

EVALUACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LAS CONCENTRACIONES DE OZONO EN
BARRANQUILLA Y ÁREA METROPOLITANA

KATHERIN JOAN DÁVILA NAVAD
SAÚL ERNESTO RUEDAS MENDOZA



UNIVERSIDAD DE LA COSTA
INGENIERÍA AMBIENTAL
BARRANQUILLA
2019

EVALUACIÓN ESPACIO TEMPORAL DE LAS CONCENTRACIONES DE OZONO EN
BARRANQUILLA Y ÁREA METROPOLITANA

KATHERIN JOAN DÁVILA NAVAD
SAÚL ERNESTO RUEDAS MENDOZA

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Ambiental

Directora:
ANA LUCÍA DUARTE
Ingeniera Ambiental

Co-Director:
ISMAEL LUÍS SCHNEIDER
PhD en Sensoriamento Remoto

UNIVERSIDAD DE LA COSTA
DEPARTAMENTO DE CIVIL Y AMBIENTAL
INGENIERÍA AMBIENTAL
BARRANQUILLA
2019

Nota de Aceptación

Jurado

Jurado

Barranquilla, agosto del 2019

Agradecimientos

En primer lugar, deseo expresar mi agradecimiento a Dios por ser siempre mi compañía y guía a lo largo de mi vida. A la Universidad de la Costa (CUC), por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional. A sí mismo y, por supuesto, el agradecimiento más profundo y sentido va para mis padres, sin su apoyo, colaboración e inspiración habría sido imposible llevar a cabo este duro recorrido. Gracias por su ejemplo de lucha, honestidad, tenacidad, paciencia, y por ser ejemplo de valentía y capacidad... ¡por ellos y para ellos!

Agradecer de manera especial y sincera a nuestra tutora Ing. Ana Duarte y cotutor PhD Ismael Schneider, por su apoyo y confianza en nuestro trabajo, su capacidad para guiar las ideas han sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en nuestra formación porque nunca escatimaron esfuerzo y tiempo para corregir y mejorar este trabajo, todo siempre enmarcado en su orientación y rigurosidad, han sido la clave del buen trabajo que hemos realizado juntos, el cual no se puede concebir sin su siempre oportuna participación. Gracias a ambos.

Agradecimientos a nuestros profesores durante toda mi carrera profesional porque todos han aportado un granito de arena en esta formación.

Gracias a las autoridades ambientales de Barranquilla y su área metropolitana por brindarnos la información necesaria para el desarrollo de esta investigación ya que fueron la base para la construcción del presente trabajo.

Finalmente, a mi excelente compañero de tesis y carrera, Saúl Ruedas por estar dispuesto a trabajar siempre en equipo dando lo mejor de sí. Y a todas aquellas personas, colegas y amigos que me brindaron su apoyo.

Gracias a la vida.

Katherin Joan Dávila Navad

A Dios por el don de la vida, por su infinito amor y misericordia, por bendecirme día a día y ser mi fuente de sabiduría.

A mi familia, especialmente a mis padres Saúl Ruedas y Leda Mendoza, quienes han sido mi motor e inspiración para poder llegar a este punto de mi carrera. A ustedes gracias por todo el amor, apoyo, sacrificio, dedicación, ejemplo y enseñanzas. Les debo todo lo que soy por eso, esto es por y para ustedes.

A mi Alma Máter, Universidad de la Costa por abrirme las puertas para formarme profesionalmente y permitirme conocer a excelentes docentes y compañeros que fueron partícipes de este proceso.

A nuestra tutora de tesis, Ana Lucia Duarte y cotutor el PhD Ismael Schneider por su apoyo y confianza. Gracias por el tiempo y esfuerzo que dedicaron para compartir sus conocimientos. Sin ustedes no hubiese sido posible la realización de este trabajo. Al Ingeniero Diego Hernández por su colaboración en la modelación de los mapas en ArcGIS.

A las Autoridades Ambientales por brindarnos la información requerida para la elaboración de nuestro trabajo de grado.

Dios los bendiga.

Saúl Ruedas Mendoza.

Resumen

El objetivo del presente proyecto de investigación fue evaluar la variación espaciotemporal de las concentraciones de Ozono en Barranquilla y Área Metropolitana, durante un periodo de 4 meses (marzo-junio de 2018). Fueron consideradas las concentraciones medias horarias de ozono troposférico en las cinco estaciones de monitoreo de Barranquilla y Área Metropolitana, así como fue evaluada la incidencia de las variables meteorológicas en el comportamiento del ozono (O_3) y su variación espaciotemporal. Los datos fueron suministrados por las Autoridades Ambientales (CRA y Barranquilla Verde) y los equipos automáticos utilizados para la determinación de las concentraciones operan bajo la metodología de absorción ultravioleta. Como resultado, fue posible analizar el ciclo fotoquímico del ozono que exhibió un comportamiento característico de zonas costeras, y con la ayuda de un SIG, se representaron gráficamente. A partir de los resultados, se evidenciaron altas concentraciones de Ozono que se registran en horas del mediodía donde la radiación solar y la temperatura se encuentran en sus valores máximos, indicando la clara influencia de los procesos fotoquímicos. Las mayores concentraciones se presentaron en las estaciones del sector norte de la ciudad: Estación Las Tres Avemarías y Estación Móvil (Universidad del Norte) con una media general de 33 y 31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, mientras que en las estaciones del Área Metropolitana de Barranquilla (Estación Edumas y Estación CAI Hipódromo) la media general no supera los 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. La correlación Spearman indicó que existe una relación significativa directa con variables meteorológicas como la radiación solar, temperatura, velocidad del viento, mientras que con la humedad relativa hay una correlación inversamente significativa, que inciden en la formación del ozono.

Palabras clave: Ozono, variables meteorológicas, correlación, ciclo fotoquímico

Abstract

The objective of this research project to evaluate the temporal spatial variation of ozone measurements in Barranquilla and the Metropolitan Area, during a period of 4 months (March-June 2018). The average tropospheric ozone frequencies at the five monitoring stations of Barranquilla and the Metropolitan Area were considered, as was the impact of the incidence of meteorological variables on the behavior of ozone (O₃) and its spatio-temporal variation. The data were provided by the Environmental Authorities (CRA and Barranquilla Verde) and the automatic equipment used to determine the receivers operated under the ultraviolet absorption methodology. As a result, it was possible to analyze the photochemical cycle of ozone that exhibited a characteristic behavior of coastal areas, and with the help of a GIS, it is represented graphically. From the results, high concentrations of ozone were evidenced that are recorded in the midday hours where solar radiation and temperature are at their maximum values, indicating the clear influence of photochemical processes. The largest are in the stations of the northern sector of the city: Las Tres Avemarías Station and Mobile Station (Universidad del Norte) with a general average of 33 and 31 $\mu\text{g} / \text{m}^3$ respectively, while in the stations of the Barranquilla Metropolitan Area (Edumas Station and CAI Hipódromo Station) the general average does not exceed 20 $\mu\text{g} / \text{m}^3$. The Spearman correlation indicated that there is a direct relationship with meteorological variables such as solar radiation, temperature, wind speed, while with relative humidity there is an inversely significant correlation, which affects the formation of ozone.

Keywords: Ozone, meteorological variables, correlation, photochemical cycle

Tabla de contenido

Lista de tablas y figuras	10
1. Introducción	12
2. Planteamiento del problema.....	14
3. Justificación	16
4. Objetivos.....	17
4.2 Objetivo General	17
4.3 Objetivos Específicos	17
5. Marco de referencia.....	17
5.1 Antecedentes	17
5.2 Marco teórico.....	22
5.2.1 Calidad de Aire a Nivel Global	22
5.2.2 Calidad del Aire en Colombia	22
5.2.3 Contaminación Atmosférica.....	23
5.2.4 Contaminantes Primarios	24
5.2.2 Contaminantes Secundarios	26
5.2.3 Variación Espacial del Ozono	28
5.2.4 Ozono, Efectos a la Salud y Medio Ambiente	29
5.2.5 Condiciones Meteorológicas de Barranquilla	31
6. Marco legal	33
6.1 Normativas Internacionales	33
6.1.1 Guía de Calidad del Aire según la OMS	33
6.2 Normativas Nacionales	33
6.2.1 Ley 23 de 1973	33
6.2.2 Decreto Ley 2811 de 1974	34
6.2.3 Ley 9 de 1979	34

6.2.4	Decreto 948 de 1995	34
6.2.5	Decreto 979 de 2006	36
6.2.6	Resolución 601 de 2006 modificada por la 610 de 2010	37
6.2.7	Resolución 650 de 2010 modificada por la 2154 de 2010	38
6.2.8	Resolución 2254 de 2017	39
7.	Metodología	40
7.1	Descripción del Área de Estudio	40
7.2	Fuente de los datos	42
7.3	Validación de datos	43
7.4	Análisis Estadísticos	44
8.	Resultados y discusión.....	45
8.1	Variación horaria.....	46
8.2	Influencia de las variables meteorológicas	53
8.3	Variación Espacio-Temporal del Ozono	56
9.	Conclusiones	60
10.	Recomendaciones.....	62
	Referencias	63
	Anexos.....	71

Lista de figuras y tablas

Figuras.

Figura 1. Mapa de Área de Estudio y ubicación de las estaciones de monitoreo.	41
Figura 2. Analizador automático O ₃ /Thermo Scientific Modelo 49i.....	42
Figura 3. O342M Ozone Analyzer.....	43
Figura 4. Comportamiento promedio del Ozono, periodo marzo-junio de 2018.	47
Figura 5. Comportamiento Ozono Vs. Radiación Solar. 5 (a) Estación Edumas. 5(b) Estación CAI Hipódromo. 5 (c) Estación Escuela de Policía. 5 (d) Estación Las Tres Avemarías. 5 (e) Estación Móvil, periodo marzo-junio de 2018. Fuente: elaboración propia.	50
Figura 6. Comportamiento Ozono Vs. Temperatura. 6 (a) Estación Edumas. 6 (b) Estación CAI Hipódromo. 6 (c) Estación Escuela de Policía. 6 (d) Estación Las Tres Avemarías. 6 (e) Estación Móvil, periodo marzo-junio de 2018.	51
Figura 7. Comportamiento del Ozono Vs. Porcentaje de Humedad Relativa. 7 (a) Estación Edumas. 7 (b) Estación CAI Hipódromo. 7 (c) Estación Escuela de Policía. 7 (d) Estación Las Tres Avemarías. 7 (e) Estación Móvil, periodo marzo-junio de 2018.	54
Figura 8. Rosa de los Vientos para cada una de las Estaciones. (a) Estación Edumas. Figura 8 (b) Estación CAI Hipódromo. 8 (c) Estación Escuela de Policía. 8 (d) Estación Las Tres Avemarías. 8 (e) Estación Móvil. Periodo marzo-junio de 2018.....	56
Figura 9. Variación temporal del Ozono (O ₃). Periodo marzo-junio de 2018.	59
Figura 10. Variación Espacial del Ozono (Marzo/2018).	71
Figura 11. Variación Espacial del Ozono (Abril/2018).	71
Figura 12. Variación Espacial del Ozono (Mayo/2018).	72
Figura 13. Variación Espacial del Ozono (Junio/2018).	72
Figura 14. Rosa de Vientos. Estación Escuela de Policía..	73
Figura 15. Rosa de Vientos. Estación Las Tres Avemarías.....	73
Figura 16. Rosa de Vientos. Estación Móvil (Universidad del Norte).	74
Figura 17. Rosa de Vientos. Estación Edumas (Área Metropolitana)	74
Figura 18. Rosa de Vientos. Estación CAI Hipódromo (Área Metropolitana).	75

Tablas.

Tabla 1. Niveles máximos permisibles para contaminantes criterios. _____	37
Tabla 2. Concentración y tiempo de exposición de los contaminantes para niveles de alarma. _____	38
Tabla 3. Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio. _____	39
Tabla 4. Coordenadas geográficas de las estaciones de monitoreo. _____	41
Tabla 5. Estadísticos descriptivos de las concentraciones de Ozono (O ₃). _____	45
Tabla 6. Diferencia de mínimos y máximos _____	52
Tabla 7. Concentraciones registradas en diferentes lugares de Colombia y el mundo. _____	53
Tabla 8. Correlaciones (O ₃ VS. Variables Meteorológicas) _____	54

1. Introducción

La contaminación atmosférica es el fenómeno de acumulación o concentración de contaminantes en el aire en un tiempo determinado como resultado de actividades humanas o procesos naturales, que causan molestias o daños para la salud de las personas y otros seres vivos; no debe verse solo como una problemática ambiental, sino directamente relacionada con la calidad de vida de la población (IDEAM, 2012).

Los contaminantes se clasifican en antropogénicos, derivados de la actividad humana, o naturales, resultantes de procesos de la naturaleza, generando emisiones que producen una concentración que varía según la fuente local de emisión y las condiciones atmosféricas dominantes (Oyarzún, 2010). En las áreas urbanas, la actividad humana es la principal fuente de contaminantes en el aire, esto se debe principalmente al tráfico, junto con la actividad industrial y residencial (Tohid *et al.*, 2019). En Colombia, los mayores niveles de contaminación se presentan en las zonas urbanas y grandes centros industriales, y teniendo en cuenta que en el país cerca del 76% de la población habita en estas zonas, este problema cobra una especial importancia para la salud humana (IDEAM, 2012).

La Organización Mundial de la Salud estima que cada año más de cuatro millones de personas mueren prematuramente en el mundo debido a la exposición de aire contaminado en las ciudades. En el país, cerca de 8.000 personas mueren por la exposición a la contaminación. Es, sin duda alguna, uno de los retos más importantes de la salud pública en Colombia (OMS, 2017)

Dentro de los contaminantes que existen en la atmósfera, se identifican 5 contaminantes criterios que afectan a la salud desde su inhalación: monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono troposférico (O₃), material particulado (PM₁₀) y (PM_{2.5}). El comportamiento de estos contaminantes en la atmósfera no sólo depende de las

características químicas del componente y del ambiente donde se encuentra, sino también de condiciones físicas y meteorológicas donde se emiten, afectando así la calidad de aire en los centros urbanos (Tyler *et al.*, 2013).

La calidad de aire se refiere al estado de la contaminación atmosférica, es decir, un indicador de qué tan contaminado se encuentra el aire y, por lo tanto, que tan apto es para ser respirado (IDEAM, 2012). En los últimos tiempos se ha observado un deterioro de la calidad del aire principalmente en aquellas regiones densamente pobladas, provocado básicamente por un aumento substancial de las emisiones de contaminantes a la atmósfera. No obstante, mecanismos como el transporte, la transformación química, la dispersión y el depósito de contaminantes emitidos desde zonas industrializadas ocasionan el deterioro de la calidad del aire en zonas alejadas de las fuentes de emisión (Fonseca, 2012).

Las fuentes industriales liberan cantidades significativas de compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NO_x) que conduce a la producción de ozono fotoquímico. Además de estas fuentes antropogénicas, el frente de brisa marina, que se traslada tierra adentro por la tarde y costa afuera en la noche, puede provocar el estancamiento de la masa de aire urbano en ciertas condiciones sinópticas (Paulsen, Sale, & Morris, 2018). El Ozono es un contaminante secundario generado a través de una serie de reacciones fotoquímicas complejas que involucran radiación solar y precursores del ozono, tales como, óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles (COVs) (Masiol *et al.*, 2019), jugando un factor importante para los procesos de oxidación en condiciones atmosféricas y la contaminación fotoquímica del aire (Taylan, 2016).

Durante el día, la luz solar juega un papel importante en el inicio de reacciones entre los precursores para formar ozono. Por su parte, el ozono troposférico nocturno se agota a través de

reacciones químicas con óxido nítrico (NO) para la formación de dióxido de nitrógeno (NO₂) y oxígeno lo que contribuye a una disminución del ozono hasta el amanecer (Xiangshang & Rappenglueck, 2019).

La presente investigación tiene como objetivo estudiar las concentraciones de ozono presentes en el área metropolitana de Barranquilla, con el fin de analizar su comportamiento e incidencia de los parámetros meteorológicos en las concentraciones presentadas, de esta manera aportar a investigaciones futuras para la prevención, control y mitigación de dicho contaminante.

2. Planteamiento del problema

El ozono es un contaminante común en las áreas metropolitanas, en regiones con altos índices de radiación solar y elevadas temperaturas, en zonas costeras con regímenes de viento de tipo recirculatorios. Por ser un contaminante fotoquímico, la tendencia al aumento de la contaminación por ozono en Colombia se relaciona con la tendencia al incremento en verano de las temperaturas y de las situaciones meteorológicas extremas (olas de calor), cada vez más tempranas, frecuentes, prolongadas y extremas, resultado del cambio climático (IDEAM, 2017).

Las concentraciones de algunos contaminantes por encima de los estándares fijados en las normas ambientales en largos periodos de exposición, ha generado la necesidad de impulsar la gestión de la calidad de aire para proteger la salud de la población y el ambiente, es por ello, que a nivel internacional hay evidencia que, al adoptar mejores tecnologías en sectores como el transporte y la industria, la calidad del aire mejora (DNP, 2018).

El incremento de la población, del nivel de ingreso y de la búsqueda de una mejor calidad de vida, demandan una mayor prestación de servicios como el transporte y la producción de bienes. Esto, mediante el desarrollo de actividades industriales que generan emisiones de contaminantes,

ha ocasionado que la calidad del aire en el país se encuentre en niveles que afectan la salud y el ambiente (CONPES, 2018).

Es por ello, que para abordar esta problemática en el año 2010 se aprobó la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire, cuyo objetivo fue impulsar la gestión de este recurso en corto, mediano y largo plazo con un plan de acción del 2010 a 2019 (CONPES, 2018).

Para definir estrategias de prevención, reducción y control de la contaminación del aire, se cuenta con instrumentos de diagnóstico como inventarios de emisiones, modelos de dispersión de contaminantes y Sistemas de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA).

En Barranquilla y Área Metropolitana hasta el momento no han desarrollado inventarios de emisiones y los elaborados en años anteriores fueron desarrollados con metodologías que no permiten realizar un análisis de la variación espaciotemporal de los contaminantes, comparaciones entre áreas de estudio ni evaluaciones agregadas del país, por esta razón actualmente no se cuenta con un inventario de emisiones (CONPES, 2018).

En Barranquilla no se ha avanzado en el estudio del ozono a pesar de los problemas que este genera. Según IDEAM (2017) una alta exposición al ozono troposférico irrita el sistema respiratorio, reduce la función pulmonar, agrava el asma, inflama y daña las células que recubren los pulmones, agrava las enfermedades pulmonares crónicas y causa daño pulmonar permanente, sin mencionar los efectos que tiene en el medio ambiente.

De acuerdo con lo anteriormente mencionado, y teniendo en cuenta la escasa información relacionada sobre la calidad del aire de Barranquilla y Área Metropolitana a pesar de que ya cuenta con un SVCA, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo es la variación espaciotemporal del Ozono y cómo las concentraciones de este se ven influenciadas por las variables meteorológicas en Barranquilla y Área Metropolitana?

3. Justificación

La problemática de la contaminación atmosférica y los efectos asociados al medio ambiente y a la salud humana han sido objeto de investigación durante muchos años. La mala calidad del aire es una preocupación particularmente importante para las ciudades de los países en desarrollo, donde la población, el tráfico y la industrialización son las principales fuentes de contaminación atmosférica a nivel local, regional y global (Schneider et al., 2017). La presencia de material particulado, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y contaminantes fotoquímicos como el ozono troposférico son los responsables de tal problemática en áreas urbanas (Londoño, Correa , & Palacio, 2011).

El ozono (O_3) es un contaminante secundario producto de reacciones químicas entre COV, CH_4 y NO_x , por lo que sus concentraciones dependen de la disponibilidad de precursores y la radiación solar, indispensable para su formación (Cuesta *et al.*, 2018). Durante los últimos años los niveles de O_3 han aumentado como resultado de las actividades humanas, teniendo un efecto negativo en el medio ambiente y las personas. La exposición a altas concentraciones de O_3 puede provocar problemas respiratorios y cardiovasculares, además posiblemente puede conducir a muertes prematuras (Cano *et al.*, 2016).

Barranquilla y su Área Metropolitana ubicadas en el nororiente de Colombia, cuentan con más de dos millones de habitantes (Alcaldía de Barranquilla, 2016). La autoridad ambiental local (Barranquilla Verde) y la Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA) son las que operan las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire, donde se mide la concentración de algunos contaminantes y también parámetros meteorológicos. A pesar de que en Barranquilla y Soledad se está monitoreando desde el año 2016, el crecimiento mismo de la ciudad, sus características ambientales, la industrialización y la circulación de los vehículos

contribuyen al incremento de concentraciones considerables de contaminantes fotoquímicos en zonas urbanas y al deterioro de la calidad del aire. Sin embargo, aún no se ha abordado desde una perspectiva científica, que permita evaluar y analizar el comportamiento de este contaminante. Es por ello, que la investigación en desarrollo es relevante, porque permitirá tener información detallada del comportamiento del ozono y la influencia de las variables meteorológicas en Barranquilla y su Área Metropolitana.

4. Objetivos

4.2 Objetivo General

Evaluar la variación espaciotemporal de las concentraciones de Ozono en Barranquilla y su Área Metropolitana.

4.3 Objetivos Específicos

Describir las variaciones horarias y diarias de las concentraciones de ozono en Barranquilla y Área Metropolitana.

Verificar la influencia de los parámetros meteorológicos en las concentraciones del ozono.

5. Marco de referencia

5.1 antecedentes

Los estudios a nivel mundial son relativamente recientes, además en algunos países los estudios de la calidad del aire son más completos que en otros. En Hangzhou, China utilizaron el modelo atmosférico tradicional, WRF-CMAQ y modelos automáticos para analizar y predecir el ozono troposférico en la superficie, utilizando la meteorología y los contaminantes del aire como insumo. La temperatura y la humedad relativa, fueron los factores meteorológicos predominantes

en la formación del ozono troposférico, a su vez, la radiación solar directa, la velocidad y la dirección del viento juegan un papel trivial en el impacto del ozono. En cuanto a los contaminantes del aire, el NO_2 es el principal factor influyente tanto para el ozono por hora como para el O_3 -8 h diario. Por otra parte, la reducción de NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} o el CO resultaron en el aumento del ozono troposférico (Feng *et al.*, 2019).

En Brasil, evaluaron las concentraciones de ozono troposférico y COV bajo las emisiones de la agroindustria de la caña de azúcar en áreas urbanas y rurales de Araraquara, São Paulo. Los muestreos los realizaron con muestreadores de aire activos y pasivos durante la cosecha de la caña de azúcar y en el período comprendido entre las cosechas en 2011 y 2012. El estudio lo realizaron en 3 situaciones: durante y después de la quema de las plantaciones de caña y en un área urbana. Aunque la industria de la caña de azúcar es una fuente importante de emisión de precursores de ozono, en la investigación los niveles de ozono troposférico no aumentaron significativamente bajo las emisiones de la agroindustria (Francisco *et al.*, 2016).

En Brasil, determinaron la interacción en términos de transporte de ozono entre dos regiones metropolitanas del estado de São Paulo: la Región Metropolitana de Campinas (MRC) y la Región Metropolitana de São Paulo (MRSP), con diferentes características y dimensiones. Utilizaron el modelo CIT fotoquímico euleriano tridimensional para describir la interacción entre ambas regiones, y condiciones meteorológicas para caracterizar el período de simulación con el fin de garantizar la existencia de condiciones favorables para la formación de ozono y posibles eventos de transporte de contaminación del aire. Los resultados de las simulaciones fotoquímicas mostraron que la concentración de ozono en la Región Metropolitana de Campinas está asociada a las emisiones locales y al transporte de ozono y sus precursores desde la Región Metropolitana de São Paulo (Boian & André, 2012).

En un estudio realizado en España, estimaron la variabilidad espacial del ozono troposférico en la cuenca del Mediterráneo Occidental, las concentraciones de ozono se midieron con muestreadores pasivos y analizadores continuos en algunos sitios seleccionados, y los valores se compararon con la concentración estimada. Como resultado, observaron altos valores de ozono a favor del viento de la ciudad a gran altura, donde la producción fotoquímica fue responsable de los gradientes, aumentando con la distancia desde la fuente de precursores (Caballero *et al.*, 2007).

En una investigación realizada en Chiapas – México, se realizó la medición remota de ozono atmosférico en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, utilizando dos técnicas basadas en espectroscopia por absorción óptica diferencial, la cual permitía detectar trazas de contaminantes presentes en la atmósfera. Los resultados obtenidos determinaron las concentraciones de ozono, considerando la ubicación del instrumento y de la fuente de emisión, evaluando además la influencia de las condiciones climáticas (García *et al.*, 2013).

En Santiago de Chile, se realizó una investigación con el objetivo de estudiar el efecto del fenómeno del niño en la concentración de ozono troposférico en esta ciudad. Para ello seleccionaron comunas que tuvieran elevados niveles de ozono, y los datos recopilados se separaron para años con y sin fenómenos del niño, por separado, y considerando periodos característicos en la formación de ozono. Se relacionaron los datos para determinar si existía relación entre la concentración de ozono y la temperatura. Los resultados concluyeron que ninguna de las comunas estudiadas presentó diferencias significativas con y sin fenómeno del niño (López, 2017).

En ese mismo proceso investigativo, en un estudio realizado por Cano *et al.* (2016), se evaluaron los niveles de ozono en la ciudad de Maracaibo, estado de Zulia, Venezuela. Las

muestras se recolectaron in situ a través de un fotómetro durante el periodo de enero del 2009, por 24 horas continuas. El ciclo fotoquímico del ozono exhibió un comportamiento característico de zonas urbanas, con valores mínimos a tempranas horas de la mañana y un incremento a partir de las 8 de la mañana, con valores máximos al medio día. A partir de un análisis estadístico se observó que las concentraciones máximas horarias de ozono no excedieron el estándar nacional de calidad de aire en los días evaluados (Cano *et al.*, 2016).

En Colombia, en los últimos años se vienen presentando emergencias por contaminación del aire en las importantes ciudades del país (Bogotá, Medellín y Cali) por lo que esto ha llevado a realizar investigaciones que permitan identificar la calidad del aire en las principales ciudades del país. En una investigación realizada en el país sobre la caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia, muestran un panorama de la contaminación del aire destacando sus contaminantes, orígenes y su importancia frente a la salud y el medio ambiente, además proporciona un análisis de la contaminación de dos ciudades principales en Colombia: Bogotá y Cali (Tyler *et al.*, 2013).

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, realizó un informe del estado de la calidad del aire en Colombia para el año 2017, donde se concluyó que en cinco estaciones de monitoreo se presentaron más de 100 días con excedencia a los niveles máximos permisibles octohorarios establecidos por la resolución 610 de 2010 para el contaminante ozono (O_3), siendo la ciudad de Cali jurisdicción del Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente (DAGMA), la que mayor afectación registró (IDEAM, 2017).

En un estudio realizado en Manizales, fue evaluada la distribución espacial de O_3 , a través de mediciones en 12 puntos de monitoreo distribuidos entre las áreas urbana y rural de la ciudad, considerando la dirección del viento sobre la que se dispersa la pluma del volcán activo Nevado

del Ruiz. Las concentraciones de Ozono variaron de 16,1 a 68,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y las mayores concentraciones se registraron en los puntos del área rural (Cuesta *et al.*, 2018).

Estas investigaciones muestran el panorama de la calidad del aire en Colombia y la necesidad de monitorear los contaminantes que se generan. Es por ello, que a nivel mundial y en Colombia se han establecido guías de calidad del aire para la protección de la salud.

En el año 2005, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estableció guías de calidad del aire referentes al material particulado, el ozono (O_3), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el dióxido de azufre (SO_2), donde se recomienda valores para la concentración de contaminantes en el aire, con el fin de que los gobiernos fijen metas teniendo en cuenta sus condiciones locales en pro de la protección de la salud. El valor guía expuesto por la OMS (2005) para el caso del ozono es de $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ para un periodo de 8 horas. Reconociendo que estos niveles guía deben ser alcanzados de manera gradual, se proponen objetivos intermedios para cada contaminante, en donde el de nivel III es el más cercano al nivel guía (OMS, 2005). La Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) recomendó a Colombia en 2014 adoptar estas guías de calidad del aire (CONPES, 2018).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), el Instituto del Aire Limpio y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) recomiendan para cualquier país que esté interesado en reducir las emisiones contaminantes del aire, desarrollar inventarios de las fuentes que generan contaminantes y medir la concentración de estos en el aire a través de sistemas de vigilancia, con el fin, de definir acciones encaminadas a alcanzar los valores guía propuestos por la OMS (CONPES, 2018). Hacia esto se ha enfocado el país desde los años noventa con la implementación de los primeros sistemas de vigilancia de la

calidad del aire e investigaciones de los efectos de la contaminación del aire en la salud, y a partir del 2010 en la elaboración de inventarios de fuentes de emisión (CONPES, 2018).

5.2 Marco teórico

5.2.1 Calidad de aire a nivel global

La contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental y para la salud, bien sea en los países desarrollados o en los países en vía de desarrollo. Es por ello, que se hace necesario cuantificar, analizar y mitigar los contaminantes que se encuentran en la atmósfera, por lo tanto, en diferentes países del mundo se han tomado la tarea de elaborar estándares que indiquen los límites permisibles de dichos contaminantes que pueden ser perjudiciales para el ser humano y el ecosistema. A pesar de la existencia de esos estándares, a nivel global y específicamente en América Latina, se calcula que por lo menos 100 millones de personas están a diario expuestas a niveles de contaminación del aire por encima de lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) (Sánchez & Green, 2013)

5.2.2 Calidad del Aire en Colombia

La problemática de la contaminación atmosférica en el país se ha constituido en uno de los principales problemas ambientales; el deterioro de la calidad del aire ha propiciado que se incrementen los efectos negativos sobre la salud humana y el medio ambiente (MinAmbiente, 2012), siendo la que genera los mayores costos sociales y ambientales después de los generados por la contaminación del agua y los desastres naturales. En Colombia, la contaminación atmosférica local causa pérdidas que ascienden hasta los 1,5 billones de pesos (IDEAM, 2012).

Las concentraciones de algunos contaminantes en la atmósfera por encima de los estándares fijados en las normas ambientales en largos periodos de exposición han generado la necesidad de

continuar impulsando la gestión de la calidad del aire para proteger la salud de la población y el ambiente (MinAmbiente, 2012).

Según CONPES 3344 (2005), la principal causa de contaminación atmosférica es por el uso de combustibles fósiles, generados en un 41% en ciudades como Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, el Valle Sogamoso, Bucaramanga y Pereira (IDEAM, 2012). En la última década, se ha logrado un progreso significativo hacia la gestión efectiva de la contaminación del aire en Colombia. La Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire del Gobierno Nacional (2010) enumera algunas de las principales áreas de progreso en el país: evaluación de la calidad del aire, monitoreo, estandarización de la gestión de la calidad del aire, mejora de la calidad del combustible e incentivos para el control ambiental y vigilancia. Es importante señalar que un gran esfuerzo en este sentido permitió generar una amplia base de evidencia que reveló debilidades sistemáticas y áreas de mejora (MinAmbiente, 2012).

5.2.3 Contaminación Atmosférica

La contaminación del aire es la concentración de sustancias causantes de efectos adversos en el ambiente y la salud. Los contaminantes en el aire se presentan en forma de partículas y gases, y son emitidos como resultado de actividades humanas, de causas naturales, o de una combinación de estas, a su vez, viene determinada principalmente por la distribución geográfica de las fuentes de emisiones de contaminantes y las cantidades de contaminantes emitidos, donde los procesos físico-químicos que se producen en la atmósfera, la meteorología y la orografía influyen en los procesos de dispersión y transporte de los contaminantes (MinAmbiente, 2015).

Estos gases y partículas (conocidos como contaminantes) tienden a provenir de fuentes **artificiales**, incluida la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo, la gasolina o el diesel, pero también pueden provenir de fuentes naturales como erupciones volcánicas e

incendios forestales. Los contaminantes pueden estar en: partículas sólidas, gotas de líquido y gases. Además, se clasifican en **contaminantes primarios** que son emitidos directamente a la atmósfera y los **contaminantes secundarios** que se forman cuando los contaminantes primarios interactúan entre sí en la atmósfera (Sánchez & Green, 2013).

5.2.4 Contaminantes Primarios

Los contaminantes primarios son:

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro y venenoso. Se forma como un subproducto de procesos de combustión incompletos que involucran fuentes de energía basadas en carbono, como la quema de gasolina, carbón o madera. Durante el proceso, si no hay suficiente oxígeno disponible para crear dióxido de carbono como un subproducto, en su lugar se crea monóxido de carbono. Las mayores fuentes de monóxido de carbono provienen de los vehículos, especialmente cuando se mueven lentamente o cuando el motor está inactivo. El monóxido de carbono es peligroso para la salud de las personas; una vez inhalado compite con el oxígeno al unirse a la hemoglobina en los glóbulos rojos y en los órganos vitales como el cerebro, los tejidos del sistema nervioso y el corazón, lo que reduce su capacidad para funcionar correctamente (EPA, 2013).

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) son un grupo de gases compuestos de cantidades variables de moléculas de oxígeno y nitrógeno. Uno de los óxidos de nitrógeno más comunes es el dióxido de nitrógeno (NO₂), que es un gas marrón rojizo que tiene un olor desagradable y es tóxico en altas concentraciones. Estos pueden formar contaminantes secundarios y pueden resultar en problemas ambientales como la acidificación y el enriquecimiento de nitrógeno. Se forman cuando los combustibles fósiles se queman a altas temperaturas, pero también pueden formarse de forma natural por los rayos. La mayor parte del dióxido de nitrógeno en las zonas urbanas

proviene de las emisiones de escape. Puede aumentar la probabilidad de problemas respiratorios, ya que inflama el revestimiento de los pulmones y puede reducir la inmunidad a las infecciones pulmonares. Esto puede causar problemas como sibilancias, tos, resfriados, gripe y bronquitis (EPA, 2013).

Los óxidos de azufre (SO_x) son compuestos por moléculas de azufre y oxígeno. El óxido de azufre más común es el dióxido de azufre (SO₂), que es un gas incoloro con un olor de fósforo quemado. Estos pueden formar contaminantes secundarios y pueden resultar en problemas ambientales como la acidificación. Se forman durante la quema de combustibles que contienen azufre, como carbón y petróleo, y minerales que contienen metales (como aluminio, cobre, zinc, plomo y hierro). La mayor parte del dióxido de azufre en el aire es causada por la quema de carbón y petróleo para la generación de energía y actividades industriales. También se produce a partir de fuentes naturales como volcanes activos y aguas termales. El dióxido de azufre puede causar dificultades respiratorias si es inhalado. También es tóxico para las plantas y puede causar lluvia ácida cuando reacciona con la humedad del aire (EPA, 2013).

Material particulado (PM) son pequeñas partículas de materia sólida o líquidas resuspendidas en el aire, y pueden estar formadas por cientos de sustancias químicas diferentes, entre ellas carbono, azufre, nitrógeno y compuestos metálicos. Se originan en muchas fuentes diferentes, incluyendo sitios de construcción, escapes de vehículos, sitios industriales, caminos sin pavimentar, y vienen en muchas formas y tamaños. Algunos son lo suficientemente grandes para ser vistos a simple vista, mientras que otros solo se pueden ver a través de microscopios potentes. Las partículas más grandes (más de 10 micrómetros) generalmente se filtran fuera del cuerpo a través de la nariz y la garganta. Las partículas de 10 micrómetros o más pequeñas se pueden inhalar en las partes más profundas de los pulmones. Las partículas finas son más

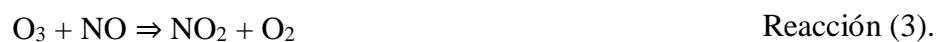
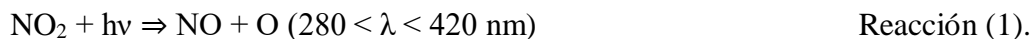
pequeñas que 2.5 micrómetros y son lo suficientemente pequeñas para pasar de los pulmones al suministro de sangre (EPA, 2013).

5.2.2 Contaminantes Secundarios

El Ozono troposférico es el indicador de la mezcla de oxidantes fotoquímicos formado a partir de emisiones de precursores biogénicos y antropogénicos. El O₃ natural en la tropósfera puede resultar de precursores orgánicos biogénicos que reaccionan con los óxidos de nitrógeno naturales (NO_x) y por la intrusión de O₃ estratosférico en la tropósfera. Los precursores antropogénicos de O₃, especialmente NO_x y compuestos orgánicos volátiles (COV), se originan a partir de una amplia variedad de fuentes estacionarias y móviles. Las concentraciones ambientales de O₃ producidas por estas emisiones se ven directamente afectadas por la temperatura, la radiación solar, la velocidad del viento y otros factores meteorológicos (EPA, 2013).

Procesos de formación de Ozono

Los procesos de formación y destrucción de ozono son de gran complejidad, se ven afectados por números factores (radiación solar, temperatura, precursores, etc.). En una atmósfera en la que no haya precursores de ozono, el ozono se formaría a partir de la disociación del dióxido de nitrógeno en la que se produce un átomo de oxígeno y una molécula de óxido nítrico. El átomo de oxígeno reacciona con la molécula del mismo gas para formar ozono, para reaccionar rápidamente con el óxido nítrico para formar de nuevo dióxido de nitrógeno (Andame, 2009).



En la reacción 3 es necesario la molécula de ozono para generar una molécula de NO₂ a partir de la molécula de NO. En atmósferas en las que hay presencia de COV, se produce la reacción con los radicales hidroxilos para generar radicales peroxilos (reacciones 4 y 5) estos oxidan al NO formándose NO₂ (reacción 6) favoreciendo a la producción de ozono (Andame, 2009).



Para la formación de ozono es necesario la presencia de óxidos de nitrógeno y la oxidación de los COV por parte el radical hidroxilo. Sin embargo, no es la única forma para oxidar a los COV, y producir radicales peroxilo que oxidarán al NO (Andame, 2009).

No todos los COV se comportan de igual manera en las reacciones fotoquímicas, y no todos contribuyen en el mismo grado a la formación de ozono. Su participación en estas reacciones dependerá de su estructura química y de su reactividad. Una especie de COV que se encuentre en grandes concentraciones no será necesariamente un precursor de ozono si no es reactivo en la producción de radicales peroxilo y eficaz en la producción de ozono (Andame, 2009).

La formación de ozono en una zona urbana dependerá de factores tales como la localización, características y niveles de los precursores, dispersión y cercanía de los focos de emisión, niveles de radiación solar y condiciones meteorológicas (Andame, 2009).

Las concentraciones de ozono, óxidos de nitrógenos y otros contaminantes secundarios siguen un patrón de comportamiento similar a lo largo del día, pero los precursores de ozono que se emiten en áreas urbanas e industriales son las causantes de que la formación y acumulación de ozono incremente las concentraciones por encima de niveles naturales (Andame, 2009).

Procesos de eliminación de Ozono

Los procesos de eliminación de ozono pueden ser tanto químicos como físicos, y a su vez dentro de los procesos químicos se puede producir la eliminación de ozono por reacción directa con otras moléculas o radicales, o por fotodisociación (Andame, 2009).

Los procesos químicos de eliminación ocurren a través de las reacciones con monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂) e hidrocarburos (Andame, 2009).



Las reacciones de ozono con los óxidos de nitrógeno son una vía importante de eliminación de ozono, particularmente durante la noche (Andame, 2009).

5.2.3 Variación Espacial del Ozono

La distribución espacial del ozono viene determinada por las reacciones de formación y destrucción del ozono en la atmósfera, con influencia de factores meteorológicos como la radiación solar, vientos predominantes, topografía de la zona y concentración de precursores. Esta distribución presenta una peculiaridad respecto a otros contaminantes atmosféricos, ya que las concentraciones más elevadas se alcanzan generalmente en las zonas rurales que rodean a ciudades o centros de emisión de precursores y situadas en la dirección de los vientos dominantes. En el interior de las ciudades, las altas emisiones de óxidos de nitrógeno procedentes principalmente del tráfico participan en los procesos de destrucción del ozono manteniendo sus niveles relativamente bajos (Bermejo *et al.*, 2009).

En *zonas costeras*, la concentración de ozono y su distribución espacial presentan una dinámica muy relacionada con la topografía, el régimen de brisas y los procesos de recirculación

asociados a ellas. Durante el día, la brisa transporta los contaminantes emitidos en los centros industriales y urbanos costeros hacia el interior siguiendo la topografía de los valles que se abren al mar. En este transporte, se produce ozono a partir de las reacciones fotoquímicas que suceden entre sus precursores, y que tiende a acumularse en las capas atmosféricas más altas y por la tarde, se invierte la dirección de la brisa y las capas de aire enriquecidas en ozono (estratos de ozono) se desplazan hacia el mar donde se acumulan a cierta altitud (Bermejo *et al.*, 2009).

5.2.4 Ozono, Efectos a la Salud y Medio Ambiente

La evidencia mundial sobre los efectos en la salud de la contaminación del aire en las zonas urbanas ha sido considerable durante décadas. Estudios extensos muestran la asociación entre ciertos contaminantes del aire y la mortalidad respiratoria y cardiovascular, la bronquitis crónica, las infecciones respiratorias y varios trastornos relacionados. La mayoría de los estudios muestran la asociación más fuerte entre los contaminantes y los efectos en la salud de las partículas inhalables, en específico de PM_{2.5} (MinAmbiente, 2012).

Por supuesto, las partículas inhalables no son el único contaminante del aire relevante para la salud. Se ha demostrado que muchas emisiones antropogénicas están asociadas con resultados adversos para la salud, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, monóxido de carbono, plomo y especialmente, ozono (MinAmbiente, 2012).

El ozono troposférico es un importante contaminante del aire que tiene efectos adversos sobre la salud humana y la productividad del ecosistema. La exposición al ozono está relacionada con la muerte prematura, el asma, la bronquitis, el ataque cardíaco y otros problemas cardiopulmonares (Wang *et al.*, 2019).

Irritación del sistema respiratorio. Los síntomas de esta irritación se manifiestan con la aparición de tos, irritación de garganta y/o experimentación de sensación extraña en el pecho. Estos síntomas pueden perdurar unas horas después de la exposición al ozono (OMS, 2017).

Reducción de la función pulmonar. La reducción de la función pulmonar se refiere a la disminución del volumen de aire que se inhala cuando se hace una inspiración profunda y la velocidad a la que se exhala. El ozono puede hacer que se vuelva más difícil respirar profundamente (OMS, 2017).

Empeora el asma. Con niveles de ozono elevados las posibilidades de sufrir ataques de asma son mayores, este hecho se debe a que el ozono hace que se aumente la sensibilidad a los alérgenos, los cuales son los agentes más comunes que producen los ataques de asma (OMS, 2017).

Inflamación y daños en el recubrimiento del pulmón. El ozono daña las células que recubren los espacios de aire del pulmón. Pasados unos días de la exposición, las células dañadas son repuestas y las células muertas se descartan. Si este tipo de daño ocurre repetidamente, el pulmón puede cambiar permanentemente de manera que puede causar efectos a largo plazo en la salud (OMS, 2017).

Los efectos que el ozono provoca en la vegetación dependen de la cantidad de contaminante que consigue alcanzar el interior de la planta e interferir en las reacciones bioquímicas y metabólicas gracias a las que se produce el desarrollo y crecimiento vegetal. Debido a que el ozono es un contaminante gaseoso, su principal vía de entrada en las plantas es a través de las estomas, unos pequeños poros en la superficie de las hojas por donde se realiza el proceso habitual de intercambio de gases con la atmósfera que permite la fotosíntesis y la respiración. El

ozono penetra en los tejidos vegetales mediante mecanismos de difusión pasiva (Bermejo *et al.*, 2009).

Los efectos del ozono en la vegetación dependen tanto de la concentración de ozono en el aire como de la frecuencia y duración con que ocurren esas concentraciones. En función del tiempo y la concentración se pueden distinguir dos tipos de exposiciones:

Exposición aguda: exposición a altas concentraciones de ozono durante períodos cortos de tiempo. Este tipo de exposiciones provoca generalmente daños que se observan como síntomas foliares visibles. La aparición de estos síntomas se debe a cambios a nivel bioquímico y no siempre están asociados a reducciones en el crecimiento de las plantas (Bermejo *et al.*, 2009).

Exposición crónica: se producen con concentraciones de ozono bajas o medias durante largos períodos de tiempo. En estos casos se observan alteraciones a nivel metabólico, a menudo sin que se observen síntomas visibles, que conducen a una senescencia prematura y a cambios en el crecimiento y la productividad de las plantas. Este tipo de exposiciones pueden inducir otro tipo de respuestas más difíciles de apreciar como una mayor sensibilidad frente a otros factores de estrés, tanto bióticos como abióticos (Bermejo *et al.*, 2009).

5.2.5 Condiciones Meteorológicas de Barranquilla

Clima: Entre los factores que determinan el clima de Barranquilla están la latitud, la cercanía al mar y el relieve. La ciudad está muy cerca del Ecuador o paralelo 0, por lo cual los rayos del sol caen perpendiculares, registrándose altas temperaturas durante todo el año. Barranquilla, además, está ubicada en la zona intertropical o de bajas latitudes, este factor sumado a su cercanía al mar y a sus tierras bajas, permite una moderación de las temperaturas por la influencia de las brisas marinas. Así mismo, el clima de Barranquilla es de tipo tropical

seco, correspondiente a una vegetación propia de la sequedad y bajo altas temperaturas (CIOH, 2012).

En Barranquilla no se producen las abundantes selvas características del clima tropical. Por el contrario, es una zona seca, como lo es todo el litoral Caribe colombiano, debido a que los vientos alisios del noreste soplan paralelos al litoral, absorbiendo la humedad, empujándola hacia el interior de la Región Caribe hasta las estribaciones de la cordillera de los Andes, donde producen abundantes lluvias. Los vientos alisios son secantes y en determinadas épocas del año soplan con más energía, aumentando la sequía en la región (CIOH, 2012).

La atmósfera de la ciudad está condicionada por su ubicación, en una zona intermedia entre dos extremos climáticos: el árido del norte (desierto de la Guajira) y la región húmeda al sur que se inicia en el valle medio del Magdalena y recibe la influencia del mar Caribe (CIOH, 2012).

El clima tropical y seco se caracteriza por dos periodos: uno seco y otro húmedo. El periodo seco comprende desde diciembre a marzo y la época húmeda comprende los meses de abril hasta noviembre (CIOH, 2012).

Temperatura: Las temperaturas máximas superan siempre los 31 °C, mientras las mínimas están por encima de los 23,3 °C hasta los 24,8 °C. El tipo de clima es seco, con gran déficit de agua, y cálido (CIOH, 2012).

Humedad relativa: La cercanía al mar, la ubicación a orillas del río Magdalena, la zona del Parque Natural Nacional Isla Salamanca, los humedales del delta de la desembocadura del río Magdalena, hace que esta zona tenga bastante humedad, pero esta humedad es modificada por los vientos secantes (CIOH, 2012).

6. Marco legal

El trabajo de investigación está enmarcado dentro del ámbito del monitoreo y seguimiento de la Calidad del Aire en Barranquilla-Colombia, por lo cual se deben de tener en cuenta aspectos legales que no quebranten las normativas nacionales e internacionales en relación con el tema, por tanto, se debe mencionar de dichas referencias.

6.1 Normativas Internacionales

6.1.1 Guía de Calidad del Aire según la OMS

Aunque esta guía no se elaboró para respaldar medidas a conseguir la calidad del aire que proteja la salud pública en distintas situaciones (OMS, 2006), ofrece una orientación general relativa a umbrales y límites para contaminantes atmosféricos clave que entrañan riesgos sanitarios (OMS, 2017). Se estableció el valor guía de los niveles de Ozono en $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para un promedio de ocho horas (OMS, 2005).

6.2 Normativas Nacionales

La problemática de la contaminación en Colombia se remonta desde la declaración de Estocolmo (1972), en donde se establecieron los principios para preservar y mejorar el ambiente con la finalidad de propiciar un desarrollo sostenible (IDEAM , 2005).

6.2.1 Ley 23 de 1973

Por el cual se expide el Código Nacional de los Recursos Naturales, con el objetivo de prevenir y controlar la contaminación del ambiente, buscando mejorar, conservar y restaurar los recursos naturales renovables para defender la salud y el bienestar de los habitantes del territorio nacional (Presidencia Nacional , 1973).

6.2.2 Decreto Ley 2811 de 1974

Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y Protección del Medio Ambiente.

En el cual se establece que el gobierno es el responsable de mantener la atmósfera en condiciones que no interfieran en el desarrollo normal de los seres vivos y los recursos naturales, prohibiendo la emisión de sustancias que pueden ser nocivas cuando sobrepasen los niveles permisibles y previendo la contaminación atmosférica por medio de programas educativos y asistencia técnica para su preparación por otros métodos (Presidencia Nacional, 1974).

6.2.3 Ley 9 de 1979

En el cual se establece que el Ministerio de ambiente fijará de acuerdo al Decreto Ley 2811/1974 las normas de emisión de sustancias contaminantes (fuentes individuales y en conjunto) y las prohibiciones de las descargas a la atmósfera con concentraciones que superen los niveles permisibles; cuando las emisiones de una fuente excedan los límites, se les aplica los sistemas de tratamientos adecuados que permitan hacerlos cumplir, no obstante, si siguen incurriendo en el incumplimiento se le aplicaran las correspondientes sanciones (Presidencia Nacional , 1979).

Adicionalmente, se establecen que en territorio nacional no se permite el uso de combustibles que contengan sustancias en altas concentraciones que repercutan en la contaminación atmosférica (Presidencia Nacional , 1979).

6.2.4 Decreto 948 de 1995

Por el cual se reglamenta la protección y control de la calidad del aire en todo el territorio nacional, estableciendo las normas y principios generales para salvaguardar a la atmósfera, los mecanismos de prevención, control y atención de la contaminación del aire generada por fuentes

fijas y móviles; adicionalmente, se fijan las normas para emisión y descargas de contaminantes, ruido y olores ofensivos, los permisos de emisión, los instrumentos y medios de control y vigilancia y las sanciones por incumplimiento (Presidencia Nacional, 1995).

Este decreto define los tipos de contaminantes en:

- **Contaminantes de primero grado;** aquellos que afectan la calidad del aire (ozono, monóxido de carbono, material particulado, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y el plomo).
- **Contaminantes tóxicos de primer grado;** aquellos que son emitidos de forma rutinaria o accidental y causan lesiones graves o mortalidad (cáncer, enfermedades agudas, mutaciones).
- **Contaminantes de segundo grado;** los que sin afectar el nivel de inmisión generan daños en la atmósfera (compuestos químicos que dañan la capa de ozono, inciden en el efecto invernadero y el cambio climático).

Y las actividades contaminantes sujetas a prioritaria atención y control por parte de las autoridades ambientales, tales como las quemas (combustibles fósiles y áreas rurales), incineración de sustancias tóxicas, actividades industriales y canteras (Presidencia Nacional, 1995).

Se establecen las normas para la protección de la calidad del aire:

- Nivel de inmisión (Resolución 601 de 2006 – Resolución 610 de 2010 – Resolución 2254 de 2017)
- Descarga de contaminantes
- Emisión de ruido y Ruido ambiental (Resolución 627 de 2006)
- Evaluación y emisión de olores

Cada norma establecerá los estándares de emisión para cada contaminante, a diferencia de la evaluación de olores que se establecen por umbrales de tolerancia (Presidencia Nacional, 1995).

6.2.5 Decreto 979 de 2006

Por el cual se modifican algunos artículos (7, 10, 93, 94 y 108) del Decreto 948 de 1995.

- En cual se establece que las normas de calidad del aire serán fijadas en periodos de exposición anual, diario, ocho horas, tres horas y una hora (Presidencia Nacional , 2006).
- Se declaran los niveles de alarma (Prevención, Alerta y Emergencia) que deberán ser declarados por las autoridades ambientales cuando se den situaciones en relación con la concentración y el tiempo de duración de la contaminación atmosférica y las medidas que deben tomar para restablecer el equilibrio alterado (Presidencia Nacional , 2006).
- Se definen los planes de contingencia para la contaminación atmosférica y la clasificación de las áreas-fuentes de contaminación en las zonas urbanas y rurales en el territorio nacional según las características y la cantidad de emisiones y el grado de concentración de contaminantes en el aire (Presidencia Nacional , 2006).

6.2.6 Resolución 601 de 2006 modificada por la 610 de 2010

Por el cual se establece la norma de calidad del aire para el territorio nacional en condiciones de referencias, con el fin de garantizar un ambiente sano y reducir los riesgos en la salud humana como consecuencia de la concentración de contaminantes en el aire (MAVDT, 2010).

Niveles máximos permisibles en el aire para contaminantes criterios (Tabla 1.

- Niveles máximos permisibles para contaminantes criterios.).

Tabla 1.

Niveles máximos permisibles para contaminantes criterios.

Contaminante	Nivel Max Permissible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
PST	100	Anual
	300	24 horas
PM ₁₀	60	Anual
	150	24 horas
PM _{2.5}	25	Anual
	50	24 horas
SO ₂	80	Anual
	250	24 horas
NO ₂	750	3 horas
	100	Anual
	150	24 horas
O ₃	200	1 hora
	80	8 horas
	120	1 hora
CO	10000	8 horas
	40000	1 hora

Fuente: Resolución 610/2010 (MAVDT, 2010).

Cabe resaltar que todas las mediciones de los contaminantes anteriormente mencionados se deben realizar con los procedimientos, frecuencias y metodologías establecidas con el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, adoptado por el Min Ambiente (MAVDT, 2010).

- Niveles de prevención, alerta y emergencia por la contaminación del aire (Tabla 2..

Tabla 2.

Concentración y tiempo de exposición de los contaminantes para niveles de alarma.

Contaminante	Tiempo de exposición (horas)	Estados Excepcionales		
		Prevención ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Alerta ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Emergencia ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
PST	24	375	625	875
PM ₁₀	24	300	400	500
SO ₂	24	500	1000	1600
NO ₂	1	400	800	2000
O ₃	1	350	700	1000
CO	8	17000	34000	46000

Fuente: Resolución 610/2010 (MAVDT, 2010).

Cabe destacar que el Ministerio de Ambiente (MinAmb) deberá hacer todas mediciones a nivel nacional y estas deberán desarrollarse en el marco del Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, elaborado por el IDEAM, en el cual se encuentran las especificaciones generales para la ubicación del SVCA (condiciones meteorológicas, geográficas, actividades económicas, infraestructura del transporte, la población y todos aquellos factores que incidan en la calidad del aire). Si no se ha adoptado el protocolo se deberán seguir los lineamientos establecidos por la EPA- US (MAVDT, 2010).

6.2.7 Resolución 650 de 2010 modificada por la 2154 de 2010

Por el cual se establece el Protocolo para monitoreo y seguimiento de la calidad del aire, donde se establecen las directrices, metodologías y procedimientos necesarios para realizar dicha labor (Presidencia Nacional , 2010).

El protocolo está compuesto por dos manuales:

- Manual de Diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire.

Este manual reúne los lineamientos para tener en cuenta para realizar el diseño y la operación de los SVCA en el país. Contiene las generalidades, los planes de gestión de la calidad del aire, las etapas del diseño, los parámetros de diseño y los criterios para posteriores modificaciones, los recursos necesarios para el montaje, operación y seguimiento del SVCA que se quiere instalar (Presidencia Nacional , 2010).

- Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire.

Este manual reúne los lineamientos para tener en cuenta para realizar la operación de los SVCA en el país. Contiene los tipos de SVCA según su tecnología (manual, automática e híbrida) y los elementos comunes como el programa de control y aseguramiento de la calidad del aire, el análisis de la información generada y la generación de reportes (Presidencia Nacional , 2010).

6.2.8 Resolución 2254 de 2017

Por el cual se adopta la norma de calidad del aire y se dictan otras disposiciones para la gestión del recurso aire en el territorio nacional, con el fin de garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana (MinAmbiente, 2017).

En la Tabla 3.

Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio. se establecen los niveles máximos permisibles para contaminantes criterio que empezaron a regir desde el primero de enero del 2018 (MinAmbiente, 2017).

Tabla 3.

Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio.

Contaminante	Nivel Max Permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
PM ₁₀	50	Anual
	100	24 horas
	25	Anual

PM _{2.5}	50	24 horas
	50	Anual
SO ₂	100	24 horas
	750	3 horas
NO ₂	60	Anual
	150	24 horas
O ₃	200	1 hora
	100	8 horas
CO	5000	8 horas
	35000	1 hora

Fuente: Res. 2254 de 2017 (MinAmbiente, 2017).

7. Metodología

7.1 Descripción del Área de Estudio

Barranquilla está localizada en el vértice nororiental del departamento del Atlántico, sobre la orilla occidental del río Magdalena, a 15 km de su desembocadura en el mar Caribe. Barranquilla se encuentra a una latitud 10° 59' al norte de la línea ecuatorial y una longitud de 74° 47' al occidente de Greenwich, tomando como referencia la plaza de la Paz, punto cero de la ciudad (Alcadía de Barranquilla, 2016).

Barranquilla es una de las ciudades con mayor dinámica de crecimiento en Colombia, ubicada estratégicamente al norte del país, con conexión a mercados internacionales. Es la cuarta ciudad más poblada con gran potencial de oferta de recurso humano de alta calidad, una baja tasa de desempleo y un gran compromiso de los gobiernos locales para mejorar las políticas de desarrollo económico y social; lo cual crea un ambiente propicio para el desarrollo de la ciudad (Alcadía de Barranquilla, 2016).

Soledad está ubicada a 10° 55' de latitud norte y 74° 46' de longitud occidental; como consecuencia, se encuentra en el hemisferio norte y en la zona intertropical. Y con respecto a la

longitud está a cinco horas de diferencia del meridiano de Greenwich. Limita al norte con el Distrito de Barranquilla y al oriente con el Río Magdalena; temperatura promedio de 28 °C, extensión de 67 Km² –que equivale a 1,97% de la extensión total del Departamento del Atlántico- (Alcaldía de Soledad, 2019).

Las ubicaciones de las estaciones de que monitorean el ozono y que se utilizan en este estudio se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

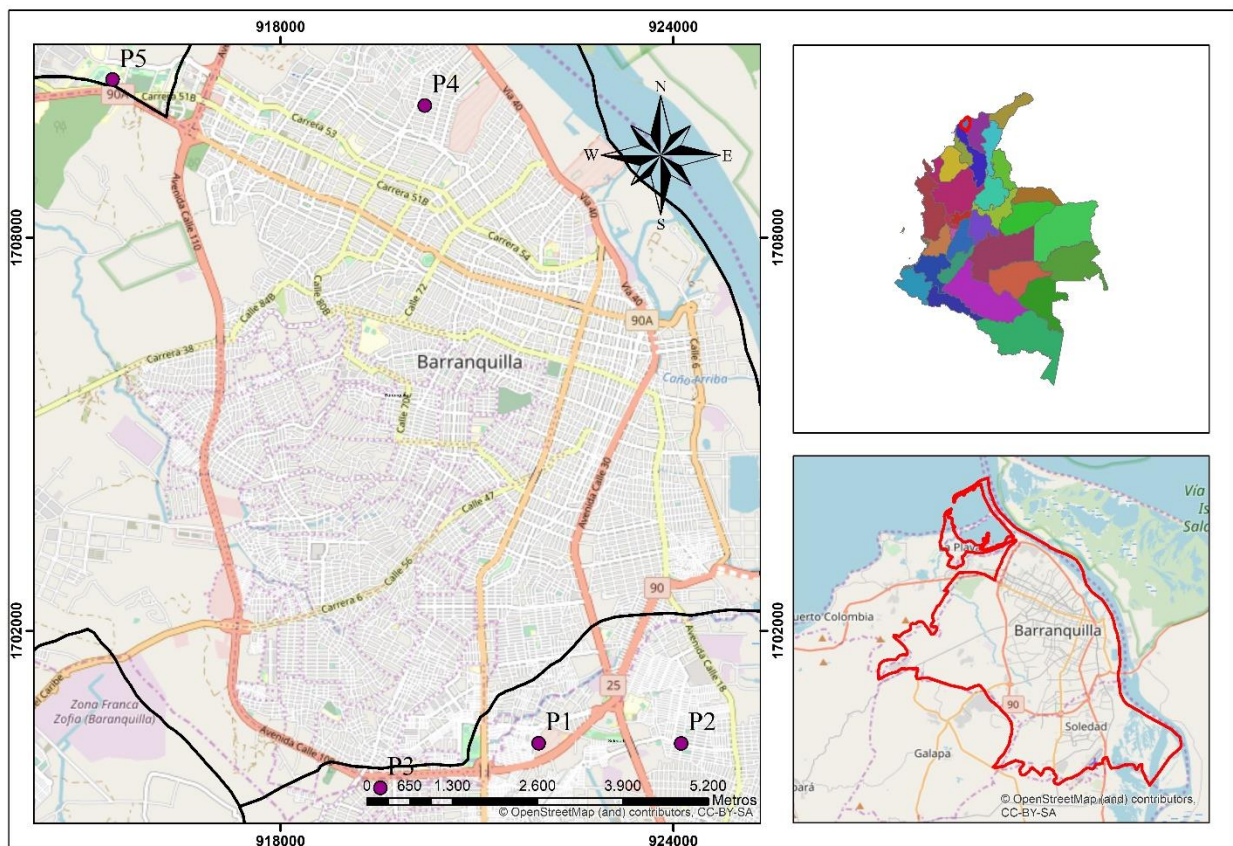


Figura 1. Mapa de Área de Estudio y ubicación de las estaciones de monitoreo. Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.
Coordenadas geográficas de las estaciones de monitoreo.

<i>Estaciones</i>	<i>Coordenadas</i>
Punto 1. Estación Escuela de Policía Antonio Nariño	10°55'38,24" 74°47'29,50"
Punto 2. Estación EDUMAS	10°55'15,92" 74°48'49,02"
Punto 3. Estación CAI Hipódromo	10°55'38,39"

	74°46'17,82"
	11°0'54,77"
Punto 4. Estación Parque 3 Avemarías	74°48'27,60"
	11°1'7,31"
Punto 5. Estación Móvil (Universidad del Norte)	74°51'4,66"

Fuente elaboración propia.

7.2 Fuente de los datos

Los datos utilizados durante la primera etapa del trabajo se obtuvieron de la Red de Calidad de Aire de la Ciudad y Área Metropolitana, que son administradas y operadas por las entidades ambientales correspondientes, Barranquilla Verde y Corporación Autónoma Regional del Atlántico, respectivamente. Los equipos utilizados para la evaluar la calidad de aire por la Corporación Autónoma Regional del Atlántico (CRA) en el Área Metropolitana de Barranquilla, operan bajo la técnica de absorción ultravioleta que se basa, en la absorción de la luz UV a una longitud de onda de 254 nm dicha técnica se fundamenta en la ley de Lambert- Beer, que relaciona la concentración de ozono con la intensidad de la radiación medida (Figura 2. Analizador automático O₃/Thermo Scientific Modelo 49i.(Thermo Fisher Scientific, 2014).



Figura 2. Analizador automático O₃/Thermo Scientific Modelo 49i. Fuente: (Thermo Fisher Scientific, 2014)

Por otra parte, la autoridad ambiental Barranquilla Verde utiliza el equipo de medición O342M Ozone Analyzer (Figura 3), que operan bajo el principio de absorción UV. Este consiste

en la medición de la absorción UV de las moléculas de ozono, y dicha concentración está determinada por la diferencia entre la absorción de UV de la muestra de gas y la muestra sin ozono, después de la filtración realizada por un convertidor catalítico (ENVEA, 2019).



Figura 3. O342M Ozone Analyzer. Fuente: (ENVEA, 2019).

7.3 Validación de datos

Para la validación de datos fue necesario definir una metodología para calificar, rechazar y/o aceptar los datos obtenidos durante el monitoreo; para ello, fue importante entender el comportamiento puntual de cada contaminante durante un día típico, en este caso, el ozono (O_3), el comportamiento de los analizadores y las condiciones meteorológicas locales (MAVDT, 2010).

La validación de datos pasó por un preprocesamiento para la eliminación de errores sistemáticos e informaciones espurias como daños en archivos, caracteres incorrectos y estandarización de los datos. Se tuvieron en cuenta lineamientos propuestos por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) en el Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire. Antes de la validación final de los datos se realizó la adecuada verificación y calibración del equipo para obtener datos precisos.

- Los datos obtenidos de los pasos preliminares a la validación fueron acopiados en una base de datos en Excel y ajustados a los requisitos del Sub-Sistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE) (MAVDT, 2010).

- Una herramienta de gran ayuda en el momento de la validación fue la visualización de los datos atípicos, es decir, aquellos que se encuentran fuera del comportamiento normal del parámetro para un periodo específico.
- Los datos considerados como “atípicos” o que no seguían un “patrón” eran interpolados.
- Si un día no contaba con el 80% de los datos válidos, los datos de ese día eran desconsiderados.
- Las concentraciones por debajo del límite de detección del equipo fueron reemplazadas por el límite de detención del equipo.

7.4 Análisis Estadísticos

Los análisis estadísticos de los datos se realizaron mediante el Software SPSS. Inicialmente se realizó una prueba de normalidad para identificar la naturaleza de los datos (si eran paramétricos o no paramétricos), luego de determinar la naturaleza de los datos se llevaron a cabo los estadísticos descriptivos. Finalmente, se realizaron las correlaciones para identificar la relación que existen entre las variables que serán interpretadas en los resultados.

En la investigación, existe un interés en conocer la asociación entre variables, es por esto que el método de correlación se encarga en determinar este grado de asociación (Guillen *et al.*, 2014); se utilizó el método Spearman, debido a la naturaleza no paramétrica de los datos, para estudiar la correlación entre las concentraciones de ozono troposférico y variables meteorológicas, como temperatura, radiación solar, velocidad del viento y porcentaje de humedad, utilizando el programa estadístico IBM SPSS 22.

7.5 Modelación

Para la modelación de los mapas se trabajó con el método geoestadístico de interpolación *kriging*, este método proporciona, a partir de una muestra de puntos, valores estimados de

aquellos sitios donde no hay información. Los mapas se realizaron con el Software de Información Geográfica -ArcGIS.

8. Resultados y discusión

Para comprender el comportamiento del Ozono (O_3) en Barranquilla y Área Metropolitana durante el periodo de monitoreo (marzo a junio del 2018) en las cinco estaciones del área de estudio se realizó un análisis estadístico descriptivo. Las concentraciones de ozono mínima, máxima y la desviación estándar para cada uno de los puntos evaluados están evidenciadas en la Tabla 5.

Estadísticos

Tabla 5.
Estadísticos descriptivos de las concentraciones de Ozono (O_3).

Estaciones de Monitoreo	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar
Estación Móvil	2376	0,923	69,371	33,004	14,889
Estación Las Tres Avemarías	2494	3,781	61,285	31,792	9,723
Estación Escuela de Policía	2918	0,494	61,600	23,793	13,289
Estación CAI Hipódromo	2921	1,246	48,304	18,694	10,007
Estación Edumas	2491	1,156	27,493	10,088	5,682

Fuente elaboración propia.

Los resultados obtenidos indican que en el sector norte de la ciudad (Estación Móvil y Estación Las Tres Avemarías) presentan una media de O_3 de 33-31 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el período evaluado, una concentración máxima entre 60-70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, correspondiendo los valores más altos a la Estación Móvil seguido de la Estación Las Tres Avemarías, mientras que en las estaciones del Área Metropolitana la media general no supera los 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, las concentraciones máximas si varían entre ellas, donde en la Estación CAI Hipódromo se registra una concentración máxima de 48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y para la Estación Edumas de 27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ siendo la última la estación con los niveles más bajos registrados durante el periodo de monitoreo.

Aunque para la Estación Escuela de Policía el valor máximo es similar a las concentraciones registradas en la Estación Las Tres Avemarías (61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), la media general es más baja en comparación a las estaciones del sector norte, esto se debe a los aumentos o disminuciones del

ozono en horas de la noche. En cuanto a la variabilidad ocurre lo mismo que con la media, en la Estación Móvil la dispersión de los datos con respecto a su media aritmética es mayor, como indican los valores de desviación estándar, y en la Estación Edumas la dispersión de los datos es baja, siendo la estación con menor variabilidad presentando menor desviación estándar, al compararla con las demás estaciones de monitoreo.

8.1 Variación horaria

El comportamiento promedio del Ozono (O_3) y la variación horaria para las estaciones de monitoreo durante el periodo de marzo a junio 2018 se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Las concentraciones observadas denotan un modelo estacional, en el transcurso de las horas del día muestra un perfil clásico de comportamiento, con valores que son bajos en las primeras horas del día y se van intensificando conforme a la intensidad de la radiación solar, presentando un aumento en las concentraciones en horas del mediodía donde se registran las concentraciones más altas.

En todas las estaciones de monitoreo el O_3 presenta el mismo comportamiento, en la Estación Móvil se alcanzan valores entre 44 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo éstas las concentraciones más altas registradas durante el periodo de monitoreo, seguido de las Estaciones Las Tres Ave Marías y Escuela de Policía donde en ambas oscilan valores entre 39 y 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, por su parte, en las Estaciones de Monitoreo del Área Metropolitana de Barranquilla se registran los valores más bajos: en la Estación CAI Hipódromo los valores oscilan entre los 28 y 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que en la Estación Edumas las concentraciones no superan los 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para todas las estaciones, las concentraciones de ozono comienzan a disminuir después de avanzar un pico a las 14:00-15:00 h, esto se debe principalmente a la disminución de la intensidad de los rayos UV a medida que la radiación solar comienza a disminuir. A las 06:00-07:00 h, la

concentración de ozono se encuentra en su nivel más bajo antes de comenzar a aumentar nuevamente. Los valores máximos de O_3 se observaron alrededor del mediodía, donde se registran los valores máximos de radiación solar y temperatura (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, 6), lo cual favorece a los diferentes procesos fotoquímicos de formación del ozono. Lo anterior coincide con estudios realizados en partes del mundo: en la Península Ibérica por (Gallego *et al.*, 2011), en Maracaibo, Venezuela (Cano *et al.*, 2015) y en la ciudad de Manizales, Colombia donde las concentraciones más altas se registran cuando la radiación solar tienen sus picos más altos en horas del mediodía (Cuesta *et al.*, 2018).

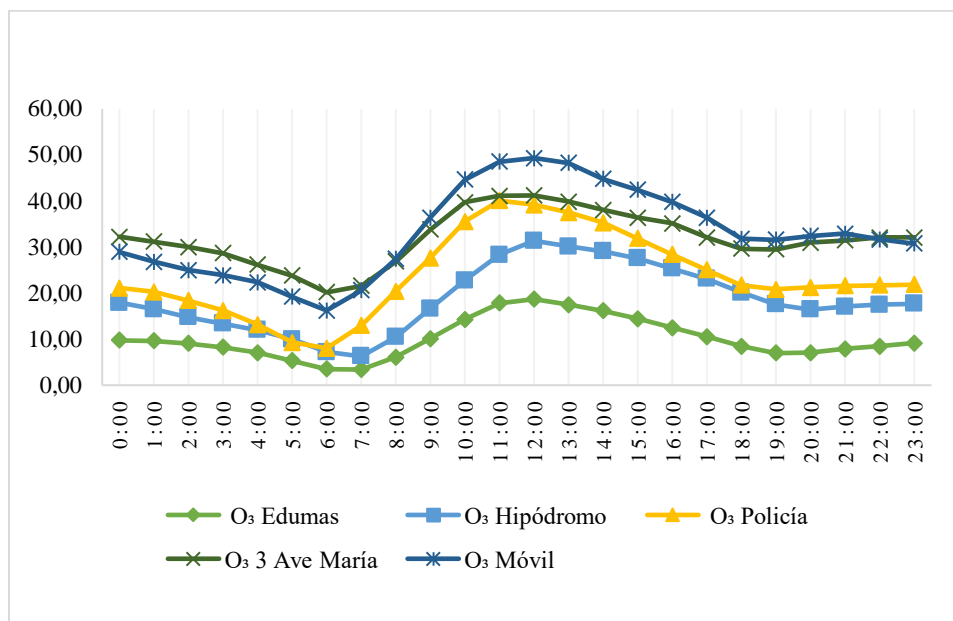


Figura 4. Comportamiento promedio del Ozono, periodo marzo-junio de 2018. Fuente: elaboración propia.

Los niveles elevados de ozono se forman a partir de reacciones fotoquímicas y bajo una serie de condiciones meteorológicas específicas: la intensidad de la radiación solar incidente debe ser alta, ya que es la que inicia las reacciones fotoquímicas (Andame, 2009), en todas las estaciones de monitoreo los niveles altos de ozono se alcanzan en horas del mediodía coincidiendo con los niveles más altos de radiación solar Figura 5. Comportamiento Ozono Vs. Radiación Solar. 5 (a) Estación Edumas. 5(b) Estación CAI Hipódromo. 5 (c) Estación Escuela de Policía. 5 (d) Estación), a excepción de las

estaciones del Área Metropolitana donde las concentraciones se registran una hora después que la radiación solar alcance su pico más alto Figura 5. Comportamiento Ozono Vs. Radiación Solar. 5 (a)

Estación Edumas. 5(b) Estación CAI Hipódromo. 5 (c) Estación Escuela de Policía. 5 (d) Estación.

La temperatura debe ser elevada (superior a los 20°C), lo cual favorece la velocidad de muchas reacciones y aumenta la tasa de emisión por evaporación de muchos compuestos orgánicos volátiles (Andame, 2009), asociándose un aumento de la temperatura con un aumento de la concentración de ozono (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Varios autores afirman que la temperatura es de las variables meteorológicas con mayor influencia sobre los niveles de los contaminantes de origen fotoquímico: López *et al.* (2008) y Ookaa *et al.* (2011) demostraron que existe una relación directa entre la temperatura y el aumento de las tasas de emisión de precursores volátiles del O₃. Fernández *et al.* (2011) indicaron que un aumento en la temperatura implica la disminución del porcentaje de HR lo que favorece la formación del O₃, ya que esta variable participa en diferentes reacciones de destrucción del O₃. La temperatura influye en la velocidad de las reacciones fotoquímicas que conducen a la formación de O₃ superficial a partir de sus precursores (Andame, 2009).

Al igual como se observó para las concentraciones promedio de ozono, en la diferencia de máximos y mínimos (Tabla 6) se nota un gradiente entre las Estaciones Norte (Estación Móvil y Estación Las Tres Avemarías) y en las Estaciones ubicadas al Sur.

Tabla 6.
Diferencia de mínimos y máximos.

		Estación Edumas	Estación CAI Hipódromo	Estación Escuela de Policía	Estación Las Tres Avemarías	Estación Móvil
MARZO	Máx	19,770	36,138	46,481	46,550	58,106
	Min	5,681	7,693	11,028	24,005	25,858
	Δ	12,725	21,915	28,755	35,278	41,982
ABRIL	Máx	21,222	36,449	42,922	47,647	62,216
	Min	2,712	4,837	6,286	17,699	17,127

	Δ	11,967	20,643	24,604	32,673	39,671
	Máx	18,604	33,653	44,043	44,171	51,818
MAYO	Min	2,109	2,636	3,609	11,041	6,925
	Δ	10,356	18,145	23,826	27,606	29,372
	Máx	22,255	33,356	43,067	44,259	47,674
JUNIO	Min	2,149	3,237	4,933	13,326	9,733
	Δ	12,202	18,297	24,000	28,793	28,703

Fuente: elaboración propia.

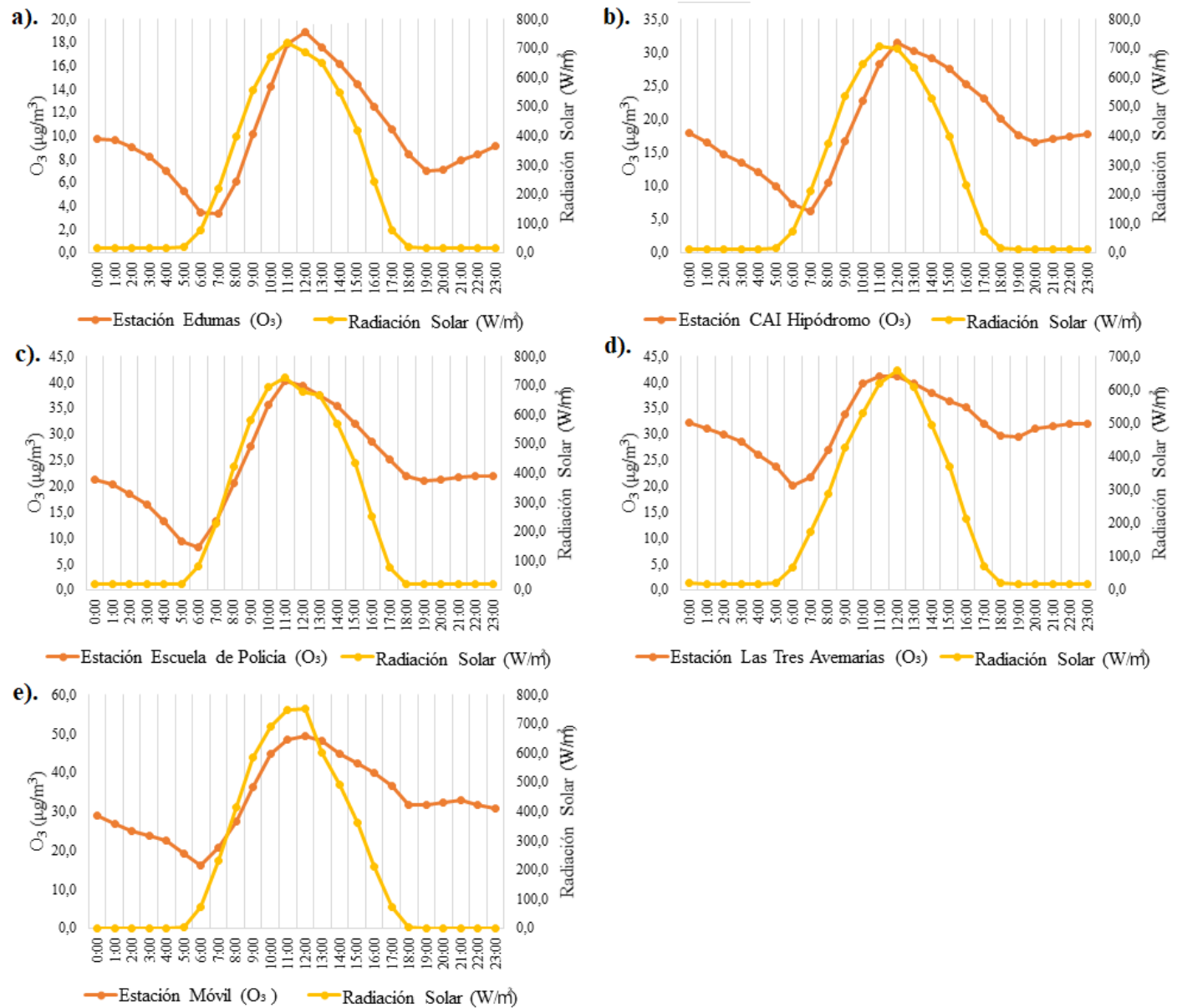


Figura 5. Comportamiento Ozono Vs. Radiación Solar. 5 (a) Estación Edumas. 5 (b) Estación CAI Hipódromo. 5 (c) Estación Escuela de Policía. 5 (d) Estación Las Tres Avemarías. 5 (e) Estación Móvil, periodo marzo-junio de 2018. Fuente: elaboración propia.

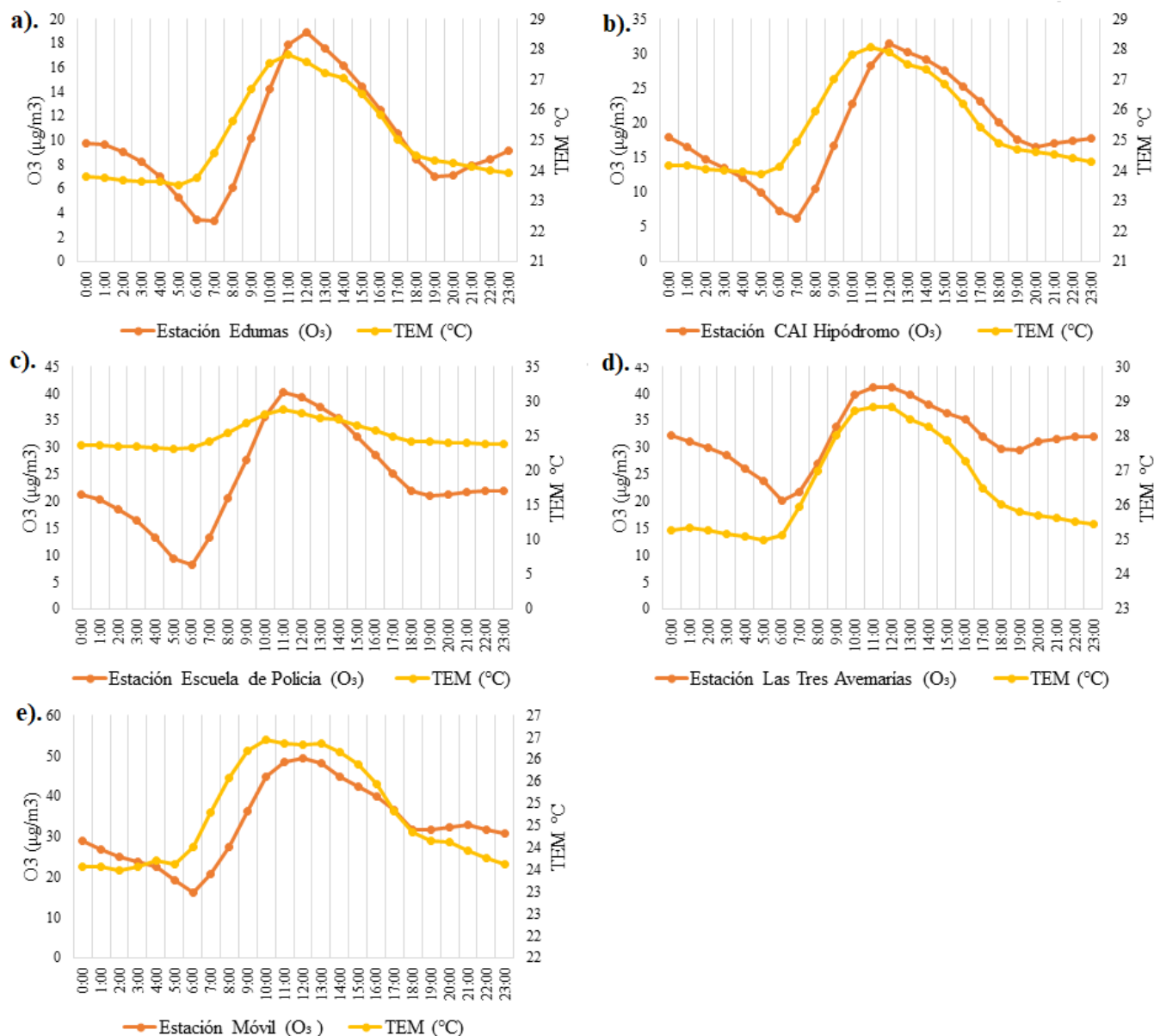


Figura 6. Comportamiento Ozono Vs. Temperatura. 6 (a) Estación Edumas. 6 (b) Estación CAI Hipódromo. 6 (c) Estación Escuela de Policía. 6 (d) Estación Las Tres Avemarías. 6 (e) Estación Móvil, periodo marzo-junio de 2018. Fuente: elaboración propia.

En la Table 7 se presenta una comparación entre las concentraciones de Ozono de este estudio con los valores de otras zonas del mundo y Colombia. Wang *et al.*, (2019) evaluaron la calidad del aire en las principales ciudades de China, el comportamiento de ozono es similar al de este estudio, donde las concentraciones más altas son registradas con el incremento de la

radiación solar. Sin embargo, las concentraciones que se registran para las ciudades estudiadas son superiores a las que se registran en esta investigación (Tabla 7) (Wang *et al.*, 2019).

En ciudades costeras como Maracaibo (Venezuela), Boston (Estados Unidos) las concentraciones son hasta 2 veces mayores que las registradas en este estudio, donde la evolución de los niveles de O₃ a lo largo del día dependen de tres factores principales: la topografía de la zona, las condiciones meteorológicas y las emisiones directas (Tong *et al.*, 2011).

En el Valle de Aburrá (Bedoya & Martínez, 2009) estudiaron la Calidad del Aire, donde las concentraciones de Ozono en el transcurso del día presenta un perfil clásico de comportamiento, con valores que son bajos en las primeras horas del día y que de una manera acentuada se elevan, presentando así, sus concentraciones más altas en horas del mediodía donde la radiación solar es mayor. Sin embargo, los promedios de O₃ reportados son más altos que los encontrados en este trabajo (Tabla 7) (Bedoya & Martínez, 2009).

En Bogotá, Gaitán & Behrentz (2009) evaluaron el estado de la Calidad del Aire donde las concentraciones que se registran son inferiores a las de este estudio (Tabla 7). En Manizales Cuesta *et al.*, (2018) reportaron que los niveles de radiación solar son cercanos a los presentados en Barranquilla y Área Metropolitana (116 W/m²), y las concentraciones que se registran son similares a las de este estudio (Tabla 7). Similar a lo reportado en Manizales, en Cartagena las concentraciones altas de O₃ se registran en horas del mediodía donde se presentan los niveles más altos de radiación solar (Sánchez *et al.*, 2013).

Tabla 7.

Concentraciones registradas en diferentes lugares de Colombia y el mundo.

Ciudad	Periodo	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Referencia
Barranquilla, Colombia	4 meses	35	Presente estudio
Valle de Aburrá, Colombia	2001-2007	94	Bedoya & Martínez, 2009
Bogotá D.C, Colombia	2008	< 15	Gaitán & Behrentz, 2009
Manizales, Colombia	2015-2016	34.2	Cuesta <i>et al.</i> , 2018
Cartagena, Colombia	2010-2011	34	Sánchez <i>et al.</i> , 2013
Maracaibo, Venezuela	2009	101	Cano <i>et al.</i> , 2015
Beijing, China	2017	95	Wang <i>et al.</i> , 2019
Shanghái, China	2017	101	Wang <i>et al.</i> , 2019
Guangzhou, China	2017	82	Wang <i>et al.</i> , 2019
Boston, Estados Unidos	2002-2010	172	Kang <i>et al.</i> , 2014

Fuente: elaboración propia.

8.2 Influencia de las variables meteorológicas

Como se observa en la Tabla 8 la radiación solar para todas las estaciones presentan una correlación significativa, lo cual es congruente con lo esperado, por ser un contaminante fotoquímico la radiación solar favorece a la formación de este contaminante (Taylan, 2016). Además, en horas de la tarde las concentraciones de ozono disminuyen, debido a la disminución de la intensidad de la radiación solar. La temperatura, al igual que la radiación solar presenta una correlación significativa, es una variable que influye de forma directa en las reacciones fotoquímicas, pues a mayor temperatura mayor es la velocidad de reacción, y por tanto, mayor será la formación de ozono (Andame, 2009). Por su parte, con la humedad relativa se observa que existe una correlación inversa significativa, la relación entre el ozono y la humedad relativa es inversa a la existente con la temperatura, ya que en ambientes secos y de temperaturas elevadas son las variables más favorables para la formación de ozono. Con altos porcentaje de humedad relativa se eliminan especies oxidantes que son solubles en agua, que hubieran contribuido en los mecanismos fotoquímicos de formación de ozono (Andame, 2009).

Tabla 8.
Correlaciones (O₃ VS. Variables Meteorológicas)

Estaciones	WS (m/s)	TEM (°C)	HUM (%)	RS (W/m ²)
Estación Edumas	0,565**	0,199**	-0,626**	0,459**
Estación CAI Hipódromo	0,559**	0,180**	-0,542**	0,369**
Estación Escuela de Policía	0,573**	0,658**	-0,474**	0,405**
Estación Las 3 Avemarías	0,399**	0,364**	-0,582**	0,365**
Estación Móvil	0,475**	0,378**	-0,734**	0,333**

** La correlación es significativa en el nivel 0,01.

Fuente: IBM SPSS 22.

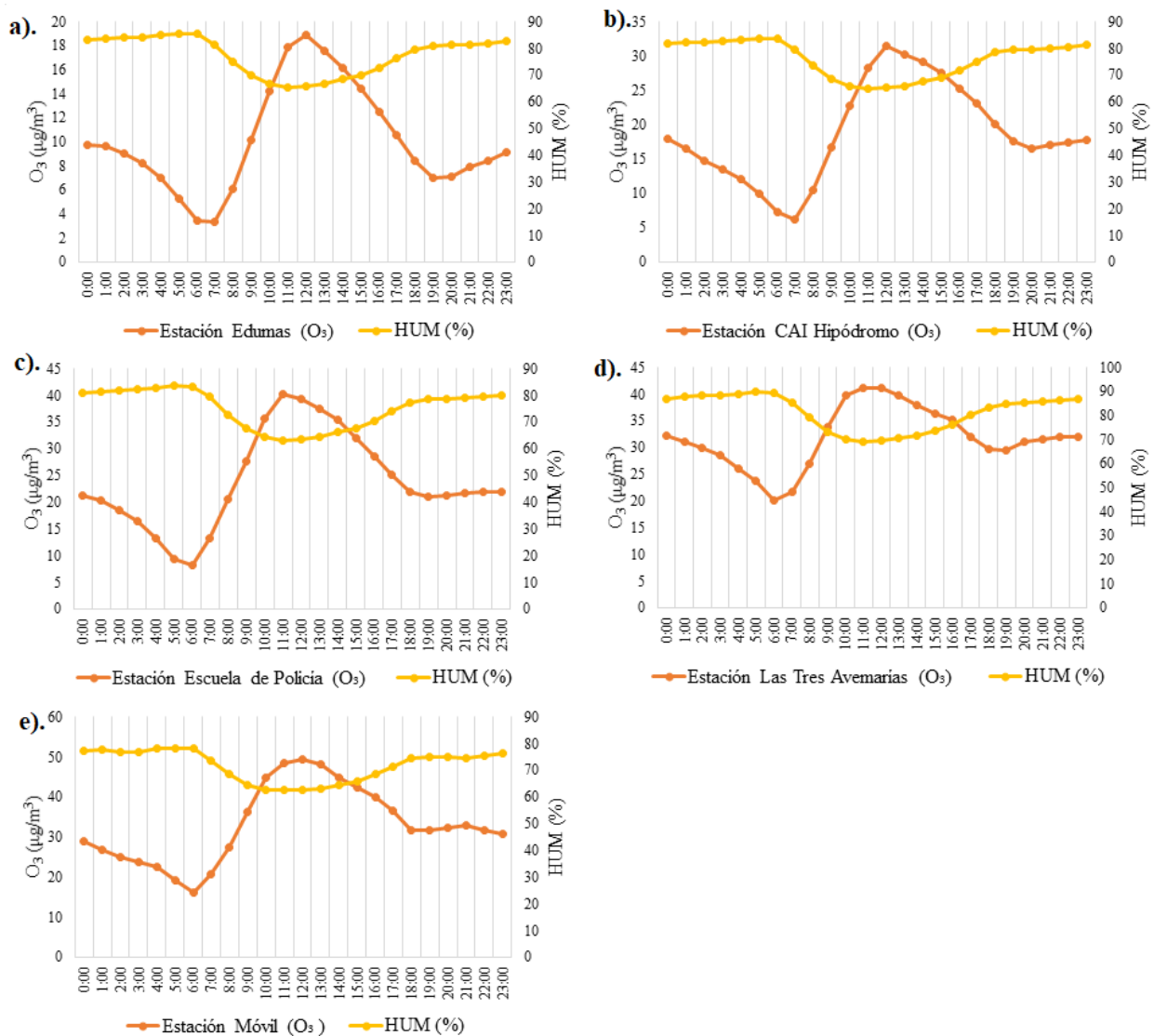


Figura 7. Comportamiento del Ozono Vs. Porcentaje de Humedad Relativa. 7 (a) Estación Edumas. 7 (b) Estación CAI Hipódromo. 7 (c) Estación Escuela de Policía. 7 (d) Estación Las Tres Avemarías. 7 (e) Estación Móvil, periodo marzo-junio de 2018. Fuente: elaboración propia.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el comportamiento del ozono con relación al porcentaje de humedad relativa, y como las concentraciones de ozono aumentan cuando el porcentaje de humedad disminuye, un comportamiento similar fue observado por Blanchard *et al.*, (2010), Cano *et al.*, (2015) y Tong *et al.*, (2011).

Por otro lado, es importante el análisis de los vientos, que están relacionados con la dinámica horizontal atmosférica, elementos de gran importancia en la dispersión de contaminantes, en función de sus características: dirección, velocidad y turbulencia. La dirección indica la zona hacia la que se puede desplazar los contaminantes; la velocidad del viento es un factor determinante, los vientos con velocidades fuertes causan la dilución de contaminantes, mientras que vientos débiles favorecen a la acumulación de éstos, aumentando la posibilidad de que ocurran reacciones fotoquímicas y formación de ozono, mientras que la turbulencia provoca una acumulación de contaminantes (Andame, 2009). La presencia de núcleos urbanos influye en el movimiento de las masas de aire, disminuyendo o frenando su velocidad y formando turbulencias. Además, surge el efecto denominado isla de calor, haciendo que la temperatura al

interior de la ciudad sea más alta que en su periferia por el calor producido por la combustión interna de los automóviles; favoreciendo a la aparición de las brisas urbanas (Concepción, 2016).

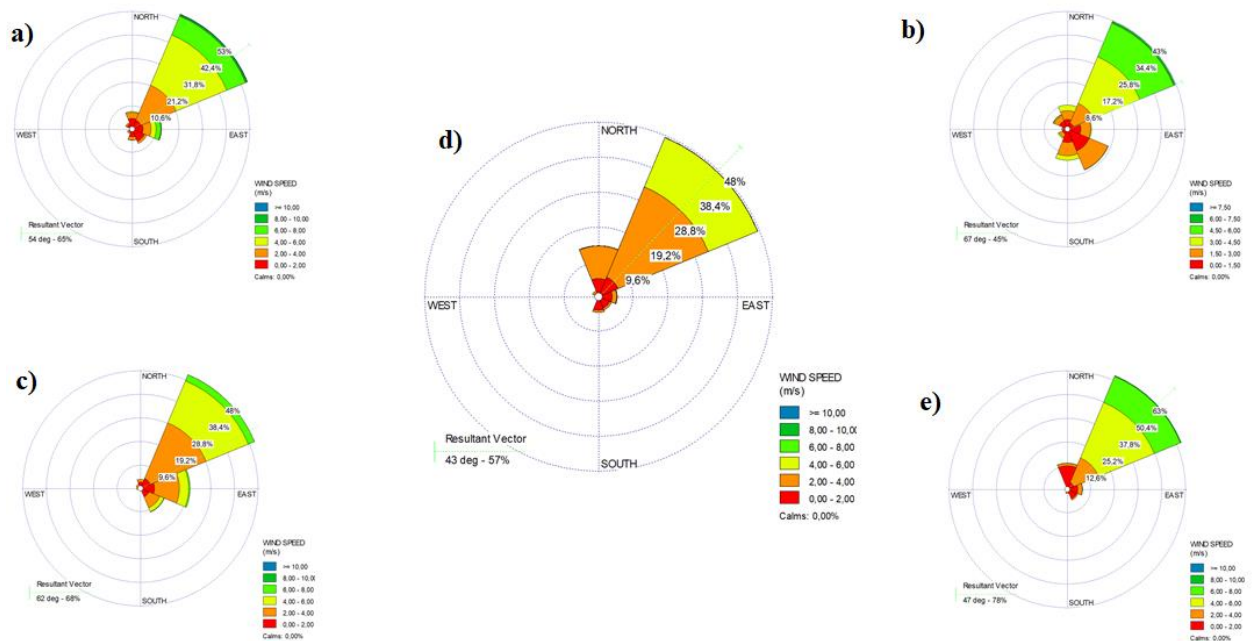


Figura 8. Rosa de los Vientos para cada una de las Estaciones. (a) Estación Edumas. Figura 8 (b) Estación CAI Hipódromo. 8 (c) Estación Escuela de Policía. 8 (d) Estación Las Tres Avemarías. 8 (e) Estación Móvil. Periodo marzo-junio de 2018

Para todas las estaciones de monitoreo la dirección del viento procedía del noreste (NE) (Figura 8. Rosa de los Vientos para cada una de las Estaciones. (a) Estación Edumas. Figura 8 (b) Estación CAI Hipódromo. 8 (c) Estación Escuela de Policía. 8 (d) Estación Las Tres Avemarías. 8 (e) Estación Móvil. Periodo marzo-junio de 2018 con velocidades promedio de 3.1 m/s y velocidades máximas que no exceden los 9.0 m/s, presentando una correlación significativa.

8.3 Variación Espacio-Temporal del Ozono

Se obtuvieron promedios mensuales de ozono para el periodo de estudio en cada estación de monitoreo. Las concentraciones mensuales de ozono muestran un comportamiento claro, con valores mínimos en mayo y junio y máximos en marzo y abril (**Error! No se encuentra el**

origen de la referencia.). Se infiere que debido a la **poca nubosidad** en esta época del año se registraron altas concentraciones de Ozono, donde la radiación solar es mayor, contribuyendo a la formación del ozono. Por otro lado, las concentraciones medias mensuales más bajas corresponden a los meses **con mayor nubosidad** en la ciudad de Barranquilla (CIOH, 2012).

Durante el tiempo de muestreo, las concentraciones más altas fueron registradas en las estaciones ubicadas en el norte de Barranquilla (Estación Móvil y Estación Las Tres Avemarías) probablemente a la ubicación geográfica de las estaciones, y a un balance entre la producción y la destrucción en cada lugar. Así como al transporte entre las regiones de producción neta a otras de destrucción neta; el transporte está determinado por los vientos variables donde se originan importantes fluctuaciones diarias y fuertes variaciones estacionales (Ooka *et al.*, 2011).

La estación Móvil y las Tres Avemarías por su ubicación geográfica tienen la presencia de la brisa marina que favorece la recirculación de los contaminantes durante varios días, lo que se traduce en un incremento paulatino de las concentraciones de ozono (Mantilla *et al.*, 2015). A su vez, las brisas marinas durante el día desplazan los contaminantes hacia el interior. Durante la noche, en cambio, al invertirse la circulación de las mismas, la contaminación se desplaza hacia el mar, en un movimiento cíclico que se repite cada día (Concepción, 2016), es por ello, que en el sector norte de la ciudad por su cercanía al mar, en horas de la noche se registran concentraciones “altas” de ozono, producto de la circulación de las brisas marinas.

En zonas costeras como Barranquilla los contaminantes emitidos están sometidos a procesos recirculatorios, generándose en consecuencia una gran actividad fotoquímica de dichos compuestos cuando se encuentran en un régimen de flujo y reflujo. La recirculación de contaminantes ocurre de dos formas: vertical y horizontal. El aire contaminado puede seguir una trayectoria circular o elíptica, siendo inicialmente transportado tierra adentro con la brisa de mar,

lanzado hacia arriba por las corrientes de aire ascendentes en el frente de brisa, y volviendo posteriormente hacia el mar con el flujo de retorno de niveles superiores, lo que representaría la recirculación vertical. La oscilación horizontal ocurre cuando el aire contaminado es arrastrado tierra adentro con la brisa marina durante el día, y retorna por la noche hacia el mar con la brisa de tierra (Andame, 2009).

Durante el día los máximos de ozono se dan a partir del mediodía, cuando la radiación es alta, y por la noche no hay formación fotoquímica de ozono, y por el contrario se destruye al reaccionar con otros compuestos emitidos. Sin embargo, si no existen grandes concentraciones de otras sustancias, las concentraciones de ozono pueden permanecer relativamente altas en las horas nocturnas (Mantilla *et al.*, 2015).

Durante la noche las concentraciones de ozono aumenta, ocasionando un máximo secundario, en su ciclo promedio mensual (Figura 9. Variación temporal del Ozono (O₃). Periodo marzo-junio de 2018) se puede observar como las concetraciones de ozono se van incrementando a partir de las 18 horas. Andame (2009) refiere a que generalmente estos incementos están asoaciados con cambios en la dirección o velocidad del viento, y con situaciones de **brisa marina**, el cual causa que la masa de aire se homogeneice y por ellos ascienden las concentraciones de ozono. Otra posible explicación sería el transporte regional de ozono, es decir, la llegada de masas de aire enriquecidas en ozono, las cuales evitarían el típico descenso nocturno llegando incluso a invertir la tendencia decreciente (Andame, 2009).

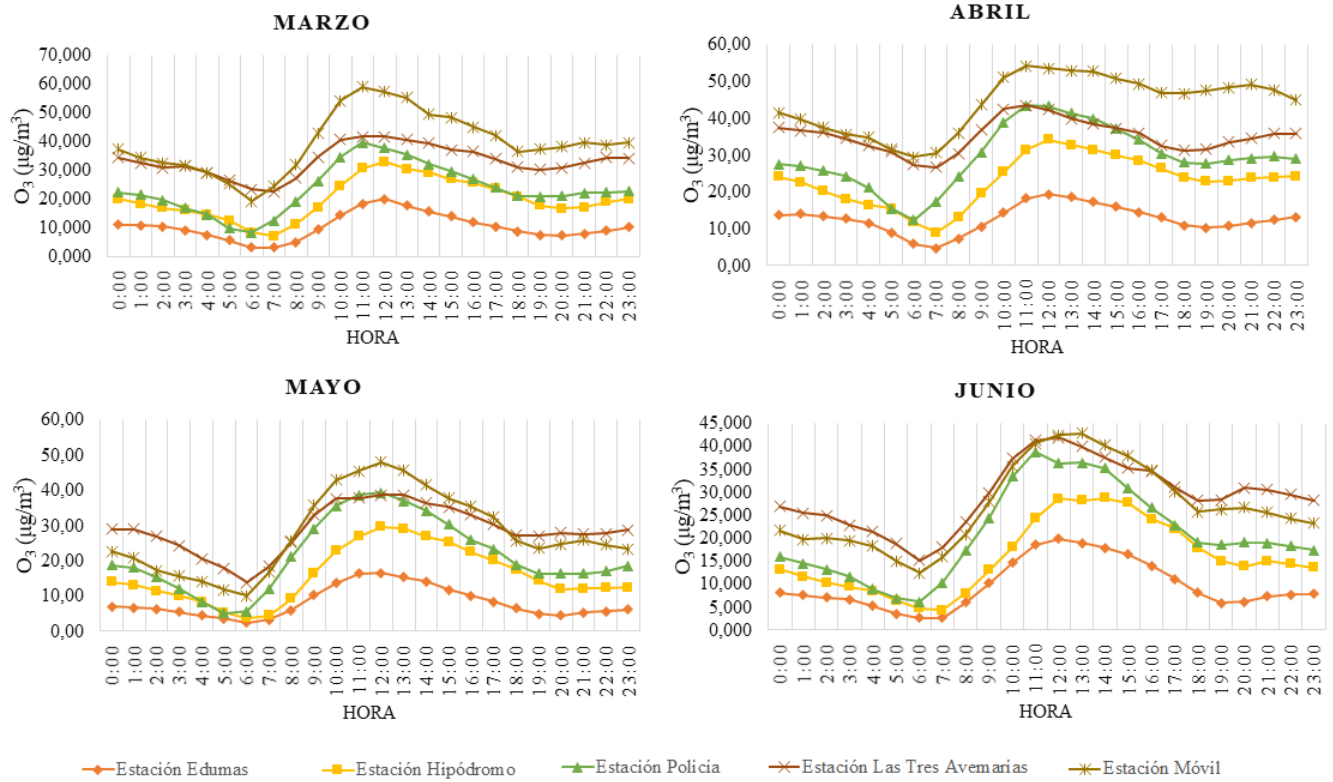


Figura 9. Variación temporal del Ozono (O₃). Periodo marzo-junio de 2018. Fuente: elaboración propia.

9. Conclusiones

De acuerdo con los objetivos planteados para el desarrollo de la investigación, se analizó el ciclo diurno de Ozono (O_3) donde se registraron valores mínimos a tempranas horas de la mañana, a partir de las 8 am se observa un incremento con valores máximos alrededor del mediodía y disminuyen nuevamente en horas de la tarde debido a los diferentes procesos fotoquímicos de producción-destrucción.

Las concentraciones más altas de Ozono se registraron en las estaciones ubicadas al norte de la ciudad (Estación Las Tres Avemarías y Estación Móvil) con concentraciones máximas de entre $60-70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en las estaciones del Área Metropolitana la media general no supera los $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones máximas si varían entre ellas, en la Estación CAI Hipódromo la concentración máxima es de $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y para la Estación Edumas de $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ siendo la estación con los niveles más bajos registrados durante el periodo de monitoreo. Y en la Estación Escuela de Policía se registró una concentración máxima de $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pero con una media general de $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ debido a los aumentos o disminuciones nocturnas en el ozono.

Con relación a las concentraciones ozono y las variables meteorológicas se puede decir que la radiación solar y la temperatura favorecen a las reacciones fotoquímicas que conducen a la formación del O_3 . Mientras que el porcentaje de humedad relativa participa en las reacciones de destrucción del Ozono, cuanto mayor sea el porcentaje de humedad relativa menor será la concentración de O_3 y viceversa. Se observó un ciclo estacional en las concentraciones de O_3 donde en los meses de marzo y abril (época seca) se registran mayores de niveles de concentración y mínimos en mayo y junio (época lluviosa o con mayor nubosidad).

El ozono alcanza concentraciones altas en las horas donde la radiación solar y la temperatura alcanzan sus niveles más altos. Cuando las temperaturas son altas, la radiación solar es fuerte y

los vientos son débiles, el ozono puede aumentar a niveles nocivos para la salud. Los niveles más altos de ozono se dan a cierta distancia de los principales focos de contaminación. No se dan en las zonas céntricas urbanas, como en el sur de la ciudad y en el Área Metropolitana de la misma, que son unas de las zonas donde más contaminación se produce, sino que los niveles más elevados se detectan en la zona norte.

En horas de la noche, la concentración de ozono presenta concentraciones altas que no son producidas por procesos fotoquímicos, entre las 8:00 y 9:00 de la noche. Este pico no es evidente en datos estudios similares al nuestro. Los resultados obtenidos sugieren que la concentración de ozono observada durante la noche es producto de la generación de ozono durante el régimen diurno del día el cual sería transportado hacia las partes altas de la ciudad por situaciones de **brisa marina**, el cual causa que la masa de aire se homogeneice y por ellos ascienden las concentraciones de ozono. Aunque si no existen grandes concentraciones de otras sustancias, las concentraciones de ozono pueden permanecer relativamente altas en las horas nocturnas.

El análisis de los niveles de ozono troposférico en Barranquilla y Área Metropolitana ha permitido caracterizar diferentes comportamientos según la localización de las estaciones, con la identificación de tipo de transporte que se traducen también en variación espaciotemporal de las concentraciones de ozono, dependientes de la posición respecto a las fuentes de emisión, y del tipo de entorno de cada emplazamiento.

En términos generales de la Red de Vigilancia de Calidad de Aire, es decir, el número y la distribución de estaciones, no es buena, y no proporcionan una buena herramienta para la evaluación de la calidad de aire. Y en relación con la vigilancia del ozono se han detectado algunas carencias, con la posibilidad de mejorar tanto la distribución de emplazamientos de medida, como la delimitación de las zonas en algunas partes de la ciudad.

10. Recomendaciones

Se quería en un principio trabajar con todos los datos del 2018, pero la Autoridad Ambiental del Área Metropolitana (CRA) solo nos suministró los datos hasta el mes de junio del 2018 de las Estaciones Edumas y CAI Hipódromo. Además, el monitoreo de las estaciones operadas por la CRA no está registrando la información de manera continua, y para el desarrollo de investigaciones y diagnósticos de calidad de aire, tener una base de datos completa es fundamental.

Para la Estación Escuela de Policía los meses de enero y febrero fueron invalidados por presentar inconsistencia en los datos y no contar con el 80% de los datos validados. La Estación Móvil inició el monitoreo en la Universidad del Norte a partir del mes de marzo por lo que solo se trabajó con los meses de marzo hasta junio del año 2018. Es recomendable en la validación de los datos analizar muy bien para no descartar información que pueda ser relevante para los análisis.

Para la modelación en ArcGIS es recomendable trabajar con el modelo de interpolación IDW (Inverse Distance Weighting) para obtener mejores resultados, pero para ello, se necesitan más de 12 puntos de monitoreo y en el presente estudio solo se contaba con 5 puntos, por lo que se trabajó con el modelo de interpolación Kriging.

Para futuras investigaciones en Barranquilla y Área Metropolitana las autoridades ambientales deben realizar mejoras en la parte metodológica, selección de otros puntos de monitoreo para así tener una modelación más completa para la dispersión del contaminante en el área de estudio. A su vez, es fundamental seguir analizando el comportamiento del ozono para evaluar si las concentraciones de ozono están generando impactos para la salud y el medio ambiente. Si a lo largo de los años las concentraciones están aumentando o disminuyendo.

Referencias

- Alcadía de Barranquilla. (2016). *Plan de Desarrollo 2016-2019*. Barranquilla.
- Alcadía de Soledad. (2019). *Plan de Desarrollo 2016-2019*. Soledad.
- Andame, J. A. (2009). *Caracterización y comportamiento del ozono superficial en la provincia de Huelva*. Huelva.
- Armijos, F., & Jerves, R. (2016). *ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA RED DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE DE LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR*. Ecuador.
- Bedoya, J., & Martínez, E. (2009). *CALIDAD DEL AIRE EN EL VALLE DE ABURRÁ ANTIOQUIA - COLOMBIA*. Medellín, Antioquia: Scielo.
- Bermejo, V., Alonso, R., Cozar, S., Rábago, I., & García, M. (2012). *El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación*. Universidad de Navarra: CIEMAT, Unidad de Contaminación Atmosférica.
- Cano, Y., Morales, J., Sánchez, L., Colina, M., & Torres, J. (2015). *EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE OZONO EN LA CIUDAD DE MARACAIBO, ESTADO DE ZULIA, VENEZUELA*. Zulia, Venezuela.
- CIOH. (2012). *Climatología Del Caribe*. Barranquilla: Oceanografía Operacional.
- Concepción, L. (2016). *Evolución temporal de concentración de ozono en la troposfera*. Lima, Perú.
- CONPES. (2018). *Política para el mejoramiento de la calidad del aire*. Obtenido de <http://www.andi.com.co/Uploads/CONPES%203943%20Calidad%20del%20Aire.pdf>
- DNP. (2018). *CONPES de calidad del aire contribuirá a mejorar la salud y el ambiente de los colombianos*. Departamento Nacional de Planeación. Obtenido de

<https://www.dnp.gov.co/Paginas/CONPES-de-calidad-del-aire-contribuir%C3%A1-a-mejorar-la-salud-y-el-ambiente-de-los-colombianos.aspx>

Cuesta-Mosquera, A. P., González-Duque, C. M., Velasco-García, M., & Aristizábal, B. H.

(2018). Distribución Espacial De Concentraciones De SO_2 , NO_x Y O_3 En El Aire

Ambiente De Manizales. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 34(3), 489–

504. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.03.11>

El Espectador. (Febrero de 16 de 2019). Calidad del aire: un asunto de vida o muerte. *El*

Espectador .

ENVEA. (2019). *O342M. OZONE ANALYZER*. Obtenido de [http://www.environnement-](http://www.environnement-sa.com/products-page/en/o342m-ozone-analyzer/)

[sa.com/products-page/en/o342m-ozone-analyzer/](http://www.environnement-sa.com/products-page/en/o342m-ozone-analyzer/)

EPA. (2013). *Integrated Science Assessment for Ozone and Related Photochemical Oxidants*.

Washington, D.C: Environmental Protection Agency.

Fonseca, M. (2012). ESTUDIO DEL IMPACTO EN LA CALIDAD DEL AIRE DE LAS

FUENTES PUNTUALES EN LA CIUDAD DE PINAR DEL RIO. *Scielo*.

García-Lara, C., Aguilar, H. N., Camas-Anzueto, J., & Mendoza-Vazquez, S. (2013). Medición

remota de ozono en tuxtla gutiérrez, chiapas, méxico, utilizando la técnica doas. *Revista*

Cubana de Fisica, 30(2), 99–102.

Gaitán, M., & Behrentz, E. (2009). *Evaluación del estado de la Calidad del Aire en Bogotá*.

Bogotá D.C, Colombia.

Gallego, M., García, J., Acero, J., & Fernández, M. (2011). *A study of surface ozone variability*

over the Iberian Peninsula during the last fifty years . Badajoz, España: Elsevier.

Guillen, O., Badii, M., Aguilar, J., & Lugo, A. (2014). *Correlación No-Paramétrica y su*

Aplicación en la Investigaciones Científica . México .

IDEAM . (7 de Junio de 2005). *Universidad del Cesar*. Obtenido de

http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/leyes/2a-ley_0023_1973.pdf

IDEAM. (2011). *Guía práctica para la validación de datos en los Sistemas de Vigilancia de*

Calidad del Aire - SVCA existentes en Colombia . Bogotá: Insituto de Hidrología,

Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM. (2012). *Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010*. Bogotá D.C.: IDEAM.

IDEAM. (2017). *Informe Del Estado De La Calidad Del Aire En Colombia*. Obtenido de

<http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/informes-del-estado-de-la-calidad-del-aire-en-colombia>

Londoño, J., Correa , M., & Palacio, C. (2011). *Estimación de las Emisiones de Contaminantes Atmosféricos Provenientes de fuentes móviles en el Área Urbana de Envigado, Colombia*.

Medellín, Colombia: Revista EIA, Escuela de Ingeniería de Antioquia .

López, N. (2017). *Efecto del fenómeno de El Niño en la concentración de ozono troposférico en Santiago de Chile*. Valparaíso.

Mantilla, E., Castell, N., Salvador, R., Azorín , C., Millán , M., Miró, J., & Juan , L. (2013).

OZONO TROPOSFÉRICO Y CALIDAD DEL AIRE. Valencia: CEAM.

Masiol, M., Squizzato, S., Chalupa, D., Rich, D., & Hopke, P. (10 de Noviembre de 2018).

Spatial-temporal variations of summertime ozone concentrations across a metropolitan area using a network of low-cost monitors to develop 24 hourly land-use regression

models. *Science Direct*, 12. Obtenido de [https://pdf.sciencedirectassets.com/271800/1-](https://pdf.sciencedirectassets.com/271800/1-s2.0-S0048969718X0028X/1-s2.0-S0048969718344668/main.pdf?x-amz-security-token=AgoJb3JpZ2luX2VjEIP%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVz)

[s2.0-S0048969718X0028X/1-s2.0-S0048969718344668/main.pdf?x-amz-security-](https://pdf.sciencedirectassets.com/271800/1-s2.0-S0048969718X0028X/1-s2.0-S0048969718344668/main.pdf?x-amz-security-token=AgoJb3JpZ2luX2VjEIP%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVz)

[token=AgoJb3JpZ2luX2VjEIP%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVz](https://pdf.sciencedirectassets.com/271800/1-s2.0-S0048969718X0028X/1-s2.0-S0048969718344668/main.pdf?x-amz-security-token=AgoJb3JpZ2luX2VjEIP%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVz)

LWVhc3QtMSJIMEYCIQDyU%2F5vtGfr0s8LuouqAYoMnQkRsWgRRUGktWUXtwe
OQAIhALMCVN8Pnn

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Norma de Calidad del Aire o Nivel de inmisión- Resolución 610 (24 de marzo de 2010)., (610), 1–8.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.03.011>

MAVDT. (2010). *Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire*. Bogotá.

MinAmbiente . (2015). *Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Bogotá: DECRETO 1076 DE 2015.

MinAmbiente. (2012). *Colombia: Strengthening Environmental and Natural Resources Institutions*. Latin America and the Caribbean Region, Colombia and Mexico Country Management Unit. Bogotá: Sustainable Development Department. Obtenido de http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/contaminacion_atmosferica/Colombia_Strengthening_Environmental_and_Natural_Resources_Institutions.pdf

MinAmbiente. (2017). *Resolución 2254 de 2017*. Bogotá, Colombia: Ministerio de de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire*. Bogotá D.C., Colombia.

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*. Organización Mundial de la Salud. Obtenido de

https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf?sequence=1

OMS. (2006). *Organizacion Mundial de la Salud* . Obtenido de

http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69478/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf

OMS. (2017). *Organizacion Mundial de la Salud* . Obtenido de

<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>

Ooka, R., Khiem, M., Hayami, H., Yoshikado, H., Huang, H., & Kawamoto, Y. (2011).

Influence of meteorological conditions on summer ozone levels in the central Kanto area of Japan . Japón: ScienceDirect.

Paulsen, R., Sale, O., & Morris , G. (2018). Evaluation of El Niño-Southern Oscillation influence on 30 years of tropospheric ozone concentrations in Houston. *Science Direct*.

Pizarro, R. (2017). *CARACTERIZACIÓN DE AEROSOLES POR SENSADO REMOTO Y MEDICIÓN IN SITU EN BOGOTÁ - CASERIBO*. Bogotá.

Presidencia Nacional . (19 de Diciembre de 1973). *Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible* . Obtenido de

http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/leyes/2a-ley_0023_1973.pdf

Presidencia Nacional . (24 de Enero de 1979). *Alcaldia de Bogota* . Obtenido de

<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1177>

Presidencia Nacional . (3 de Abril de 2006). *Alcaldia de Bogota* . Obtenido de

<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=19973>

Presidencia Nacional . (29 de Marzo de 2010). *Alcaldia de Bogota* . Obtenido de

<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=39331>

Presidencia Nacional . (Noviembre de 2010). *ARL Sura* . Obtenido de

https://www.arlsura.com/images/stories/documentos/res2154_2010.pdf

Presidencia Nacional . (24 de Marzo de 2010). *Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible* . Obtenido de

[http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/bf-](http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/bf-Resoluci%C3%B3n%20610%20de%202010%20-%20Calidad%20del%20Aire.pdf)

[Resoluci%C3%B3n%20610%20de%202010%20-%20Calidad%20del%20Aire.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/bf-Resoluci%C3%B3n%20610%20de%202010%20-%20Calidad%20del%20Aire.pdf)

Presidencia Nacional. (18 de Diciembre de 1974). *Alcaldia de Bogota*. Obtenido de

<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1551>

Presidencia Nacional. (5 de Junio de 1995). *Alcaldia de Bogota* . Obtenido de

<http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=1479>

Rojas, N. (2018). *CARACTERÍSTICAS DE LA DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA EN AIRE AMBIENTE DE ÁREAS URBANAS EN COLOMBIA*. Bogotá.

Sánchez, J., Urrego, J., Zakzuk, J., Bornacelly, A., Castro, I., & Caraballo, L. (2013). *Niveles de Contaminantes en el aire de Cartagena, Colombia*. Cartagena: Revista de la Universidad Industrial de Santander. .

Sánchez, S., & Green, J. (2013). *La Calidad del Aire en América Latina: Una Visión Panorámica*. Washington D.C: Clean Air Institute.

Schneider, P., Castell, N., Vogt, M., Dauge, F., Lahoz, W., & Bartonova, A. (2017). *Mapping urban air quality in near real-time using observations from low- cost sensors and model information*. Environment International.

Taylan, O. (2016). Modelling and analysis of ozone concentration by artificial intelligent techniques for estimating air quality. *Science Direct*.

- Tohid, L., Sabeti, Z., Sarbakhsh, P., Benis, K., Shakerkhatibi, M., Rasoulzadeh, Y., . . . Darvishali, S. (22 de Octubre de 2018). Spatiotemporal variation, ozone formation potential and health risk assessment of ambient air VOCs in an industrialized city in Iran. *Science Direct*, 8.
- Tolba, M. (1992). *Salvemos el Planeta* (Vol. Primera edición). Springer Science Business Media.
- Tong, N., Leung, D., & Liu, C. (2011). *A Review on Ozone Evolution and Its Relationship with Boundary Layer Characteristics in Urban Environments*. Hong Kong: SpringerLink.
- Tyler, N., Acevedo, J., Bocarejo, J., & Velásquez, J. (2013). Marco Teórico de Contaminación atmosférica en Colombia.
- Tyler, N., Ramírez, C., Acevedo, J., Bocarejo, J., & Velásquez, J. (2013). *Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia*. Bogotá, Colombia.
- Wanga, Z., Lvb, J., Tan, Y., Guo, M., Gu, Y., Xu, S., & Zhou, Y. (2019). Temporospatial variations and Spearman correlation analysis of ozone Temporospatial variations and Spearman correlation analysis of ozoncarbon monoxide in ambient air, China. *Science Direct*.
- Xiangshang , L., & Rappenglueck, B. (2019). A study of model nighttime ozone bias in air quality modeling. *Science Direct*, 19.
- Yusoff, F., Latif, M., Juneng, L., Firoz, K., Ahamad, F., Chung, J., & Ahmad, A. (20 de Marzo de 2019). *Science Direct*. Obtenido de <https://pdf.sciencedirectassets.com/271798/1-s2.0-S1352231019X00072/1-s2.0-S1352231019301852/main.pdf?x-amz-security-token=AgoJb3JpZ2luX2VjEIP%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2F%2FwEaCXVz>

LWVhc3QtMSJGMEQCIH4vm25JBT3wWnxPiQpIZkXKj1T1VMHvq%2B4ILaCTGHt

QAiAITwZkK2Mns6

ANEXOS

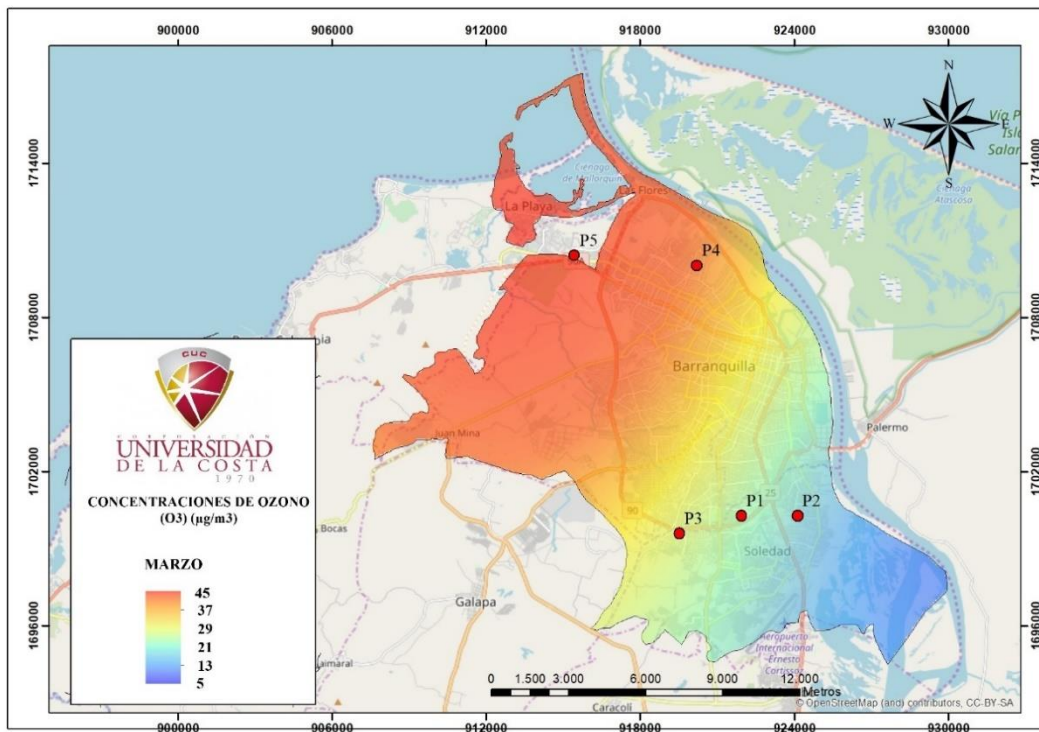


Figura 10. Variación Espacial del Ozono (Marzo/2018). Fuente: elaboración propia.

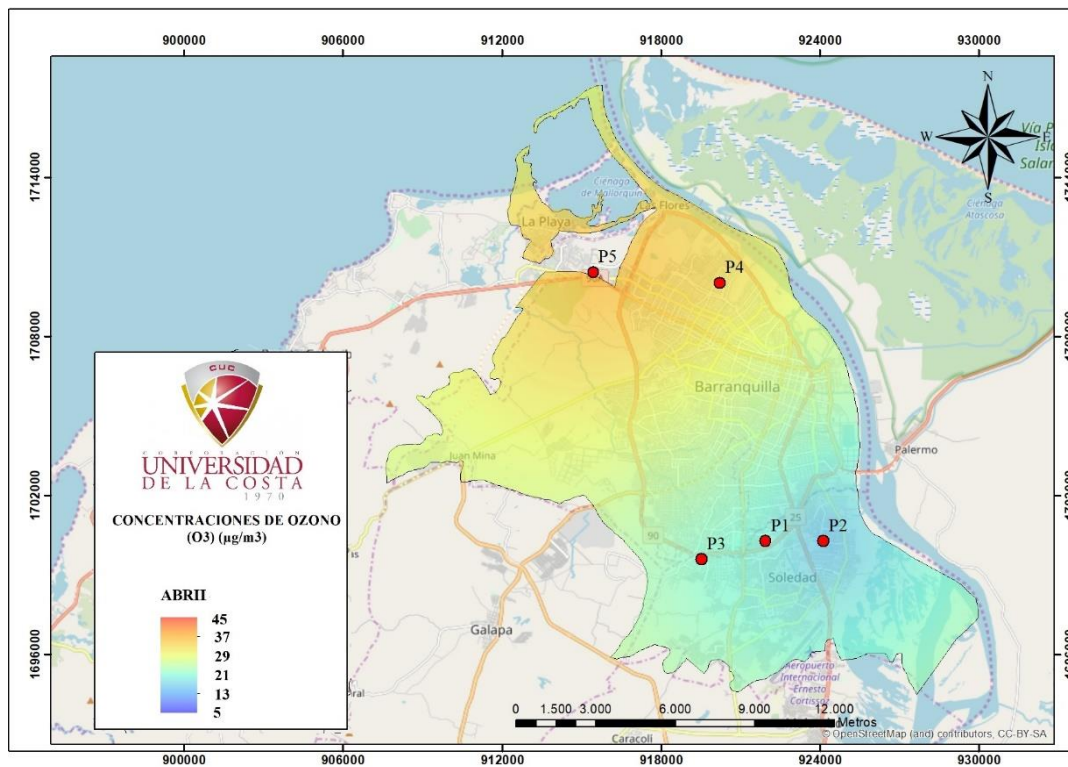


Figura 11. Variación Espacial del Ozono (Abril/2018). Fuente: elaboración propia.

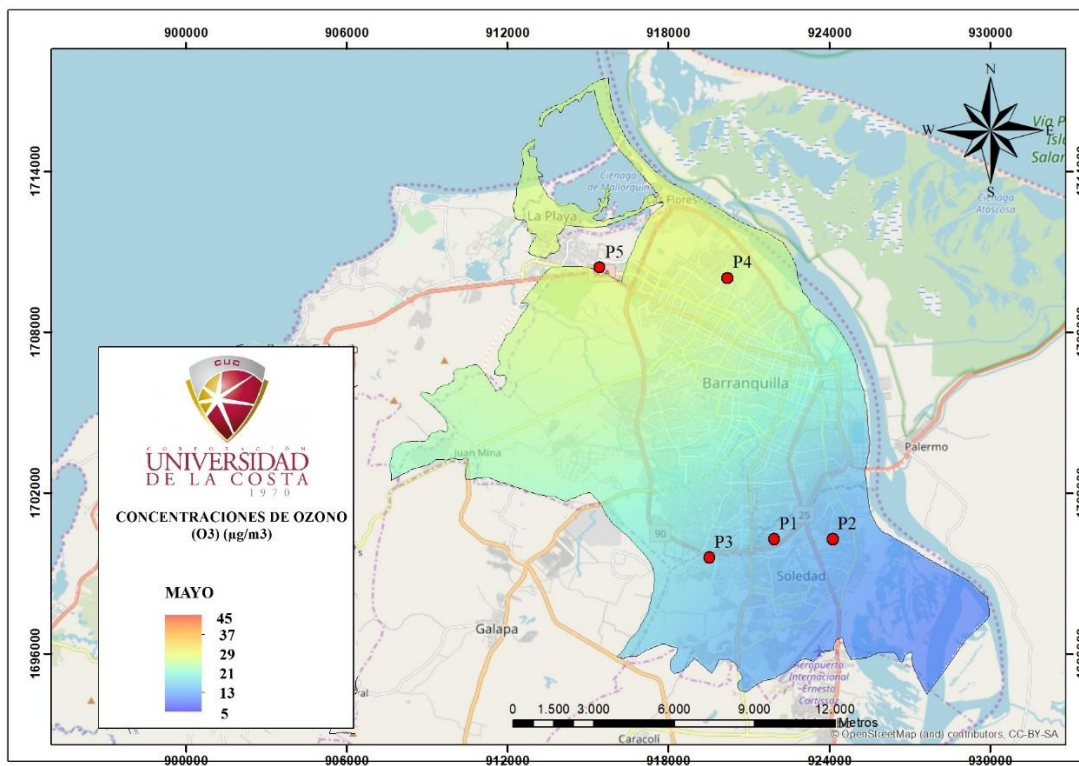


Figura 12. Variación Espacial del Ozono (Mayo/2018). Fuente: elaboración propia.

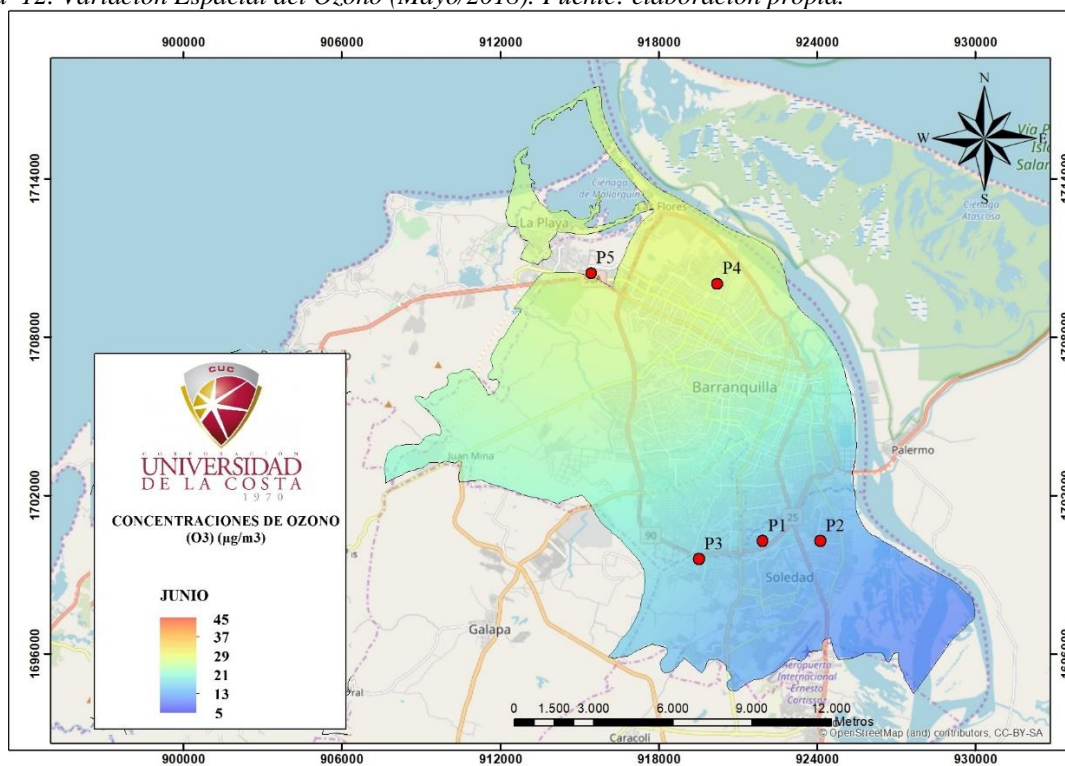


Figura 13. Variación Espacial del Ozono (Junio/2018). Fuente: elaboración propia.

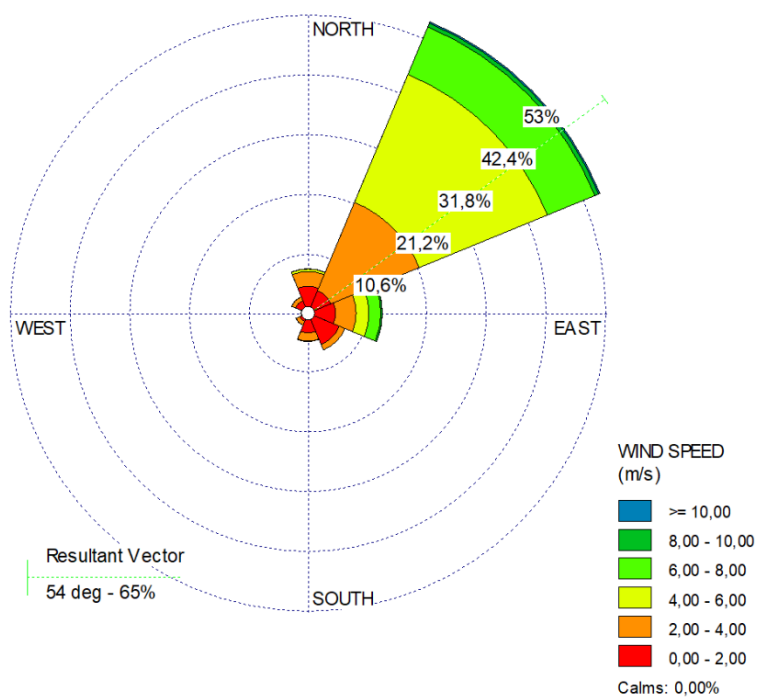


Figura 14. Rosa de Vientos. Estación Escuela de Policía. Fuente: elaboración propia.

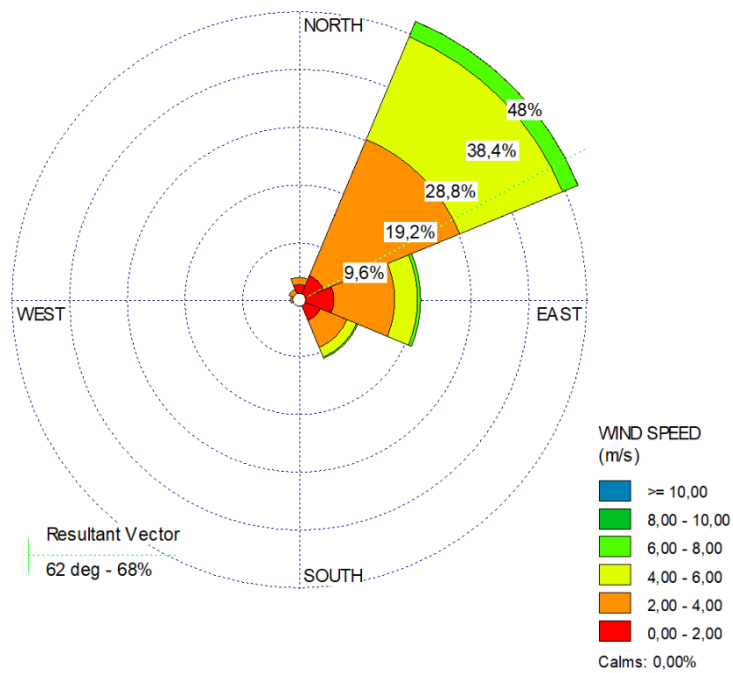


Figura 15. Rosa de Vientos. Estación Las Tres Avemarías. Fuente: elaboración propia.

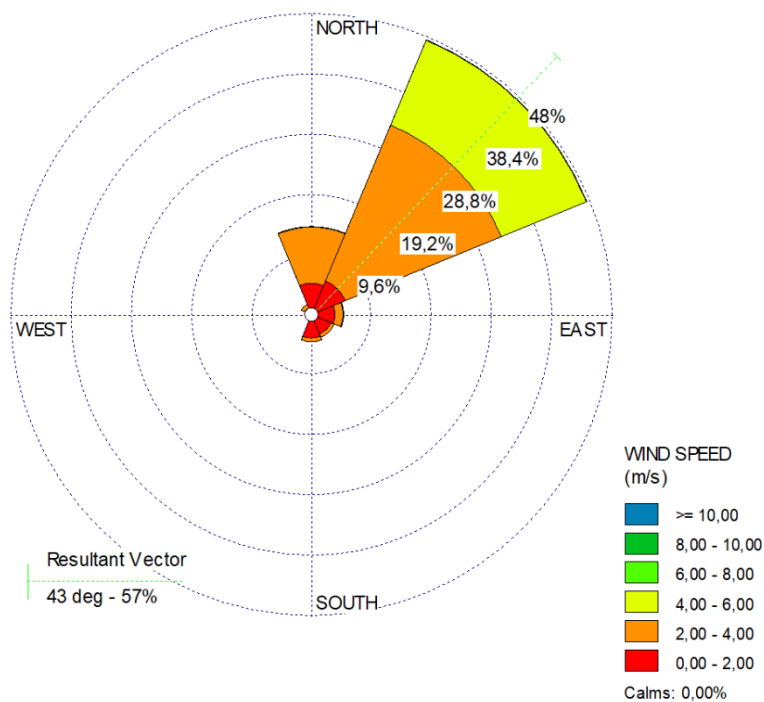


Figura 16. Rosa de Vientos. Estación Móvil (Universidad del Norte). Fuente: elaboración propia.

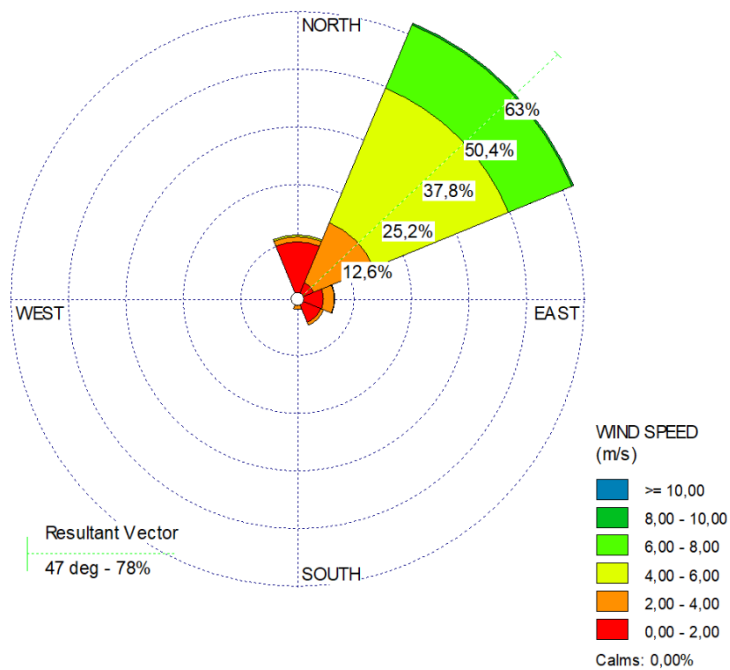


Figura 17. Rosa de Vientos. Estación Edumas (Área Metropolitana). Fuente: elaboración propia.

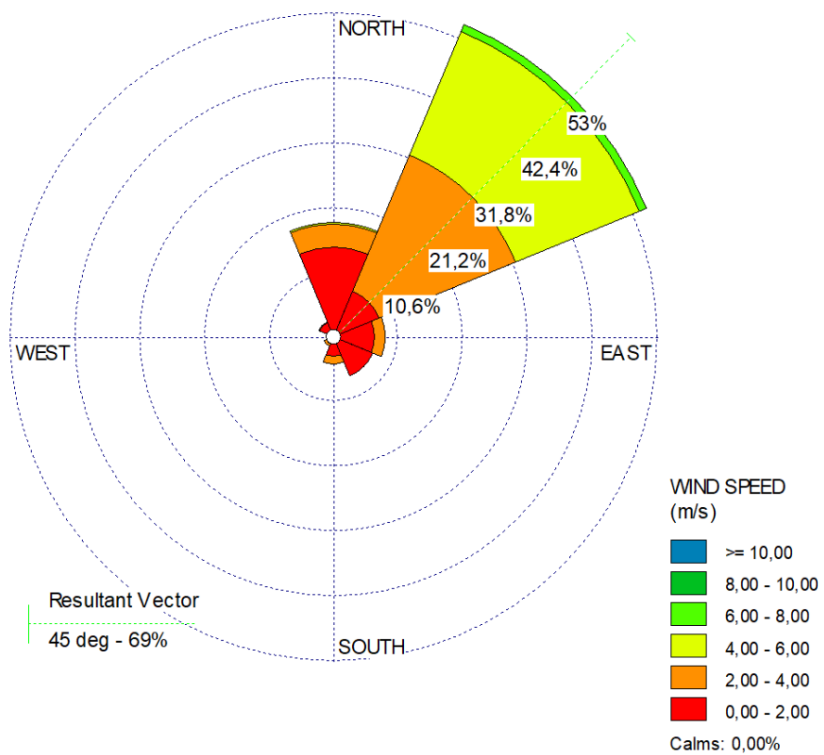


Figura 18. Rosa de Vientos. Estación CAI Hipódromo (Área Metropolitana). Fuente: elaboración propia.