55 a. m.
1330514	11,021061	-74,80515	10:45 a. m.	11:00 a. m.
1330515	11,01666	-74,8039	10:51 a. m.	11:05 a. m.
1330516	11,01541	-74,80391	10:57 a. m.	11:10 a. m.
1330517	11,01543	-74,79901	11:00 a. m.	11:13 a. m.
1330518	11,0203	-74,79901	11:04 p. m.	11:17 a. m.
1330519	11,02993	-74,80469	11:12 a. m.	11:25 a. m.
1330520	11,03375	-74,811798	11:25 a. m.	11:33 a. m.
1330521	11,030272	-74,832846	11:57 a. m.	12:15 a. m.
1330522	11,015327	-74,83754	9:27 a. m.	11:29 a. m.

1330523	11,0103574	-74,5005328	9:43 a. m.	10:13 a. m.
1330524	11,0108942	-74,501263	9:55 a. m.	10:17 a. m.
1330525	11,0029278	-74,5002262	10:24 a. m.	
1330526	11,034007	-74,812163	10:52 a. m.	11:05 a. m.
1330527	11,035903	-74,815212	11:02 a. m.	11:50 a. m.
1330528	11,037776	-74,818234	11:09 a. m.	11:58 a. m.
1330529	11,038761	-74,822051	11:14 a. m.	10:50 a. m.
1330530	11,039068	-74,823646	11:21 a. m.	11:00 a. m.
1330531	11,026732	-74,834362	12:03 p. m.	
1330532	11,011446	-74,840141	12:35 p. m.	
1330533	11,0341013	-74,830298	11:49 a. m.	12:11 p. m.
1330534	11,036607	-74,827841	11:43 a. m.	12:09 p. m.
1330535	11,03893	-74,82701	11:34 a. m.	11:40 a. m.
1330536	11,012154	-74,837282	9:03 a. m.	10:39 a. m.
1330537	11,012154	-74,839055	9:12 a. m.	10:46 a. m.
1330538	11,020162	-74,836252	9:42 a. m.	10:21 a. m.
1330539	11,010806	-74,8343	9:53 a. m.	10:25 a. m.
1330540	11,010806	-74,838826	10:27 a. m.	11:24 a. m.
1330541	11,020373	-74,836192	12:50 a. m.	10:30 a. m.
1330542	11,0042	-74,4939	9:27 a. m.	9:42 a. m.
1330543	11,0051	-74,4917	10:16 a. m.	9:11 a. m.
1330544	11,0102	-74,4939	10:57 a. m.	
1330545	11,0059	-74,496	11:03 a. m.	
1330546	11,0029	-74,4943	11:48 a. m.	
1330548	11,0053	-74,4916	10:20 a. m.	9:16 a. m.
1330549	11,0039	-74,4943	9:40 a. m.	
1330550	11,0047	-74,4936	9:15 a. m.	9:38 a. m.
1330551	11,0051	-74,4939	8:53 a. m.	
1330555	11,0056	-74,493		9:08 a. m.
1330556	11,01	-74,4951	11:08 a. m.	
1330557	11,0053	-74,4949	11:13 a. m.	
1330558	11,0043	-74,4955	11:19 a. m.	
1330559	11,084	-74,4958	11:26 a. m.	
1330560	11,0021	-74,4946	11:34 a. m.	

ANEXO 2. Tabla de cumplimiento e identificación de puntos de muestreos.

Identificación	Resolución 2254 del 2017		OMS		Lugar Ubicación en el mapa
	$\mu\text{g}/\text{m}^3$		$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de media anual	$200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de media en 1h	
1330441	27,46	Cumple	Cumple	Cumple	AM069
1330442	29,95	Cumple	Cumple	Cumple	AM068
1330443	30,73	Cumple	Cumple	Cumple	AM067
1330444	36,94	Cumple	Cumple	Cumple	AM120
1330445	20,54	Cumple	Cumple	Cumple	AM066
1330446	40,05	Cumple	Cumple	No Cumple	AM118
1330448	33,45	Cumple	Cumple	Cumple	AM116
1330449	40,88	Cumple	Cumple	No Cumple	AM117
1330450	23,56	Cumple	Cumple	Cumple	AM115
1330451	17,64	Cumple	Cumple	Cumple	AM037
1330452	26,27	Cumple	Cumple	Cumple	AM038
1330453	24,76	Cumple	Cumple	Cumple	AM035
1330454	37,09	Cumple	Cumple	Cumple	AM055
1330455	22,68	Cumple	Cumple	Cumple	AM032
1330456	26,89	Cumple	Cumple	Cumple	AM031
1330457	36,22	Cumple	Cumple	Cumple	AM052
1330458	20,85	Cumple	Cumple	Cumple	AM034
1330459	19,91	Cumple	Cumple	Cumple	AM065
1330460	19,92	Cumple	Cumple	Cumple	AM063
1330461	14,86	Cumple	Cumple	Cumple	RM082
1330462	18,54	Cumple	Cumple	Cumple	RM083
1330463	12,42	Cumple	Cumple	Cumple	RM084
1330464	19,61	Cumple	Cumple	Cumple	RM095
1330465	17,94	Cumple	Cumple	Cumple	RM094
1330466	24,69	Cumple	Cumple	Cumple	AM072
1330467	17,89	Cumple	Cumple	Cumple	AM071
1330468	29,10	Cumple	Cumple	Cumple	AM070
1330469	29,16	Cumple	Cumple	Cumple	AM114
1330470	20,35	Cumple	Cumple	Cumple	AM113
1330471	16,10	Cumple	Cumple	Cumple	RM098
1330472	14,42	Cumple	Cumple	Cumple	RM079
1330473	13,73	Cumple	Cumple	Cumple	RM099
1330474	20,21	Cumple	Cumple	Cumple	FL002

1330475	25,91	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL003
1330476	13,09	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL001
1330477	13,09	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM111
1330478	17,11	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM112
1330479	32,59	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM110
1330480	15,07	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM109
1330481	17,71	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM051
1330482	8,75	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL050
1330483	7,36	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM059
1330484	<1,15	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM062
1330485	19,27	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM061
1330486	14,33	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM060
1330487	8,31	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM085
1330488	11,67	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM080
1330489	11,97	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL018
1330490	19,84	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM100
1330491	15,42	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM096
1330492	19,61	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM076
1330493	14,57	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM081
1330494	20,44	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM078
1330495	17,98	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM077
1330496	16,47	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM075
1330497	22,51	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM074
1330498	12,74	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM058
1330499	10,40	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM043
1330500	14,91	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM056
1330501	8,55	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL016
1330502	16,13	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM086
1330503	14,29	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM088
1330504	24,65	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM097
1330505	11,67	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM090
1330507	17,14	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM092
1330508	15,55	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM101
1330509	36,54	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM091
1330510	43,17	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	RM089
1330513	10,10	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM103
1330514	31,79	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM104
1330515	15,47	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM108
1330516	13,05	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM105
1330517	14,16	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM107
1330518	29,92	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM106
1330519	33,35	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	RM093
1330520	25,79	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL005

1330521	62,45	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	FL008
1330522	27,11	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM041
1330523	24,98	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM042
1330524	26,51	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM054
1330525	35,80	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM027
1330526	29,51	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL006
1330527	<1,14	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL012
1330528	<1,14	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL013
1330529	8,32	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL014
1330530	29,88	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL015
1330532	34,25	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM028
1330533	70,27	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	FL009
1330534	38,32	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL007
1330535	27,22	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL004
1330536	22,17	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM024
1330537	12,15	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL019
1330538	<1,14	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL011
1330539	19,01	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL045
1330540	17,40	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL010
1330541	23,80	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM040
1330542	22,99	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM053
1330543	16,18	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM064
1330544	13,32	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL049
1330545	15,34	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM022
1330546	17,31	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM030
1330548	23,09	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM073
1330549	55,57	Cumple	Cumple	No Cumple	Cumple	AM029
1330550	30,19	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM036
1330551	27,46	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM023
1330552	22,58	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM039
1330553	16,72	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM047
1330554	26,46	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM025
1330555	28,27	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM044
1330556	10,53	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	FL020
1330557	<1,15	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM021
1330558	31,59	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM033
1330559	<1,15	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM026
1330560	38,72	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	AM043