

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DE LOS CONTAMINANTES
ATMOSFÉRICOS PM₁₀ Y O₃ Y SU RELACIÓN CON LAS CONDICIONES
METEOROLÓGICAS EN LA ESTACIÓN DE MONITOREO DE CABECERA EN
LA CIUDAD BUCARAMANGA**

YURLEY TATIANA ZAPATA REY

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE MATEMÁTICAS
ESPECIALIZACIÓN EN ESTADÍSTICA
BUCARAMANGA
2018**

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DE LOS CONTAMINANTES
ATMOSFÉRICOS PM₁₀ Y O₃ Y SU RELACIÓN CON LAS CONDICIONES
METEOROLÓGICAS EN LA ESTACIÓN DE MONITOREO DE CABECERA EN
LA CIUDAD DE BUCARAMANGA**

YURLEY TATIANA ZAPATA REY

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
Especialista en Estadística**

**Director
GIAMPAOLO ORLANDONI MERLI
Doctor Honoris Causa en Estadística**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE MATEMÁTICAS
ESPECIALIZACIÓN EN ESTADÍSTICA
BUCARAMANGA
2018**

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar este proyecto tan importante en mi vida, quiero dar gracias en primer lugar a Dios, porque me da la fuerza y la fe para culminar cada proyecto que emprendo. A mis padres porque siempre me han apoyado incondicionalmente y por su gran amor. A mi hermana “Gey” porque siempre ha creído en mí y a mi hermano “Cris” por ser mi apoyo en momentos claves de este proyecto.

También quiero agradecer de manera muy especial al profesor Giampaolo Orlandi, por su gran apoyo a través de su orientación y sus enseñanzas en esta área, por todo su tiempo y por estar siempre atento y con la mejor disposición para ayudarme en las diferentes fases de este proyecto.

TATIANA ZAPATA REY.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. JUSTIFICACIÓN	14
2. OBJETIVO GENERAL	16
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. ANTECEDENTES	17
4. MARCO TEÓRICO	20
4.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	20
4. 2 SERIES TEMPORALES	22
5. METODOLOGÍA	28
5.1 DESCRIPCIÓN DE LA SERIE	28
5.2 ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LAS CONCENTRACIONES DE PM₁₀ Y O₃ Y LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS.	28
5.3 COMPARACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE PM₁₀ Y O₃ EN LAS ESTACIONES DE CABECERA, FLORIDABLANCA Y REAL DE MINAS.	29
5.4 PREDICCIÓN DE VALORES FUTUROS DE LA SERIE.	29
6. RESULTADOS	30
6.1. ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LOS DATOS	30
6.2 ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LAS CONCENTRACIONES DE PM₁₀ Y O₃ Y LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS.	36
6.3 COMPARACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE PM₁₀ Y O₃ EN CABECERA, FLORIDABLANCA Y REAL DE MINAS.	41
6.4 PLANTEAMIENTO DE UN MODELO Y PREDICCIÓN DE VALORES FUTUROS PARA LAS CONCENTRACIONES DE PM₁₀ EN CABECERA.	46
7. CONCLUSIONES	57
8. RECOMENDACIONES	58
BIBLIOGRAFÍA	59

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Definición de índices de calidad de aire para PM ₁₀ (Adaptado de AQI, A Guide to Air Quality and your health, US-EPA).....	20
Tabla 2. Criterios para la selección del tipo de modelo con base en los correlogramas de la serie.	25
Tabla 3. Resumen de las variables meteorológicas.	36
Tabla 4. Aporte de las variables a las componentes principales.	37
Tabla 5. Resumen de las concentraciones de PM ₁₀ medidas en cada una de las estaciones.....	41
Tabla 6. Resumen de las concentraciones de O ₃ registradas en cada una de las estaciones.....	44
Tabla 7. Resumen de resultados obtenidos mediante diferentes modelos ARIMA para la serie de tiempo de PM ₁₀ en el periodo comprendido entre el 1 de septiembre y el 20 de noviembre (81 días) de 2017 en Cabecera.	49
Tabla 8. Resumen de resultados obtenidos mediante diferentes modelos ARIMA para la serie de tiempo de O ₃ en el periodo comprendido entre el 1 de septiembre y el 20 de noviembre (81 días) de 2017 en Cabecera.	54

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Metodología Box-Jenkins.....	26
Figura 2. <i>Serie completa correspondiente a 5160 datos (215 días) de material particulado (PM_{10}) obtenidos en estación CDMB en Cabecera.</i>	30
Figura 3. <i>Variación mensual de las concentraciones de PM_{10} durante 2017 en Cabecera.</i>	31
Figura 4. Perfil semanal de las concentraciones promedio de PM_{10} en Cabecera durante 2017.....	32
Figura 5. <i>Variación diurna media de la concentración de PM_{10} en Cabecera. El intervalo de confianza corresponde al 95%.</i>	33
Figura 6. Serie completa correspondiente a 5136 datos (214 días) de ozono (O_3) obtenidos en estación CDMB en Cabecera.	34
Figura 7. Variación mensual de las concentraciones de O_3 durante 2017 en Cabecera.	34
Figura 8. Perfil semanal de las concentraciones promedio de O_3 en Cabecera durante 2017.....	35
Figura 9. Variación diurna media de la concentración de O_3 . El intervalo de confianza corresponde al 95%.....	36
Figura 10. Porcentaje de varianza explicada por las componentes principales. ...	37
Figura 11. Componentes principales.....	38
Figura 12. Variación promedio horaria de la concentración de O_3 , temperatura, radiación solar y humedad relativa en Cabecera durante 2017.	39
Figura 13. Variación promedio mensual de la concentración de PM_{10} , presión atmosférica y velocidad de viento en Cabecera durante 2017.	40
Figura 14. Concentración de PM_{10} durante 2017 en Cabecera, Floridablanca y Real de Minas.	42

Figura 15. Perfil diario de las concentraciones promedio de PM ₁₀ durante 2017 en Cabecera, Floridablanca y Real de Minas.	43
Figura 16. Concentración de O ₃ durante 2017 en Cabecera y Floridablanca.	45
Figura 17. Perfil diario de las concentraciones promedio de O ₃ durante 2017 en Cabecera y Floridablanca.	45
Figura 18. Descomposición por el método aditivo, de la serie de tiempo de PM ₁₀ para el periodo comprendido entre el 1 de septiembre y el 20 de noviembre (81 días) de 2017 en Cabecera.	47
Figura 19. Correlogramas de la serie de tiempo transformada para PM ₁₀ en el periodo comprendido entre el 1 de septiembre y el 20 de noviembre (81 días) de 2017 en Cabecera.	48
Figura 20. Correlogramas de la serie de tiempo transformada y diferenciada en la parte estacional para PM ₁₀ en el periodo comprendido entre el 1 de septiembre y el 20 de noviembre (81 días) de 2017 en Cabecera.....	48
Figura 21. Predicción de valores mediante el uso de un modelo ARIMA (2,0,0)(2,1,0) _[24]	51
Figura 22. Descomposición por el método aditivo, de la serie de tiempo de O ₃ para el periodo comprendido entre el 1 de septiembre y el 20 de noviembre (81 días) de 2017 en Cabecera.	52
Figura 23. Correlogramas de la serie de tiempo transformada para O ₃ en el periodo comprendido entre el 1 de septiembre y el 20 de noviembre (81 días) de 2017 en Cabecera.	53
Figura 24. Correlogramas de la serie de tiempo transformada y diferenciada en la parte estacional para O ₃ en el periodo comprendido entre el 1 de septiembre y el 20 de noviembre (81 días) de 2017 en Cabecera.....	53
Figura 25. Predicción de valores mediante el uso de un modelo ARIMA (2,0,1)(1,1,1) _[24]	56

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TEMPORAL DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS PM_{10} Y O_3 Y SU RELACIÓN CON LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS EN LA ESTACIÓN DE MONITOREO DE CABECERA EN LA CIUDAD BUCARAMANGA. *

AUTOR: Yurley Tatiana Zapata Rey. **

PALABRAS CLAVE: Serie de tiempo, Box – Jenkins, ARIMA, predicción, correlación.

DESCRIPCIÓN:

En el presente estudio, se analiza la variación temporal de dos contaminantes atmosféricos de criterio, que son el PM_{10} y el O_3 , medidos en la estación de muestreo de Cabecera en la ciudad de Bucaramanga durante 2017. Se observó que existen ciclos diarios en las concentraciones de PM_{10} y O_3 con gran diferencia entre los valores máximos y los mínimos. Así como algunas diferencias en los niveles de concentraciones para los días entre semana respecto a los fines de semana y un comportamiento estable a lo largo del año. Mediante un análisis de componentes principales y coeficientes de correlación de Pearson, se encontró que la radiación solar, humedad relativa y temperatura están altamente relacionadas con las concentraciones de O_3 , mientras que las variables meteorológicas que más influyen en las concentraciones de PM_{10} son la velocidad del viento y la presión. Adicionalmente se observó que existe una relación con las actividades antropogénicas de cada sector (Cabecera, Floridablanca y Real de Minas) y el comportamiento cíclico de estos contaminantes. Finalmente, se plantearon modelos de series de tiempo mediante la metodología Box-Jenkins, que permiten predecir dentro de un rango confiable, concentraciones de estos dos contaminantes (PM_{10} y O_3) hasta con diez días de anticipación. Dichos modelos, podrían convertirse, en una herramienta de control y prevención de episodios críticos de contaminación, mediante su implementación en tiempo real.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ciencias. Escuela de Matemáticas. Director: Giampaolo Orlandoni Merli. Doctor Honoris Causa en Estadística.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE TEMPORARY BEHAVIOR OF PM₁₀ AND O₃ ATMOSPHERIC POLLUTANTS AND THEIR RELATIONSHIP WITH THE METEOROLOGICAL CONDITIONS AT THE CABECERA MONITORING STATION IN THE CITY OF BUCARAMANGA. *

AUTHOR: Yurley Tatiana Zapata Rey. **

KEYWORDS: Time series, Box - Jenkins, ARIMA, prediction, correlation.

DESCRIPTION:

In this study, temporal variation of two criteria air pollutants, PM₁₀ and O₃, were analyzed, measured at the Cabecera sampling station in the city of Bucaramanga during 2017. It was observed that there are daily cycles in concentrations of PM₁₀ and O₃ with great difference between maximum and minimum values. As well as some differences in the levels of concentrations for the days between week with respect to the weekends and a stable behavior throughout the year. Through an analysis of principal components and Pearson's correlation coefficients, it was found that solar radiation, relative humidity and temperature are highly related to O₃ concentrations, while the meteorological variables that most influence PM₁₀ concentrations are the velocity of the wind and pressure. Additionally, it was observed that there is a relationship with the anthropogenic activities of each sector (Cabecera, Floridablanca and Real de Minas) and the cyclical behavior of these pollutants. Finally, time series models were proposed using the Box-Jenkins methodology, which allows to predict within a reliable range, concentrations of these two pollutants (PM₁₀ and O₃) up to ten days in advance. These models could become a tool for the control and prevention of critical episodes of contamination, through their implementation in real time.

* Undergraduate Project.

** Science Faculty. School of Mathematics. Advisor: Giampaolo Orlandoni Merli. Doctor Honoris Causa in Statistics.

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica en Colombia es un tema de gran interés ya que no solo presenta grandes impactos en la salud y el ambiente, sino que, además, es una de las problemáticas que genera mayores costos ambientales después de la contaminación del agua y los desastres naturales¹. Es frecuente encontrar informes en las grandes ciudades que muestran incumplimiento de las normas de calidad de aire² como, por ejemplo, Bogotá³, Cali⁴ y Medellín⁵. La mayoría de las fuentes de contaminación del aire exterior están más allá del control de las personas, y requieren medidas por parte de las ciudades, así como de las instancias normativas nacionales e internacionales en sectores tales como transporte, gestión de residuos energéticos, construcción y agricultura⁶. Los contaminantes del aire presentes en las grandes ciudades han demostrado ser un riesgo para la salud humana, ya que existen numerosos estudios en lo que se relaciona las altas concentraciones de contaminantes del aire con enfermedades respiratorias y cardiovasculares^{7,8,9}. Según la CDMB, en el informe realizado para 2017¹⁰ la calidad del aire que se respira en la ciudad de Bucaramanga está entre buena y moderada, dentro de los niveles permisibles, sin embargo, estos análisis se realizaron únicamente con base en las concentraciones de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}). El desconocimiento

¹ CONPES 3344, 2005. Lineamientos para la formulación de la política de prevención y control de la contaminación del aire.

² MARTÍNEZ *et al.*, Contaminación atmosférica y efectos sobre la salud de la población en Medellín y su área metropolitana. Universidad de Antioquia.

³ RMCAB, 2017. Informe anual de calidad del aire de Bogotá, 2016. Secretaría Distrital de Ambiente.

⁴ DAGMA, 2017. Informe anual de calidad del aire de Santiago de Cali, 2016. Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente.

⁵ SIATA 2017. Informa anual de calidad del aire del Valle de Aburrá, 2016. Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

⁶ 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.

⁷ POPE *et al.*, Ischemic heart disease events triggered by short-term exposure to fine particulate air pollution.

⁸ MOOLGAVKAR *et al.*, 2012. Time-series analyses of air pollution and mortality in the United States. *Environ Health Perspect.*

⁹ DENG *et al.*, 2016. Measurement and health risk assessment of PM_{2.5}, flame retardants, carbonyls and black carbon in indoor and outdoor air in kindergartens in Hong Kong. *Environment International.*

¹⁰ CDMB, 2017. Informe de la calidad de aire en Bucaramanga.

de las condiciones del estado actual de las concentraciones de otros contaminantes atmosféricos de criterio, como el O₃, en Bucaramanga y su área metropolitana dificulta la toma de medidas preventivas y correctivas.

En el presente estudio, se analiza la variación temporal de dos contaminantes de criterio, que son el PM₁₀ y el O₃ medidos en la estación de muestreo de Cabecera / Bucaramanga en 2017. Con el objetivo de analizar su ciclicidad, periodos de mayor concentración, además de su relación con las variables meteorológicas y con las concentraciones registradas en las estaciones de Floridablanca y Real de Minas. Inicialmente se presentan los antecedentes de otros estudios relacionados y los principales resultados obtenidos en estos. Posteriormente se realiza una breve contextualización en cuanto a la contaminación atmosférica y su impacto sobre la salud, así como sobre las series temporales y los modelos ARIMA. Seguido de esto, se describe la metodología empleada para el desarrollo de este estudio y posteriormente se presentan los resultados obtenidos y las conclusiones.

El análisis de la variación temporal de estos contaminantes (PM₁₀ Y O₃) mediante series temporales, permitió plantear modelos de series tiempo, empleando la metodología de Box-Jenkins, que permiten predecir dentro de un rango confiable, las concentraciones de estos contaminantes hasta con 10 horas de anticipación. Dichos modelos, podrían convertirse, en una herramienta de control y prevención de episodios críticos de contaminación, mediante su implementación en tiempo real, como complemento al análisis de los datos de monitoreo de calidad de aire, con lo cual se podría reducir el riesgo de afectación a la salud de las personas, por exposición a concentraciones elevadas de estos contaminantes.

1. JUSTIFICACIÓN

Las predicciones de la concentración de contaminantes atmosféricos mediante métodos cualitativos y cuantitativos se han convertido en una importante tarea a llevar a cabo por las entidades y los organismos reguladores¹¹. Estudios realizados sobre este tema^{12,13,14} evidencian la importancia de modelar el comportamiento de los contaminantes atmosféricos a través del tiempo ya que permite analizar los componentes cíclicos, factores estacionales y líneas de tendencia¹⁵, así como establecer relaciones con posibles fuentes de contaminación, como el tráfico vehicular¹⁶. El análisis de series temporales permite además el desarrollo de modelos que podrían ser utilizados por las autoridades ambientales de la región para predecir y alertar a la población sobre posibles episodios de altas concentraciones de contaminantes atmosféricos que puedan poner en riesgo la salud pública¹⁷

Con este estudio se pretende, analizar la influencia de las variables meteorológicas en la concentración de los contaminantes atmosféricos PM₁₀ y O₃, además su comportamiento en el tiempo. Con el fin de identificar las variables de mayor influencia en la dispersión y concentración de estos contaminantes en el ambiente, así como su comportamiento cíclico, identificando los periodos críticos. Para, con base en esta información tomar medidas preventivas para reducir el impacto sobre

¹¹ JARAMILLO *et al.*, 2006. Análisis de series de tiempo univariante aplicando metodología de Box-Jenkins para la predicción de ozono en la ciudad de Cali, Colombia.

¹² FAJARDO *et al.*, 2013. 'Política ambiental de restricción vehicular e implementación de SITM en la concentración de contaminantes atmosféricos en la zona centro de Bucaramanga, Colombia.

¹³ CAPPELLI *et al.*, 2015. Regime change analysis of interval-valued time series with an application to PM10. *Cheometrics and Intelligent Laboratory Systems*.

¹⁴ GÜLER N. & AKKUŞ Ö., 2017. A new time series model based on robust clustering for forecasting of air pollution. *Ecological Informatics*.

¹⁵ MARTÍNEZ *et al.*, 2007. Contaminación atmosférica y efectos sobre la salud de la población en Medellín y su área metropolitana. Universidad de Antioquia.

¹⁶ FAJARDO *et al.*, Análisis de Intervención. Efectividad de política Ambiental de restricción vehicular en la concentración de contaminantes en centro de Bucaramanga.

¹⁷ JARAMILLO *et al.*, 2006. Análisis de series de tiempo univariante aplicando metodología de Box-Jenkins para la predicción de ozono en la ciudad de Cali, Colombia.

la población y de control (por ejemplo, restricciones vehiculares) cuando sea necesario. Además de servir como base para investigaciones futuras, en las cuales se desee modelar el comportamiento de estos contaminantes en la ciudad de Bucaramanga.

2. OBJETIVO GENERAL

Analizar la variación temporal de los contaminantes atmosféricos PM_{10} y O_3 durante el año 2017 y su relación con las condiciones meteorológicas en la estación de Cabecera ubicada en la ciudad de Bucaramanga.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un estudio descriptivo del comportamiento de los contaminantes atmosféricos (PM_{10} y O_3) en Cabecera / Bucaramanga.
- Estudiar la relación entre las concentraciones de PM_{10} y O_3 y las variables meteorológicas (radiación solar, humedad relativa, presión, velocidad de viento, precipitación y temperatura)
- Comparar las concentraciones de PM_{10} y O_3 registradas en tres estaciones de Bucaramanga y su área metropolitana (Cabecera, Floridablanca y Real de minas)
- Plantear y estimar modelos de series temporales empleando la metodología Box-Jenkins, que permitan explicar las concentraciones de PM_{10} y O_3 en Cabecera / Bucaramanga.

3. ANTECEDENTES

A partir del conocimiento de la relación entre la contaminación atmosférica y el aumento del riesgo en enfermedades respiratorias y cardiovasculares^{18,19,20}, la calidad del aire, es un tema que ha tomado gran importancia. A nivel mundial se han realizado diversos estudios con el fin de conocer las posibles fuentes de contaminación^{21,22,23}, su relación con las condiciones meteorológicas^{24,25} y su comportamiento espacio-temporal^{26,27}, entre otros.

Cotrina & Cabrera (2004)²⁸ en su estudio titulado “análisis del comportamiento del ozono troposférico y su relación con la radiación solar en las ciudades de Lima, Ica y Arequipa” mediante un análisis estadístico encontraron fuerte correlación entre el comportamiento de la radiación solar total horaria y la generación del ozono troposférico durante el ciclo diario. Por su parte, Ramos *et al.* (2007)²⁹ realizaron un

¹⁸ PEÑA *et al.*, 2001. Toxicología ambiental. Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental. Southwest Hazardous Waste Program. The University of Arizona.

¹⁹ BOLDO *et al.*, 2011. Health impact assessment of a reduction in ambient PM(2.5) levels in Spain. Environment International.

²⁰ SHI *et al.*, 2016. Low-concentration PM2.5 and Mortality: Estimating Acute and Chronic Effects in a Population-Based Study. Environ Health Perspect.

²¹ LESTARI P. & MAULIADI Y., 2009. Source apportionment of particulate matter at urban mixed site in Indonesia using PMF. *Atmospheric Environment*.

²² FORERO D. & DELGADO M., 2008. Análisis comparativo de la concentración de carbono orgánico, carbono elemental contenido en el material particulado menor a 10 micrómetros entre las áreas metropolitanas de Cali y Valle de Aburrá.

²³ LÓPEZ L. & ZAPATA Y., 2016. Identificación de las principales fuentes de material particulado PM2.5 en una zona de alto tráfico y una zona de bajo tráfico vehicular en Bucaramanga mediante la aplicación del modelo receptor-fuente CMB. Universidad Pontificia Bolivariana.

²⁴ VILLALBA *et al.*, 2012. Contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas. Una aplicación del Análisis de Datos Longitudinales y del Análisis de Correlación Canónica.

²⁵ SILVA-VINASCO J. & CANCHALA T., 2013. Variación espacial y temporal de concentraciones de PM10 en el área urbana de Santiago de Cali, Colombia. Universidad del Valle Colombia.

²⁶ PACSI S., 2015. Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado PM10 y PM2.5 en Lima Metropolitana. Universidad Nacional Agraria La Molina.

²⁷ ESPINOSA *et al.*, Evolución del comportamiento de las concentraciones de contaminantes atmosféricos en un sitio en Salamanca, Guanajuato. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

²⁸ COTRINA J. & CABRERA Z., 2004. Análisis de la relación entre el comportamiento estacional de los contaminantes sólidos sedimentables con las condiciones meteorológicas predominantes en la zona metropolitana de Lima-Callao durante el año 2004.

²⁹ RAMOS *et al.*, 2007. Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de Chiapas, México. División Académica de Ciencias Biológicas.

estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de Chiapas, México mediante análisis de regresión múltiple, encontrando que las variables meteorológicas de mayor influencia en la concentración de contaminantes atmosféricos fueron la temperatura, la humedad relativa y la dirección del viento.

Por otra parte, el análisis de series temporales usa una metodología aplicada a diferentes ramas de investigación, entre ellas, la ambiental^{30,31,32}. En cuanto a contaminantes atmosféricos, se han realizado diversas investigaciones empleando análisis de series temporales. Saenz *et al.* (1999)³³ llevaron a cabo un estudio epidemiológico en la ciudad de Barcelona, que pretendía evaluar la relación entre el número diario de muertos mayores de 70 años y las variaciones en los niveles promedio de contaminación por humos negro mediante análisis de series de tiempo. Encontrando que esta metodología presenta ciertas ventajas en comparación con otro tipo de métodos, como los diseños ecológicos y los análisis de base individual, ya que permiten considerar las variaciones temporales en la exposición y controlar la confusión tiempo-dependiente.

En la ciudad de Cali, Jaramillo *et al.*, (2006)³⁴ desarrollaron un modelo de series de tiempo para la predicción a corto plazo de la concentración de ozono troposférico en la zona urbana, llegando a la conclusión de que el modelo propuesto podría ser utilizado para predecir y alertar a la población sobre posibles episodios de altas concentraciones de ozono hasta con 8 horas de anticipación. Mientras que,

³⁰ SAENZ *et al.*,1999. Métodos de series temporales en los estudios epidemiológicos sobre contaminación atmosférica.

³¹ SALINI G. & PÉREZ P., 2006. Estudio de series temporales de contaminación ambiental mediante técnicas de redes neuronales artificiales.

³² PACHECO P., 2008. Análisis estadístico de datos de contaminación ambiental del lago de Valencia. Universidad Central de Venezuela.

³³ SAENZ *et al.*,1999. Métodos de series temporales en los estudios epidemiológicos sobre contaminación atmosférica.

³⁴ JARAMILLO *et al.*, 2006. Análisis de series de tiempo univariante aplicando metodología de Box-Jenkins para la predicción de ozono en la ciudad de Cali, Colombia.

Martínez *et al.*, (2007)³⁵ realizaron un estudio en el Valle de Aburrá de la contaminación atmosférica y mediante la descomposición de las series temporales, estudiaron la tendencia, y ciclicidad anual, semanal y horaria de los diferentes contaminantes de criterio.

³⁵ MARTÍNEZ *et al.*, 2007. Contaminación atmosférica y efectos sobre la salud de la población en Medellín y su área metropolitana. Universidad de Antioquia.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación atmosférica por material particulado se define como la alteración de la composición natural de la atmósfera como consecuencia de la entrada en suspensión de partículas, ya sea por causas naturales o por la acción del hombre³⁶. La emisión de material particulado a la atmósfera, su permanencia y deposición en el medio, puede causar alteraciones en el entorno y en la salud de las personas. El material particulado se define como un conjunto de partículas sólidas o líquidas (a excepción del agua pura) presentes en suspensión en la atmósfera³⁷. Las partículas atmosféricas pueden ser emitidas por una gran variedad de fuentes de origen natural o antropogénicos. Respecto a los mecanismos de formación, las partículas pueden ser emitidas como tales a la atmósfera (primarias) o bien ser generadas por reacciones químicas (partículas secundarias)³⁸.

Índices de calidad de aire para PM₁₀

Tabla 1. Definición de índices de calidad de aire para PM₁₀ (Adaptado de AQI, *A Guide to Air Quality and your health*, US-EPA)

ICA	Color	Clasificación	PM ₁₀ diario (µg/m ³)	Efectos de Salud
0-50	Verde	Bueno	0-54	La calidad del aire es satisfactoria y no implica riesgos a la salud.
51-100	Amarillo	Moderado	55-154	La calidad del aire es aceptable, sin embargo, la contaminación en este rango puede implicar un riesgo moderado para un número muy pequeño de individuos.
101-150	Naranja	Dañino a la salud para grupos sensibles	155-254	Grupos sensibles (adultos mayores, niños y personas con enfermedades cardíacas o pulmonares) pueden experimentar efectos en salud, pero el público en general no es afectado.
151-200	Rojo	Dañino a la salud	255-354	Todas las personas pueden empezar a experimentar efectos en salud.

³⁶ MÉSZÁROS E., 1999. *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*.

³⁷ MÉSZÁROS E., 1999. *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*.

³⁸ IBÁÑEZ C., 2004. Los sistemas terrestres y sus implicaciones medioambientales, Ministerio de Educación. Instituto Superior de Formación del Profesorado (España).

201-300	Púrpura	Muy dañino a la salud	355-424	Todas las personas pueden experimentar serios problemas de salud.
301-500	Marrón	Peligroso	>425	Toda la población tiene más posibilidad de ser afectada por serios problemas de salud.

Fuente: CDMB, 2017³⁹.

El índice de calidad del aire representa que tan limpio es el aire y que efectos de salud pueden experimentarse dentro de las horas o días siguientes a la exposición al aire contaminado (Tabla 1).

Por otra parte, el ozono es una molécula que no es emitida a la atmósfera, sino que se forma por una serie de reacciones fotoquímicas entre hidrocarburos y óxidos de nitrógeno; es el oxidante más importante y principal componente del esmog fotoquímico. A diferencia del ozono estratosférico, el ozono troposférico tiene consecuencias ambientales, ya que su toxicidad afecta la salud humana; puede causar irritación en los pulmones, ojos, garganta y empeorar enfermedades cardiovasculares; en casos de exposición permanente, puede generar mareos, fatiga extrema, dolor de cabeza, envejecimiento prematuro, inclusive la muerte. En la vegetación también tiene efectos nocivos, ya que interfiere en la capacidad de producir y almacenar nutrientes, afectando el crecimiento de las plantas y las hace susceptibles al ataque de insectos y las condiciones climáticas adversas⁴⁰.

Las concentraciones de ozono en el aire están relacionadas con la interacción entre la formación, transporte, deposición y destrucción de ozono, influenciada por factores meteorológicos, como temperaturas elevadas, altas radiaciones, ausencia de vientos fuertes o lluvias. En la atmósfera, el ozono puede permanecer por semanas, llegando a ser transportado lejos de sus precursores; este hecho puede generar aumento en la concentración a escala regional e incluso a escala transnacional, por esta razón es necesario establecer políticas nacionales y fronterizas sobre el control de emisiones.

³⁹ CDMB, 2017. Informe de la calidad de aire en Bucaramanga.

⁴⁰ AEMA, 2008. Ozono Troposferico. Ciudades para un futuro más sostenible. Agencia Europea de Medio Ambiente.

4. 2 SERIES TEMPORALES

Una serie temporal es una secuencia de N observaciones ordenadas y equidistantes cronológicamente sobre una característica (serie univariante o escalar) o sobre varias características (serie multivariada o vectorial) de una unidad observable en diferentes momentos.

Representaciones matemáticas frecuentes de series temporales univariantes:

$$y_1, y_2, \dots, y_N ; (y_t)_{t=1}^N ; (y_t : t = 1, \dots, N)$$

donde y_t es la observación número t ($1 \leq t \leq N$) de la serie (momento de la medición) y N es el número de observaciones de que consta la serie completa (el tamaño o la longitud de la serie).

Chatfield (1978)⁴¹ menciona cuatro objetivos principales del análisis de series de tiempo: I) Descripción de la serie, II) explicación de una serie en función de los datos correspondientes a otra, III) predicción de valores futuros de la serie y IV) control de calidad en un proceso.

Modelos ARIMA

Los modelos ARIMA están compuestos por métodos autorregresivos (AR), promedio móvil (MA), autorregresivos y de promedios móviles (ARMA) y autorregresivo integrado de promedios móviles (ARIMA). Estos modelos requieren que las series a analizar sean estacionarias, no obstante, si la serie no es estacionaria, se puede transformar.

- Procesos Autorregresivos (AR)

⁴¹ CHATFIELD C., 1978. The Holt–Winters forecasting procedure, Applied Statistics.

Estos modelos generalizan la idea de regresión para representar la dependencia lineal entre dos variables aleatorias. El modelo de regresión simple expresa la evolución de una variable, y_t como función lineal de otra variable, x_t mediante la ecuación:

$$y_t = c + bx_t + a_t$$

dónde, c y b son constantes a determinar, y a_t es una variable aleatoria normal con media cero y varianza constante (ruido blanco). De la misma manera, se aplica la estructura de dependencia de una serie temporal, z_t y se toma $y_t = z_t$ y $x_t = z_{t-1}$. Y se obtiene el proceso autorregresivo de primer orden.

En otras palabras, una serie z_t sigue un proceso autorregresivo de primer orden, o un AR(1) si ha sido generada por:

$$z_t = c + \phi z_{t-1} + a_t$$

donde, c y ϕ ($-1 < \phi < 1$) son constantes a determinar y a_t es un proceso de ruido blanco, es decir el proceso z_t cumple con las condiciones de media cero, varianza σ^2 constante y las autocorrelaciones son iguales a cero. Si z_t es un proceso normal, entonces todas las variables del proceso son independientes.

- Procesos de Media móvil (MA):

Los procesos de media móvil se caracterizan por tener una memoria corta, es decir, son funciones de un número finito, y generalmente pequeño de las innovaciones pasadas.

Los procesos de media móvil de orden uno MA(1) se definen adicionando a un proceso de ruido blanco una dependencia del valor actual de la serie de la última innovación ocurrida. Es así, como el proceso será una combinación lineal de las dos últimas innovaciones, según la ecuación:

$$\tilde{z}_t = a_t - \theta a_{t-1}$$

donde $\tilde{z}_t = z_t - \mu$ siendo μ la media del proceso y a_t un proceso de ruido blanco con varianza σ^2 .

- Procesos ARMA (p,q)

Los procesos ARMA combinan las propiedades de los procesos AR y MA. Desde la estructura de autocorrelación, los AR permiten muchos coeficientes distintos de cero, pero con una pauta de crecimiento fija, mientras los MA permiten pocos coeficientes distintos de cero, con valores arbitrarios. El proceso más simple es el ARMA (1,1) se describe de la siguiente manera:

$$\tilde{z}_t = \phi_1 \tilde{z}_{t-1} + a_t - \theta_1 a_{t-1}$$

- Procesos ARIMA (p,d,q)

Las series no estacionarias son transformadas mediante los procesos integrados de orden d; en los procesos ARIMA (p,d,q) p es el orden de la parte autorregresiva estacionaria, d es el número de diferencias del proceso y q es el orden de la parte media móvil.

$$\phi_p(B)(1 - B)^d z_t = c + \theta_q(B)a_t$$

Los términos que dan el orden al modelo, van a ser establecidos con base en los gráficos de correlograma simple y parcial de la serie, teniendo en cuenta los criterios presentados en la Tabla 2:

Tabla 2. Criterios para la selección del tipo de modelo con base en los correlogramas de la serie.

MODELO	AR	MA	ARMA
Correlograma simple	Decae lentamente (forma de cola)	Tiene corte en un retardo q.	Decae lentamente (forma de cola)
Correlograma parcial	Tiene corte en un retardo p.	Decae de forma lenta (tiene cola decreciente)	Decae lentamente (forma de cola)

Fuente: Rubio, 2014⁴².

- Procesos mixtos estacionales ARIMA (p,d,q) (P,D,Q)

Estos procesos combinan las propiedades de los procesos AR y MA, además de incluir el componente estacional de la serie. El período estacional hace referencia al número de observaciones necesarias para recorrer todo el ciclo estacional. Este tipo de modelos se escriben de la siguiente forma:

$$\phi_p(B)\Phi_p(B^S)[\Delta_S^D \Delta^d y_t] = \delta + \theta_q(B)\Theta_Q(B^S)\varepsilon_t$$

- ✓ Polinomio AR(P)_s $\Phi_p(B^S) = 1 - \phi_1 B^S - \phi_2 B^{2*S} - \dots - \phi_p B^{P*S}$
- ✓ Polinomio MA(Q)_s $\phi_p(B^S) = 1 - \phi_1 B^S - \phi_2 B^{2*S} - \dots - \phi_p B^{P*S}$
- ✓ Constante (función de la media) $\delta = \mu \phi_p(B)\Phi_p(B^S)$
- ✓ Operador diferencial estacional $\Delta_S = 1 - B^S$

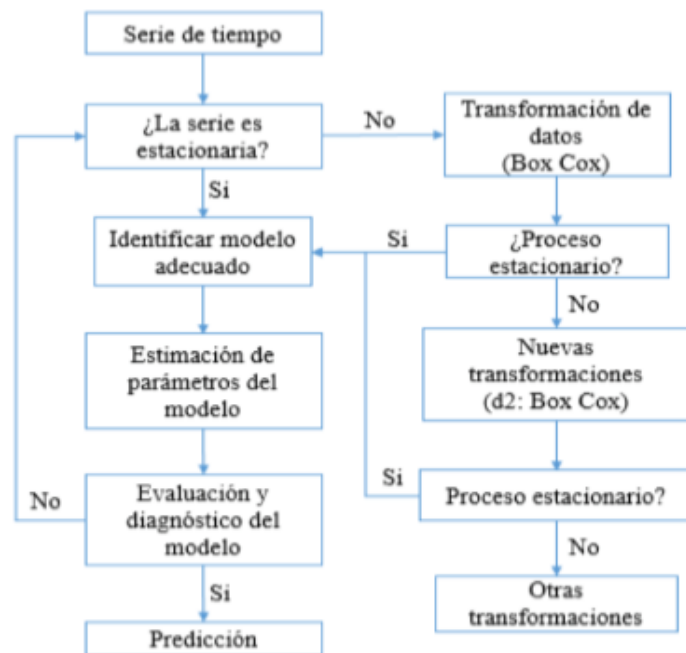
Metodología Box-Jenkins:

En el análisis de series de tiempo, la metodología de Box-Jenkins, nombrada así en honor a los estadísticos George E. P. Box y Gwilym Jenkins, se aplica a los modelos autorregresivos de media móvil ARMA o a los modelos autorregresivos integrados de media móvil (ARIMA) para encontrar el mejor ajuste de una serie temporal de

⁴² RUBIO K., 2014. Impacto de las políticas económicas de Venezuela sobre el precio del bolívar en la frontera Norte de Santander: Un análisis de series de tiempo. Universidad Industrial de Santander.

valores, a fin de que los pronósticos sean más acertados⁴³. En la Figura 1 se presentan la secuencia de pasos de esta metodología. En la cual el primer paso consiste en lograr la estacionariedad de la serie, posterior a esto se realiza la identificación del mejor modelo, luego se realiza la estimación de los parámetros del modelo, después de definidos estos parámetros se procede a la evaluación y diagnóstico del modelo y finalmente se realiza la predicción.

Figura 1. Metodología Box-Jenkins.



Fuente: Uribe et al., 2017⁴⁴ .

Estacionariedad:

Dentro de la primera etapa del método de Box-Jenkins, importa notar que se supone que la serie es estacionaria; esto implica en particular que la serie fluctúa

⁴³ BOX G. & JENKINS G., 1973. Some comments on a paper by Chatfield and Prothero and on a review by Kendall. Journal of the Royal Statistical Society.

⁴⁴ Uribe *et al.*, Incidencia de las políticas públicas de empleo sobre la desocupación en Colombia: un análisis de intervención para el periodo 2002-2014.

aleatoriamente alrededor de un nivel medio, el cual permanece constante en el tiempo, y que la variación con respecto a este valor medio tampoco se modifica con el transcurso del tiempo⁴⁵.

⁴⁵ GUERRERO V. & VERA G., 1981. Una aplicación del análisis de intervención a series de tiempo de la economía mexicana. Banco de México.

5. METODOLOGÍA

Para el cumplimiento de los objetivos planteados en este estudio, se aplicó la siguiente metodología:

Base de datos: La base de datos utilizada en este estudio fue suministrada por la CDMB y hace parte de las mediciones de las estaciones de calidad de aire ubicadas en Cabecera, Floridablanca y Real de Minas. Los datos comprenden el periodo de medición del 1 de febrero al 30 de noviembre de 2017, sin embargo, en algunas de las series existen datos faltantes. Las variables comprendidas en la base de datos son concentración de PM₁₀ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$], O₃ [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]; radiación solar [w/m^2], velocidad de viento [m/s], temperatura [$^{\circ}\text{C}$], humedad relativa [%] y presión [mb].

5.1 DESCRIPCIÓN DE LA SERIE

En primer lugar, se realizó un análisis descriptivo y gráfico de las series principales (PM₁₀ y O₃) en Cabecera para variaciones diarias, semanales y mensuales, teniendo en cuenta todos los datos, así como la identificación de posibles valores atípicos. A partir de esto, se seleccionó el periodo de interés para el planteamiento de un modelo de series temporales.

5.2 ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LAS CONCENTRACIONES DE PM₁₀ Y O₃ Y LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS.

Se analizó la relación existente entre las concentraciones horarias de PM₁₀ y O₃ y las diferentes variables meteorológicas (humedad relativa, radiación solar, presión, velocidad de viento y temperatura), mediante análisis de componentes principales y coeficientes de correlación de Pearson.

5.3 COMPARACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE PM₁₀ Y O₃ EN LAS ESTACIONES DE CABECERA, FLORIDABLANCA Y REAL DE MINAS.

La dispersión de contaminantes atmosféricos es un tema de gran interés, por ende, se compararon las concentraciones de estos contaminantes medidos en diferentes puntos de la ciudad (Cabecera, Floridablanca y Real de minas) mediante coeficientes de correlación de Pearson y análisis gráfico.

5.4 PREDICCIÓN DE VALORES FUTUROS DE LA SERIE.

Para la consecución de este objetivo, se aplicó la metodología de Box y Jenkins teniendo en cuenta 4 pasos específicos, los cuales son en su orden: I) Análisis descriptivo de la serie seleccionada, II) Identificación del modelo, III) Estimación y adecuación del modelo y IV) Estimación de los valores futuros o predicción de la serie.

Todos los análisis se realizaron empleando el software estadístico R versión 3.5.1. Las librerías empleadas fueron: factoextra, forecast, ggplot2, HH, HSAUR2, MASS, reshape2, TSA, urca.

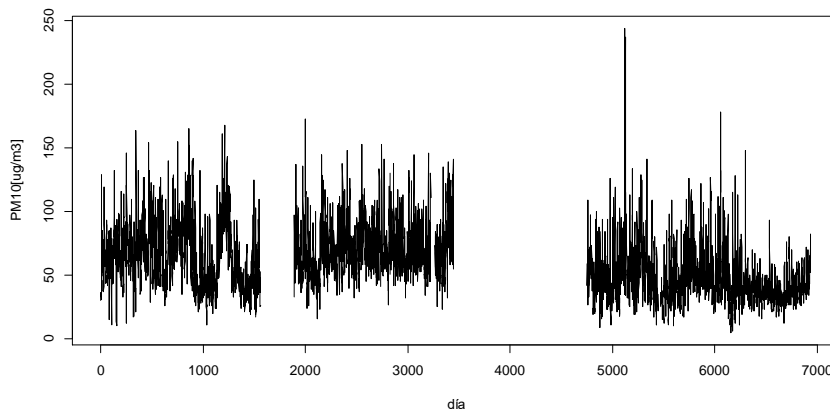
6. RESULTADOS

6.1. ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LOS DATOS

- Material particulado (PM₁₀) en Cabecera

El material particulado (PM₁₀) se encuentra como partículas sólidas y líquidas presentes en suspensión en la atmósfera⁴⁶. La serie completa, que se muestra en la Figura 2, corresponde a 5160 datos horarios (215 días) de la estación de Cabecera, con concentración media de 60 µg/m³, un máximo de 244 µg/m³ y un mínimo de 5 µg/m³. Estos datos corresponden al periodo comprendido entre el 15 de febrero y el 30 de noviembre de 2017. Sin embargo, este periodo no es continuo, ya que no existe información en los días del 21 de abril al 4 de mayo y del 9 de julio al 31 de agosto. Según estos datos es posible concluir que las concentraciones de PM₁₀ son estables durante el año, ya que nos e observa una tendencia.

Figura 2. Serie completa correspondiente a 5160 datos (215 días) de material particulado (PM₁₀) obtenidos en estación CDMB en Cabecera.



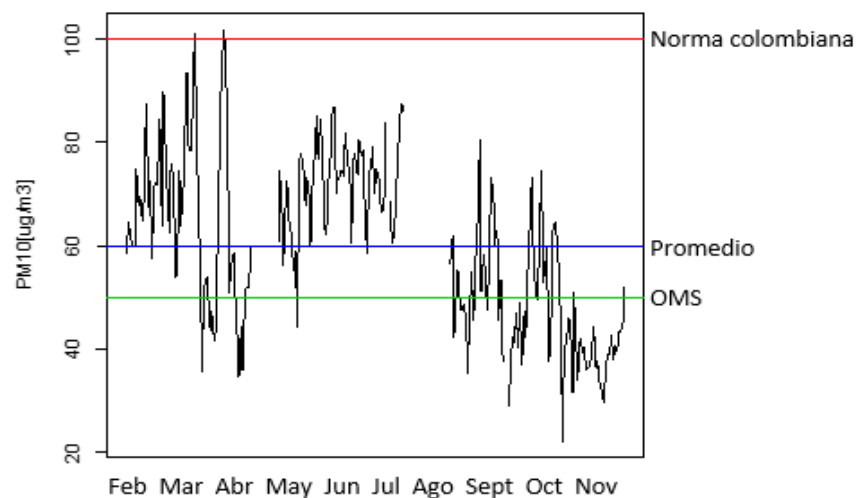
Media	60 µg/m ³
Mediana	57 µg/m ³
Máximo	244 µg/m ³
Mínimo	5 µg/m ³
Desviación	25 µg/m ³
CV	0,42

Al observar de manera general los promedios diarios de PM₁₀ a lo largo del año (Figura 3), es posible apreciar que casi durante todo el año se cumple con la norma colombiana (99,1% de los días), la cual establece un valor máximo de 100 µg/m³ para un período de 24 h y la totalidad de los datos son muy inferiores a las

⁴⁶ MÉSZÁROS E., 1999. *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*.

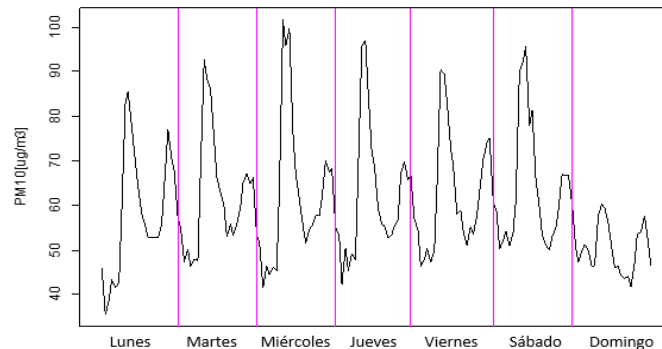
concentraciones establecidas en la resolución 610 de 2010 por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para declarar episodios de prevención ($300 \mu\text{g}/\text{m}^3$), alerta ($400 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y emergencia ($500 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Según el índice de calidad de aire que maneja la CDMB, la calidad del aire en Cabecera se encuentra entre buena y moderada ($0-154 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Sin embargo, estas concentraciones sobrepasan durante gran parte del año (68,8 % de los días) el valor máximo recomendado por la OMS que es de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Lo cual hace ver que, aunque se cumple con la norma colombiana, las concentraciones de PM_{10} presentes en el aire de Cabecera pueden representar un riesgo para la salud de las personas más vulnerables. Los días críticos corresponden al miércoles 22 de marzo ($101,42 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y el jueves 6 de abril ($101,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$), sin embargo, no existe reporte de incendio o algún otro evento en estas fechas que pudiese relacionarse con la mala calidad del aire.

Figura 3. Variación mensual de las concentraciones de PM_{10} durante 2017 en Cabecera.



Por otra parte, si se analiza la variación promedio horaria de las concentraciones de PM_{10} según el día de la semana (Figura 4), es posible notar el mismo ciclo durante el día en toda la semana, sin embargo, se observa que las concentraciones de PM_{10} el día domingo son mucho más bajas que los otros días de la semana, mientras que los días en los que se presentan los picos más altos son miércoles y jueves.

Figura 4. Perfil semanal de las concentraciones promedio de PM_{10} en Cabecera durante 2017.



Analizando el ciclo promedio horario de concentraciones de PM_{10} durante un día (Figura 5), es posible observar que existe una gran variación de las concentraciones de este contaminante a lo largo del día. Se aprecian dos picos de altas concentraciones, el pico máximo se presenta en horas de la mañana (7-8 am), mientras que el segundo pico se presenta en horas de la noche (8- 9 pm). Por otra parte, los niveles más bajos de contaminación se presentan en horas de la tarde (3 pm) y la madrugada. Este comportamiento coincide con lo reportado en diferentes estudios^{47,48,49} y se atribuye principalmente a la dinámica del flujo vehicular. Además, es importante resaltar que el pico que se presenta en la mañana es mucho mayor al de la noche, esto se atribuye a un menor volumen para la dilución de contaminantes (baja capa de mezcla atmosférica) y débil turbulencia (baja velocidad del viento) características de las primeras horas de la mañana⁵⁰.

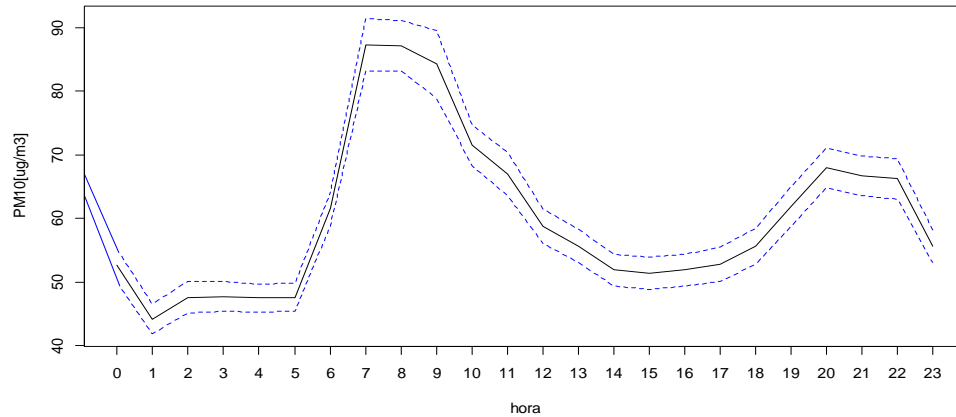
⁴⁷ MARTÍNEZ *et al.*, 2007. Contaminación atmosférica y efectos sobre la salud de la población en Medellín y su área metropolitana. Universidad de Antioquia.

⁴⁸ OPAZO D., 2011. Distribución espacial de la contaminación por material particulado y su relación con las temperaturas del aire y los vientos en Santiago para el año 2009. Universidad de Chile.

⁴⁹ GÓNZALEZ M. & TORRES C., 2015. Incidencia de las variables meteorológicas en el comportamiento de la concentración de PM_{10} y NO_x . Universidad Distrital Francisco José De Caldas.

⁵⁰ CDMB, 2017. Informe de la calidad de aire en Bucaramanga.

Figura 5. Variación diurna media de la concentración de PM_{10} en Cabecera. El intervalo de confianza corresponde al 95%.



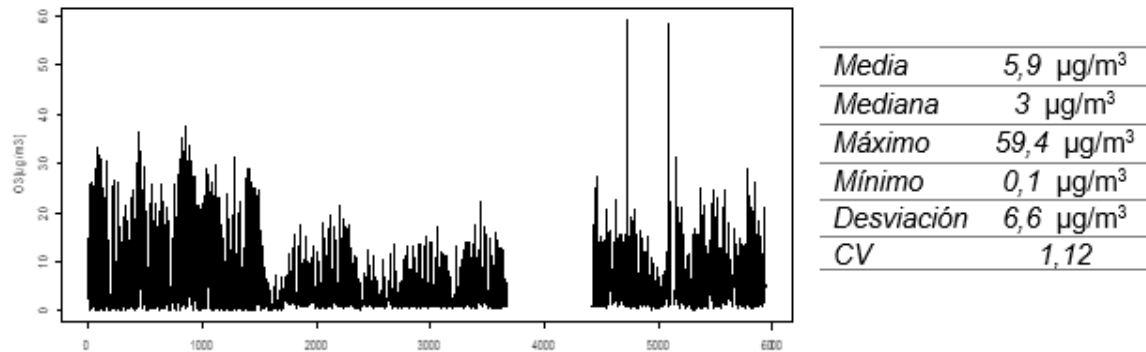
A partir de este comportamiento, se evidencia la gran diferencia entre los valores máximos ($87,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y mínimos ($44,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de este contaminante durante un día, lo cual resta representatividad al valor promedio diario ($59,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Sin embargo, en Colombia no existen normas horarias para la concentración de PM_{10} .

- Ozono (O_3)

Las concentraciones de ozono troposférico están determinadas principalmente por sus precursores, como óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, y por la radiación solar⁵¹ [50]. La serie completa, que se muestra en la Figura 6, corresponde a 5136 datos horarios (214 días) en Cabecera, con concentración media de $5,92 \mu\text{g}/\text{m}^3$, un máximo de $59,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un mínimo de $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos datos corresponden al periodo comprendido entre el 1 de marzo y el 30 de noviembre de 2017. Sin embargo, al igual que con el PM_{10} , este periodo no es continuo, ya que no existe información en el mes de agosto y del 7 de octubre al 3 de noviembre.

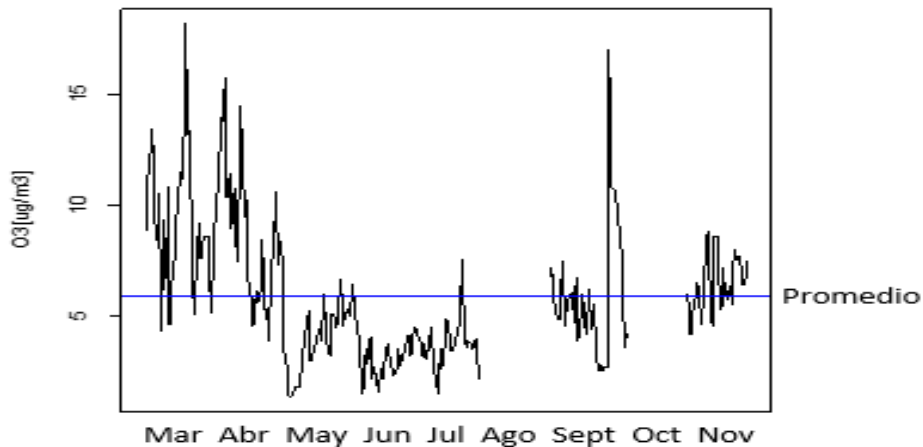
⁵¹ Boubel *et al.*, 1994. Fundamentals of Air Pollution. 3.th ed.

Figura 6. Serie completa correspondiente a 5136 datos (214 días) de ozono (O_3) obtenidos en estación CDMB en Cabecera.



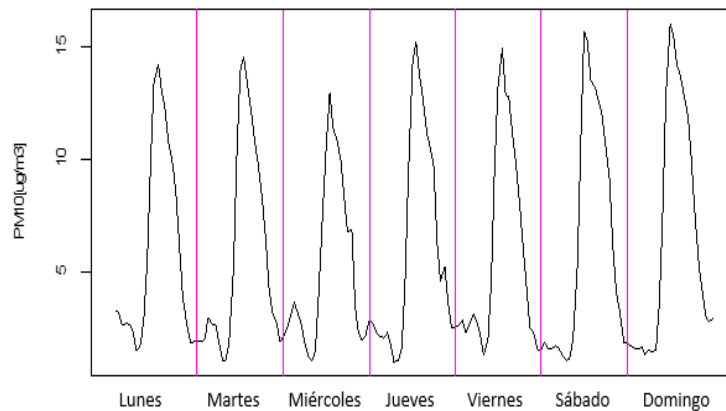
Al observar los promedios diarios de O_3 a lo largo del año (Figura 7), es posible apreciar una gran variación respecto a la media, las concentraciones más altas se presentaron entre marzo y abril y en septiembre, mientras que las más bajas se registraron entre mayo y julio. Sin embargo, en Colombia, no existe regulación para las concentraciones diarias máximas de este contaminante.

Figura 7. Variación mensual de las concentraciones de O_3 durante 2017 en Cabecera.



Por otra parte, al analizar la variación promedio horaria de las concentraciones de O_3 según el día de la semana (Figura 8), se observa un comportamiento muy similar durante los siete días, sin embargo, se aprecia que los picos más altos se presentan durante el fin de semana (sábado y domingo) y el pico más bajo el día miércoles.

Figura 8. Perfil semanal de las concentraciones promedio de O₃ en Cabecera durante 2017.



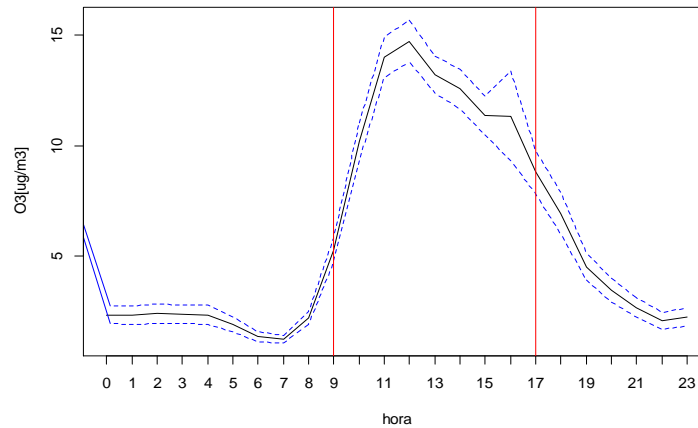
Adicionalmente, al analizar el ciclo promedio horario de concentraciones de O₃ durante un día (Figura 9), se observa que presenta un comportamiento en forma de campana, cuyas concentraciones más altas, para un periodo de 8 h, se registran entre las 9 am y las 5 pm. Mientras que los niveles más bajos se registran en la madrugada. Este comportamiento coincide con lo reportado por diferentes autores^{52,53,54} y se atribuye principalmente a factores meteorológicos como la radiación solar. Por otra parte, tanto la regulación colombiana como la OMS establecen un nivel máximo de O₃ de 100 µg/m³ para un periodo de 8 h, teniendo en cuenta estos límites, se puede concluir que las concentraciones de O₃ en Cabecera no representan un riesgo considerable para la salud de las personas.

⁵² JARAMILLO *et al.*, 2006. Análisis de series de tiempo univariante aplicando metodología de Box-Jenkins para la predicción de ozono en la ciudad de Cali, Colombia.

⁵³ MARTÍNEZ *et al.*, 2007. Contaminación atmosférica y efectos sobre la salud de la población en Medellín y su área metropolitana. Universidad de Antioquia.

⁵⁴ GÓNZALEZ V., 2016. Análisis del efecto de ozono de fin de semana en Bogotá. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental.

Figura 9. Variación diaria media de la concentración de O_3 . El intervalo de confianza corresponde al 95%.



En general, se puede concluir que existen ciclos diarios en las concentraciones de PM_{10} y O_3 con gran diferencia entre los valores máximos y los mínimos. Así como algunas diferencias en los niveles de concentraciones para los días entre semana respecto a los fines de semana y un comportamiento estable a lo largo del año.

6.2 ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LAS CONCENTRACIONES DE PM_{10} Y O_3 Y LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS.

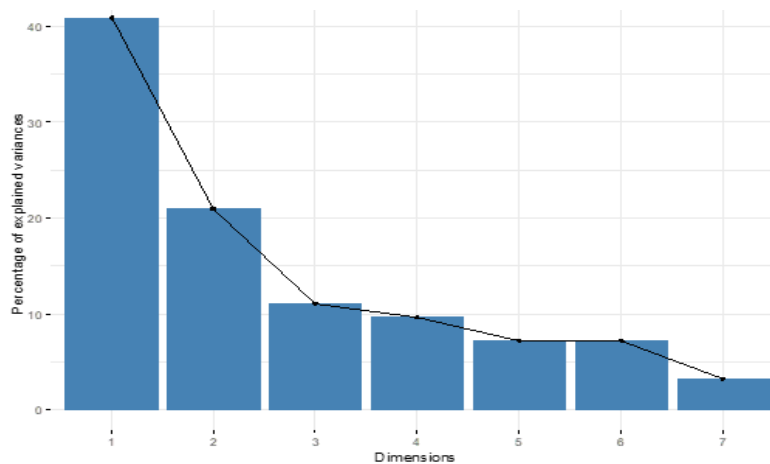
Las condiciones meteorológicas ejercen gran influencia en el transporte, dispersión y remoción de contaminantes en la atmósfera. En la Tabla 3 se presentan un resumen de las variables meteorológicas.

Tabla 3. Resumen de las variables meteorológicas.

	Viento [m/s]	Temperatura [°C]	HR [%]	Presión [mb]	Radiación [w/m ²]
Media	4,3	10,6	85,7	711,1	187,8
Mediana	4,1	10,2	88	711	10
Máximo	12,3	16,9	100	714	1010
Mínimo	0	3,6	40	708	0
Desviación	2,7	2,5	10,9	0,9	260,5
CV [%]	63,9	23,2	12,7	0,1	138,7

Se realizó un análisis de componentes principales, empleando los datos horarios normalizados de material particulado (PM₁₀), ozono (O₃), radiación solar, humedad relativa (HR), precipitación, velocidad de viento y temperatura. Como se observa en la Figura 10, con 4 de las 7 componentes principales es posible explicar el 82,4 % de la varianza total de los datos.

Figura 10. Porcentaje de varianza explicada por las componentes principales.



Los pesos de cada una de las variables en las 4 componentes principales se presentan en la Tabla 4. Como se observa, en el primer componente las variables que tienen mayor peso son la temperatura, la radiación, la HR y el O₃, para el segundo componente las variables de mayor peso son el viento, la presión y el PM₁₀, mientras que para el tercer componente son viento y PM₁₀ y en el cuarto presión y PM₁₀.

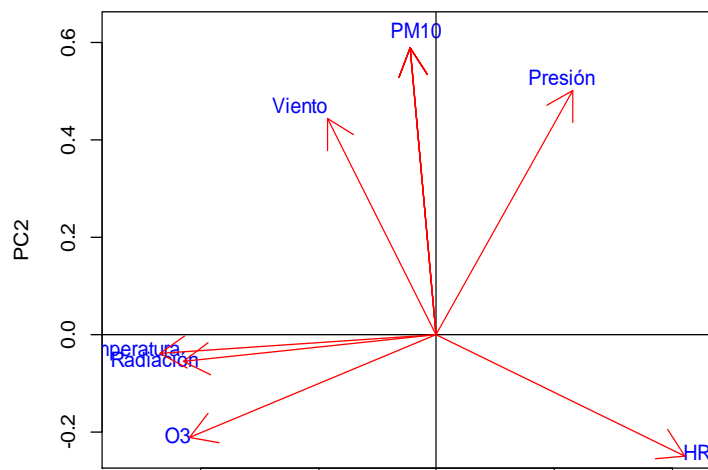
Tabla 4. Aporte de las variables a las componentes principales.

	PC1	PC2	PC3	PC4
Viento	0,234	0,474	-0,755	0,014
Temperatura	0,529	-0,028	0,215	-0,014
HR	-0,442	-0,237	0,143	0,147
Presión	-0,212	0,531	0,314	-0,746
Radiación	0,480	-0,045	0,232	-0,109
O3	0,440	-0,201	0,152	-0,132
PM10	0,034	0,627	0,434	0,626

Como se observa en la Tabla 4, en el primer componente las variables que tienen mayor peso son la temperatura, la radiación, la HR y el O₃, para el segundo componente las variables de mayor peso son el viento, la presión y el PM₁₀, mientras que para el tercer componente son viento y PM₁₀ y en el cuarto presión y PM₁₀. Con base en esto, los componentes podrían interpretarse como:

- Factor precursores de esmog fotoquímico (temperatura, radiación solar, HR y O₃)
- Factor dispersión de partículas (viento, presión y PM₁₀)
- Factor viento (viento, PM₁₀)
- Factor presión (presión, PM₁₀)

Figura 11. Componentes principales.

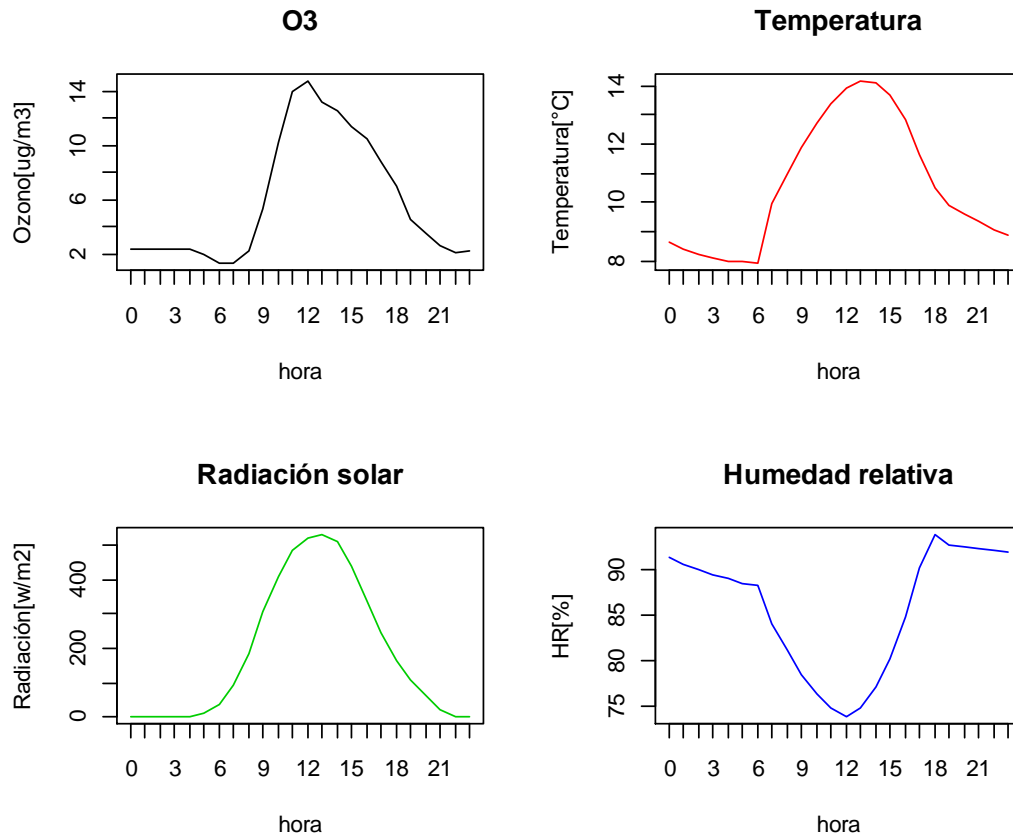


Como se observa en la Figura 11, para el primer componente existe una relación directa entre temperatura, radiación solar y concentración de O₃ y una relación inversa respecto a la humedad relativa (HR). En cuanto a las tres variables de mayor peso en la componente 2, presentan una relación directa.

El ozono, es considerado uno de los principales contaminantes fotoquímicos y se encuentra altamente relacionado con las variables meteorológicas de mayor peso en el primer factor. Al comparar el comportamiento horario durante 2017 de estas

variables, mediante coeficientes de correlación de Pearson, con respecto a la concentración de O_3 , la correlación encontrada fue con temperatura (0,59), para la radiación (0,50) y respecto a la humedad relativa (-0,40). El comportamiento horario de cada una de estas variables se presenta en la Figura 12.

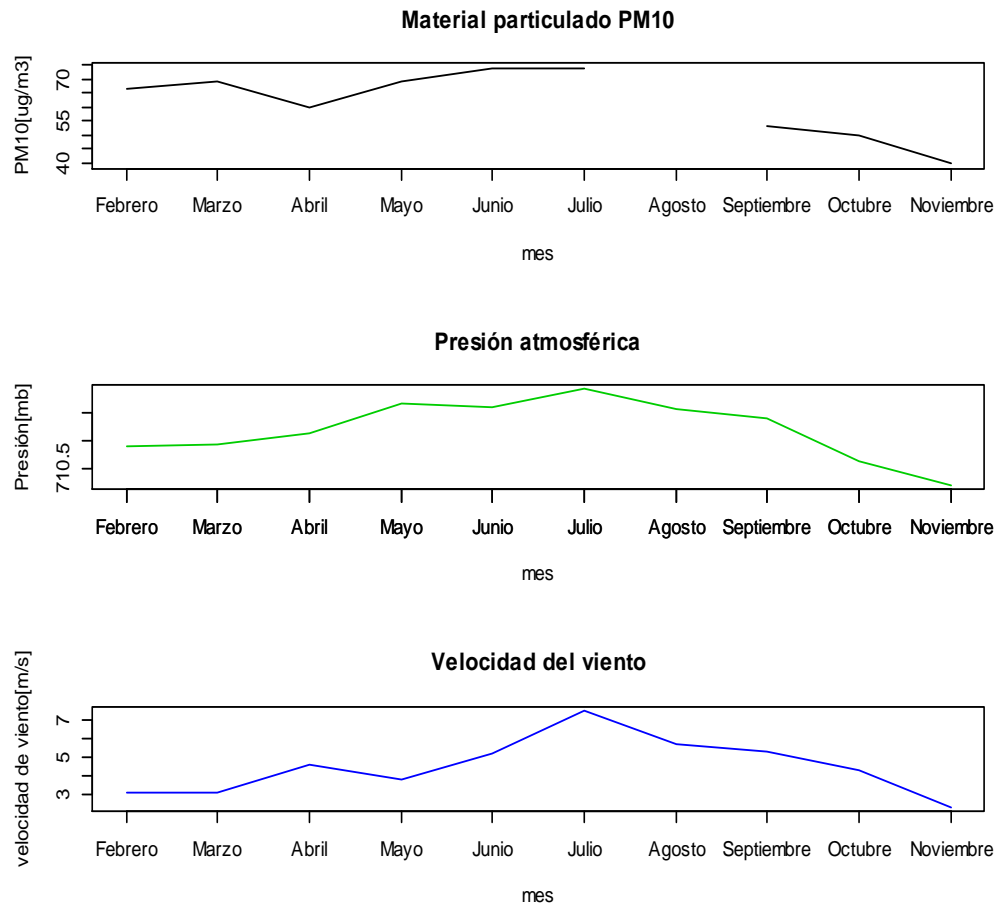
Figura 12. Variación promedio horaria de la concentración de O_3 , temperatura, radiación solar y humedad relativa en Cabecera durante 2017.



Por otra parte, el material particulado grueso PM_{10} , se encuentra principalmente relacionado con otro tipo de variables atmosféricas, como el viento y la presión. Sin embargo, la correlación horaria de este tipo de variables es baja (0,22) y (0,26) respectivamente, ya que en este caso no se presentan ciclos horarios, sino mensuales. El comportamiento mensual de cada una de estas variables se observa a continuación (Figura 13). Aunque el comportamiento de estas variables no es muy claro, es posible observar que en meses como febrero y marzo donde se presenta la mayor concentración de PM_{10} , se registran valores bajos de presión y viento.

Mientras que en meses como mayo y abril la relación entre PM_{10} y presión es directa e inversa a la velocidad del viento. Sin embargo, en meses como julio y noviembre, la relación entre estas tres variables es directa.

Figura 13. Variación promedio mensual de la concentración de PM_{10} , presión atmosférica y velocidad de viento en Cabecera durante 2017.



Adicionalmente, la tercera y cuarta componente presentan una relación opuesta del viento y la presión con las concentraciones de PM_{10} , este comportamiento coincide con resultados de otras investigaciones⁵⁵. El efecto del viento se relaciona con la dinámica de dispersión de contaminantes, ya que, a velocidades de viento más

⁵⁵ RAMOS *et al.*, 2007. Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de Chiapas, México.

altas, las masas de aire contaminado se desplazan más rápidamente⁵⁶. En cuanto a la presión, estudios como el realizado por Salini & Medina (2015)⁵⁷ relacionan la disminución en la presión de aire con aumento en la contaminación generada por el parque automotor. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, aunque algunas variables meteorológicas estén más fuertemente relacionadas que otras con la concentración de contaminantes, es la interacción entre todas estas la que conforma el entorno que propicia la formación y dispersión de contaminantes en la atmósfera.

6.3 COMPARACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE PM₁₀ Y O₃ EN CABECERA, FLORIDABLANCA Y REAL DE MINAS.

La dispersión de contaminantes atmosféricos, hace que la contaminación generada en un punto de la ciudad repercute sobre la calidad de aire que se respira en diferentes zonas. Con el fin de analizar la relación entre las concentraciones de PM₁₀ y O₃ en Cabecera, Floridablanca y Real de Minas, se emplearon coeficientes de correlación de Pearson y gráficas del comportamiento de estos contaminantes en el tiempo. En la tabla 5 se presenta el resumen de las concentraciones de PM₁₀ registradas en cada una de las estaciones.

Tabla 5. Resumen de las concentraciones de PM₁₀ medidas en cada una de las estaciones.

	Cabecera	Floridablanca	Real de Minas
Media	60 µg/m ³	63 µg/m ³	32 µg/m ³
Mediana	57 µg/m ³	62 µg/m ³	31 µg/m ³
Máximo	244 µg/m ³	112 µg/m ³	75 µg/m ³
Mínimo	5 µg/m ³	9 µg/m ³	15 µg/m ³
Desviación	25 µg/m ³	14 µg/m ³	9 µg/m ³
CV	0,42	0,23	0,29

De esta tabla, se puede concluir que la concentración promedio más alta de PM₁₀ se presenta en

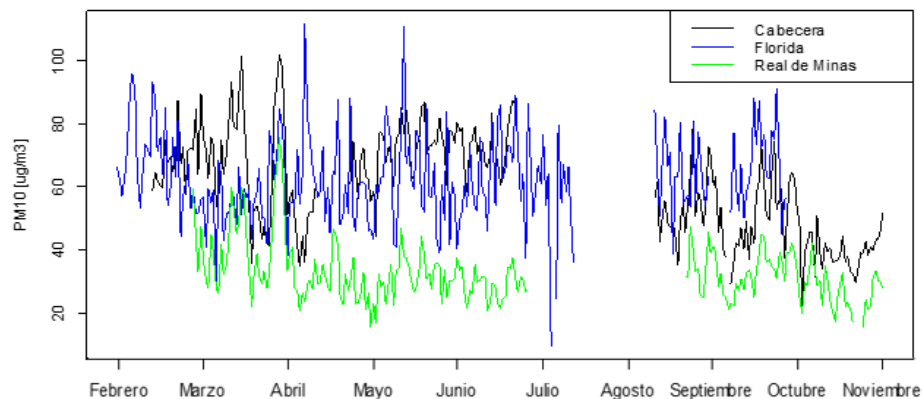
⁵⁶ SIERRA M., 2006. Establecer la asociación existente entre las variables meteorológicas temperatura, velocidad del viento y precipitación y las concentraciones de PM₁₀ registradas en la red de calidad del aire de Bogotá D.C. Universidad de la Salle.

⁵⁷ SALINI G. & MEDINA E., 2015. Estudio sobre la dinámica temporal de material particulado pm10 emitido en Cochabamba, Bolivia.

Floridablanca, sin embargo, los episodios de concentraciones horarias más altas se presentan en Cabecera, además de ser la zona con mayor coeficiente de variación. Lo cual se atribuye a que esta zona de la ciudad se encuentra entre las que presenta los mayores niveles de congestión vehicular en la ciudad (POT 2014-2027)⁵⁸.

En la Figura 14, se presentan las concentraciones promedio diarias de PM₁₀ durante 2017 en Cabecera, Floridablanca y Real de minas. Es posible observar que en la estación de Floridablanca se registran concentraciones muy similares en cuanto a magnitud comparado con las de Cabecera, mientras que las concentraciones en Real de Minas son claramente inferiores a las de estas dos estaciones. Para las 3 estaciones se evidencian comportamientos cíclicos semanales y mensuales, y una tendencia estable a lo largo del año.

Figura 14. Concentración de PM₁₀ durante 2017 en Cabecera, Floridablanca y Real de Minas.



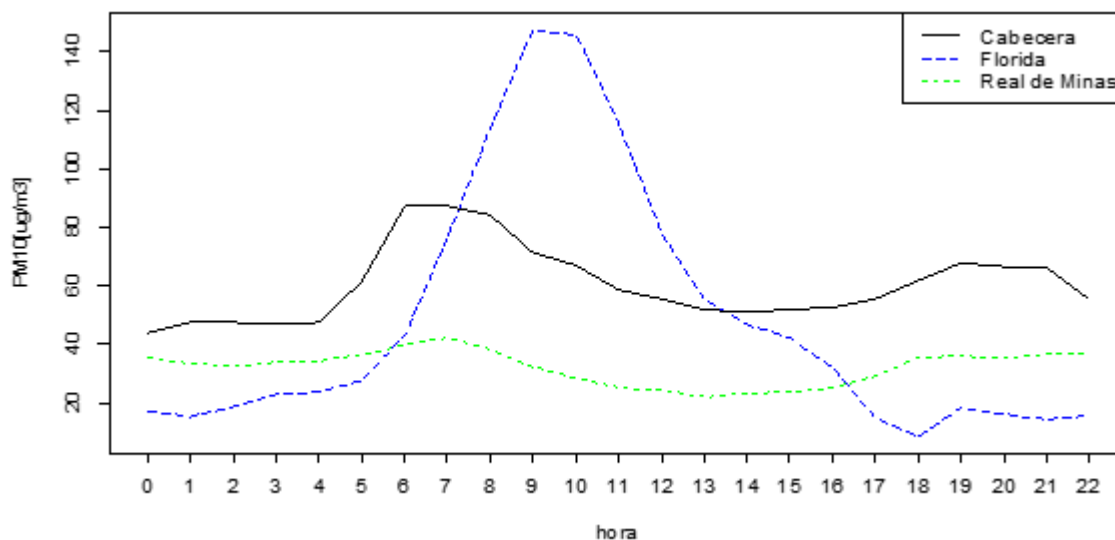
Por otra parte, analizando el ciclo diario de este contaminante (Figura 15) se observa que el comportamiento en Cabecera y Real de minas es bastante similar (Coeficiente de correlación de 0,62), con picos entre las 6 - 8 am y las 7 – 9 pm, lo cual coincide con el comportamiento reportado en el último informe de calidad de aire de la ciudad de Bucaramanga CDMB (2017)⁵⁹. Mientras que, en la estación de

⁵⁸ ALCALDÍA DE BUCARAMANGA. Plan de Ordenamiento Territorial de Bucaramanga 2013 – 2027. Informe técnico.

⁵⁹ CDMB, 2017. Informe de la calidad de aire en Bucaramanga.

Floridablanca, se presenta un comportamiento mucho más variable (Con un pico pronunciado entre las 8 am y la 1 pm), lo cual se refleja en un coeficiente de correlación bajo (0,04) entre estas dos estaciones. Este comportamiento variable se atribuye principalmente a la diferencia en las actividades antropogénicas de cada sector, ya que según el POT (2014-2027)⁶⁰ Floridablanca se clasifica como una zona principalmente residencial, lo cual se relaciona con tráfico vehicular medio, y asociado a horas en las que las personas salen de su casa al trabajo y retornan a ellas para el almuerzo y en la noche. Mientras que Cabecera y Real de Minas que se clasifican como zonas comerciales y de servicios, por lo cual se relacionan con un tráfico vehicular constante, además de emisiones por fuentes fijas como restaurantes, carpinterías y talleres de motocicletas, entre otros.

Figura 15. Perfil diario de las concentraciones promedio de PM₁₀ durante 2017 en Cabecera, Floridablanca y Real de Minas.



En cuanto al O₃, solo fue posible comparar dos estaciones (Bucaramanga y Floridablanca), ya que no existe información para la estación de Real de Minas en

⁶⁰ ALCALDÍA DE BUCARAMANGA. Plan de Ordenamiento Territorial de Bucaramanga 2013 – 2027. Informe técnico.

2017. En la Tabla 6 se presenta el resumen de las concentraciones medidas en cada una de las estaciones.

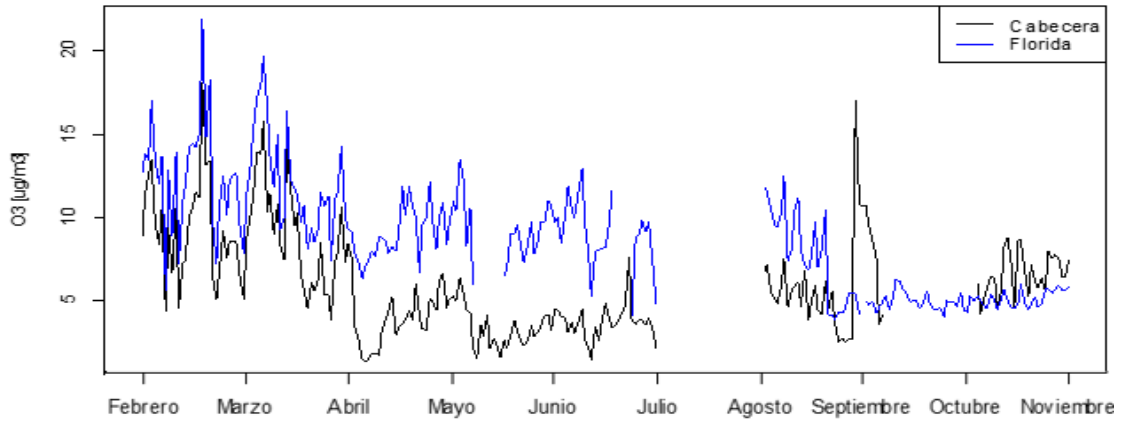
Tabla 6. Resumen de las concentraciones de O₃ registradas en cada una de las estaciones.

	Cabecera	Floridablanca
Media	5,9 µg/m ³	9,9 µg/m ³
Mediana	3 µg/m ³	5 µg/m ³
Máximo	59,4 µg/m ³	61 µg/m ³
Mínimo	0,1 µg/m ³	1 µg/m ³
Desviación	6,6 µg/m ³	9,4 µg/m ³
CV	1,12	0,95

en la Figura 16 se observa que, las concentraciones de O₃ durante 2017 son mayores en la estación de Floridablanca (a excepción de un pico presentado en el mes de octubre en la estación de Cabecera). Esta diferencia en las concentraciones puede ser debido a una mayor cercanía entre Floridablanca y la principal zona industrial de Bucaramanga y su Área Metropolitana (Girón), ya que la actividad industrial se atribuye como una de las principales fuentes de contaminantes precursores de O₃⁶¹. De manera general, las concentraciones más altas de contaminantes se relacionan con las actividades antropogénicas de cada sector.

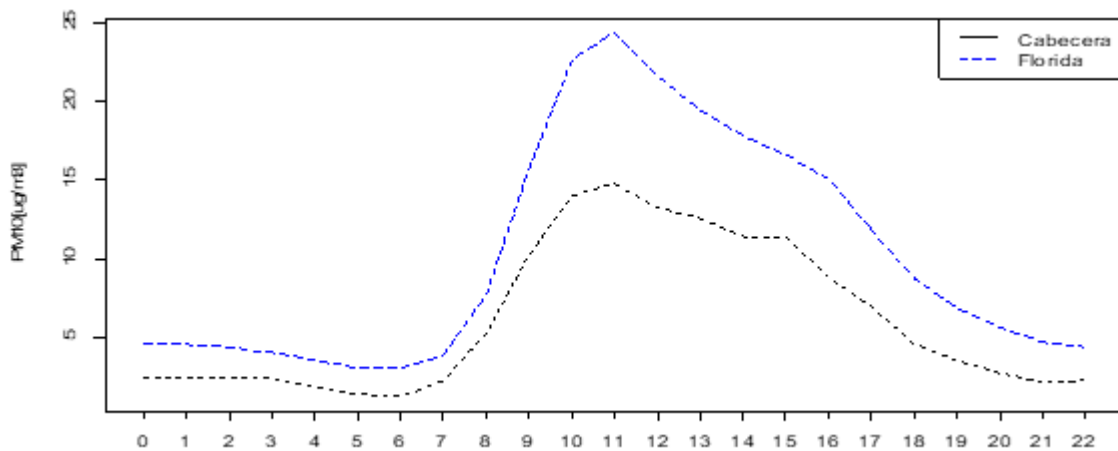
⁶¹ GÓNZALEZ V., 2016. Análisis del efecto de ozono de fin de semana en Bogotá. Universidad Nacional de Colombia.

Figura 16. Concentración de O₃ durante 2017 en Cabecera y Floridablanca.



Sin embargo, como se observa en la Figura 17, la concentración de este contaminante presenta el mismo patrón de comportamiento a lo largo del año en ambos puntos (coeficiente de correlación de 0,56), presentando las mayores concentraciones entre las 8 am y las 4 pm, y las más bajas en horas de la madrugada.

Figura 17. Perfil diario de las concentraciones promedio de O₃ durante 2017 en Cabecera y Floridablanca.



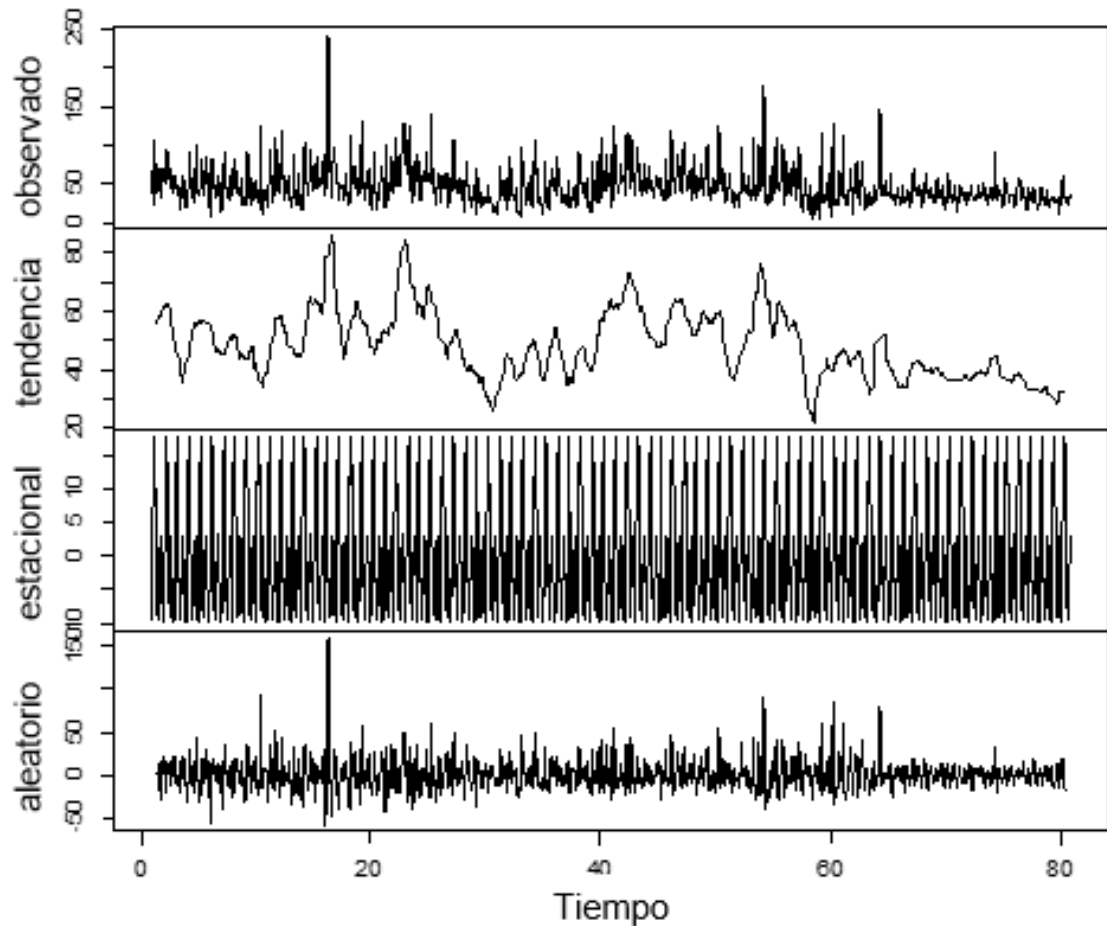
Este hecho, se atribuye principalmente a la dispersión de los contaminantes por el viento. Es importante tener en cuenta que la atmosfera es un sistema dinámico y por tanto la contaminación generada en un punto de la ciudad, puede llegar a afectar otros sectores, debido a la dinámica de dispersión de contaminantes.

6.4 PLANTEAMIENTO DE UN MODELO Y PREDICCIÓN DE VALORES FUTUROS PARA LAS CONCENTRACIONES DE PM₁₀ EN CABECERA.

l) Análisis descriptivo de la serie seleccionada

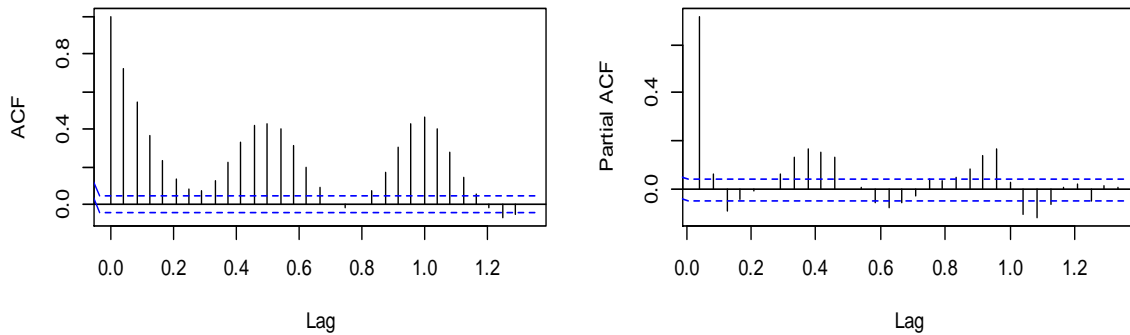
Teniendo en cuenta la serie de PM₁₀ para Cabecera, se seleccionó el periodo comprendido entre el 1 de septiembre y el 30 de noviembre, tomando los primeros 81 días para realizar la predicción del modelo (1944 datos) y los 10 días restantes (240 datos) para la validación del mismo. Teniendo en cuenta el análisis de datos atípico, el dato 1138 se eliminó. Como se observa en la Figura 18, la serie es estacionaria en media (no presenta tendencia) y tiene una fuerte componente estacional (ciclos diarios y mensuales).

Figura 18. Descomposición por el método aditivo, de la serie de tiempo de PM_{10} para el periodo comprendido entre el 1 de septiembre y el 20 de noviembre (81 días) de 2017 en Cabecera.



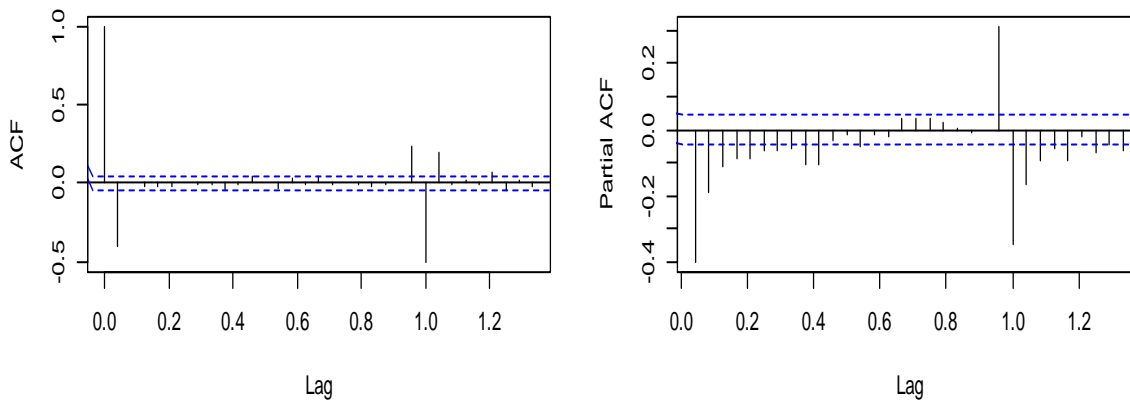
Se realizó la prueba de Dickey-Fuller y no se detectó presencia de raíces unitarias (p -valor $< 0,05$), por tanto, se concluye que la serie si es estacionaria en media. Por otra parte, para lograr heterocedasticidad, se aplicó una transformación Box-Cox ($\lambda = -0,085$). En la Figura 19 se observan los correlogramas de la serie transformada. Sin embargo, en estos se observa que hay presencia de ciclos.

Figura 19. Correlogramas de la serie de tiempo transformada para PM_{10} en el periodo comprendido entre el 1 de septiembre y el 20 de noviembre (81 días) de 2017 en Cabecera.



Posteriormente, se aplicó primera diferencia en la parte estacional con un retraso de 24, con el fin de eliminar los ciclos diarios y una segunda diferencia con un retraso de 1. Los correlogramas obtenidos después de estas diferencias se presentan en la Figura 20.

Figura 20. Correlogramas de la serie de tiempo transformada y diferenciada en la parte estacional para PM_{10} en el periodo comprendido entre el 1 de septiembre y el 20 de noviembre (81 días) de 2017 en Cabecera.



Teniendo en cuenta el comportamiento de los correlogramas, el modelo puede ser de tipo MA2, ya que el correlograma parcial cae lentamente a cero y el correlograma simple presenta 2 líneas significativas. Sin embargo, esto se comprobará mediante diferentes combinaciones y evaluación de los coeficientes.

II) Identificación del modelo

Se plantearon diversas combinaciones para el modelo ARIMA, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 7, donde p, d y q son el orden en del modelo autorregresivo (AR), la diferencia y el orden del modelo de promedio móvil (MA) respectivamente en la parte estacional y P, D y Q en la parte estacional.

Tabla 7. Resumen de resultados obtenidos mediante diferentes modelos ARIMA para la serie de tiempo de PM_{10} en el periodo comprendido entre el 1 de septiembre y el 20 de noviembre (81 días) de 2017 en Cabecera.

MODELO (p,d,q) (P,D,Q)	R ²	AIC	OBSERVACIONES
(1,0,0) (1,1,0)	0,47	245,4	Queda información sin explicar.*
(2,0,0) (1,1,0)	0,49	151,3	
(2,0,0) (2,1,0)	0,54	11,62	
(3,0,0) (1,1,0)	0,50	146,22	
(3,0,0) (2,1,0)	----	----	No son significativos todos los coeficientes.
(0,0,1) (1,1,0)	0,38	553,16	Queda información sin explicar.*
(0,0,1) (2,1,0)	0,42	431,52	Queda información sin explicar.*
(0,0,2) (2,1,0)	0,48	217,98	Queda información sin explicar.*
(0,0,2) (0,1,1)	0,55	-9,85	Queda información sin explicar.*
(0,0,2) (0,1,2)	0,55	-13,76	Queda información sin explicar.*
(1,0,1) (1,1,0)	0,50	142,69	
(1,0,2) (1,1,0)	----	----	No son significativos todos los coeficientes.
(2,0,1) (1,1,0)	----	----	No son significativos todos los coeficientes.
(1,0,1) (0,1,1)	0,6	-256,05	
(1,0,1) (1,1,1)	0,6	-258,72	

*Teniendo en cuenta el periodograma integrado.

Para escoger el mejor modelo, se tomaron como parámetros el coeficiente de determinación R^2 y el criterio de información de Akaike (AIC), además de que se explicará toda la información posible del modelo.

De las diferentes combinaciones evaluadas, se encontró que con varios de los modelos queda información de la serie sin explicar y que en algunos de estos los coeficientes del modelo no son significativos. Por otra parte, los modelos cuyos coeficientes si son significativos y lograron explicar la totalidad de la información de la serie, presentan coeficientes de determinación R^2 entre 0,49 y 0,6, y una diferencia más marcada en el valor de AIC, ya que varía entre 11,6 y 258,7. Con base en esto se determinó que el mejor modelo para explicar el comportamiento de PM_{10} en Cabecera es un ARIMA (2,0,0) (2,1,0)^[24].

III) Estimación y adecuación del modelo

Modelo seleccionado:

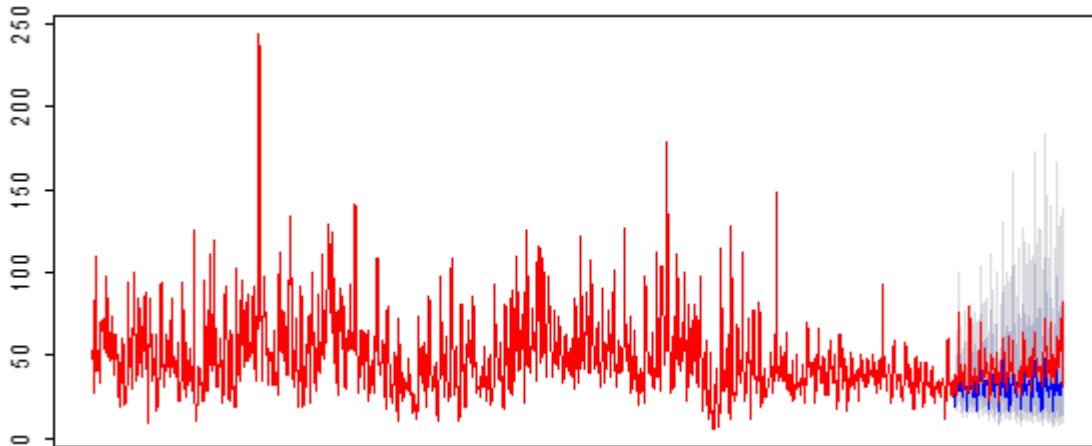
$$(PM_{10})_t = 0,48(PM_{10})_{t-1} + 0,21(PM_{10})_{t-2} + 1 + 0,63(PM_{10}^S) + 0,27(PM_{10}^{2S}) + \varepsilon_t$$

Este modelo presenta una varianza estimada de 0,058, AIC = 11,6 y permite explicar el 54% de la varianza de los valores de PM_{10} en Cabecera. Para comprobar que este modelo explica toda la información posible de la serie, se realizó el test de Box-Ljung para aleatoriedad de residuos, mediante el cual se determinó a un nivel de confianza de 95 %, que los residuos del modelo son aleatorios (p-valor = 0,59). Por otra parte, los residuos no cumplen con el supuesto de normalidad. Sin embargo, es posible predecir valores futuros, ya que la normalidad es necesaria en caso de hacer inferencias y extender conclusiones a otros ambientes, pero la ausencia de esta no afecta el forecast de la serie y, por tanto, para la estimación del modelo no es necesario cumplir este supuesto.

IV) Estimación de los valores futuros o predicción de la serie.

Como se observa en la Figura 21, mediante el modelo escogido, se logra una buena aproximación de los valores obtenidos teóricamente y las concentraciones medidas, para un lapso de diez días.

Figura 21. Predicción de valores mediante el uso de un modelo ARIMA (2,0,0)(2,1,0)_[24].



En estudios similares, como el realizado por Fajardo et al., (2013)⁶²[61] se obtuvo un modelo ARIMA (0,1,2)(0,1,1)_[52] con el cual se lograban predicciones hasta de 2 años de las concentraciones de PM₁₀, basado en los registros de las concentraciones de los 10 años anteriores en la ciudad de Bucaramanga.

6.5 PLANTEAMIENTO DE UN MODELO Y PREDICCIÓN DE VALORES FUTUROS PARA LAS CONCENTRACIONES DE O₃ EN CABECERA.

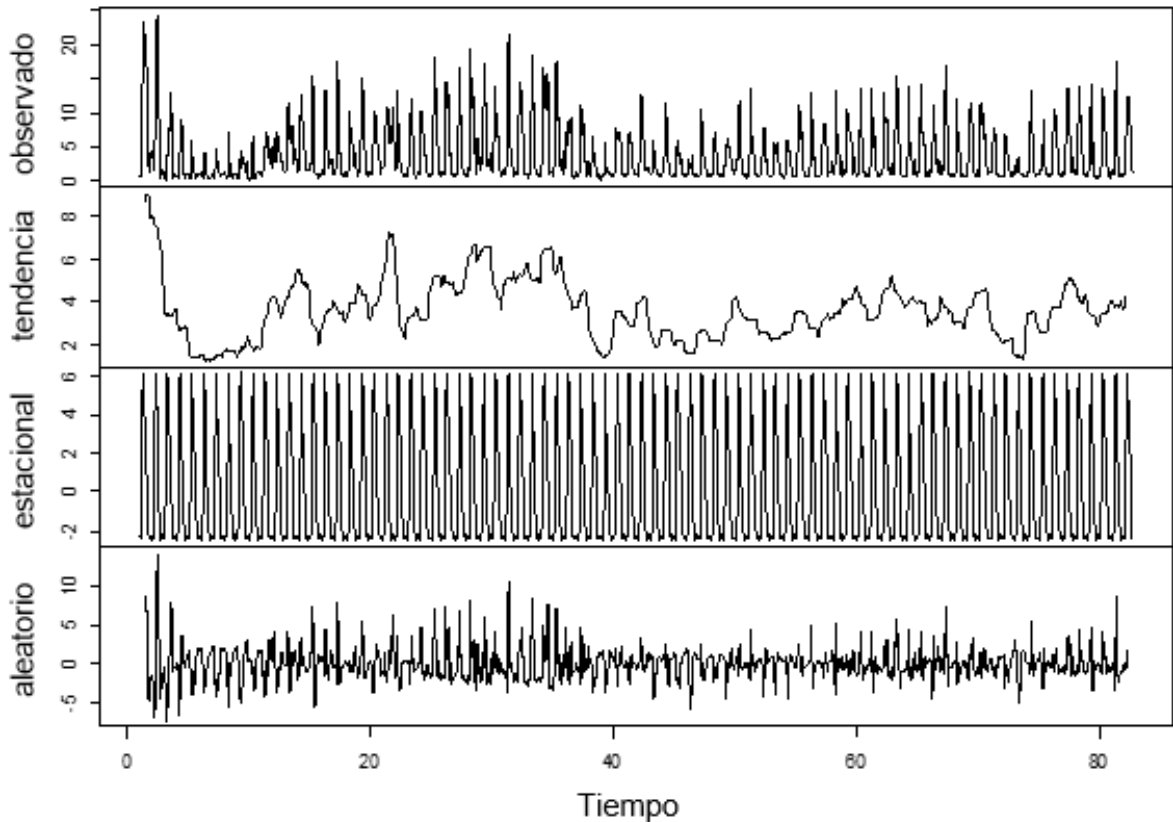
1) Análisis descriptivo de la serie seleccionada

Para el modelo de concentración de O₃ para Cabecera, se seleccionó el periodo comprendido entre el 1 de mayo y el 31 de julio, tomando los primeros 82 días para

⁶² Fajardo *et al.*, 2013. 'Política ambiental de restricción vehicular e implementación de SITM en la concentración de contaminantes atmosféricos en la zona centro de Bucaramanga, Colombia. Un análisis de intervención.

realizar la predicción del modelo (1968 datos) y los 10 días restantes (240 datos) para la validación del mismo. Teniendo en cuenta el análisis de datos atípicos se eliminó la observación 19.

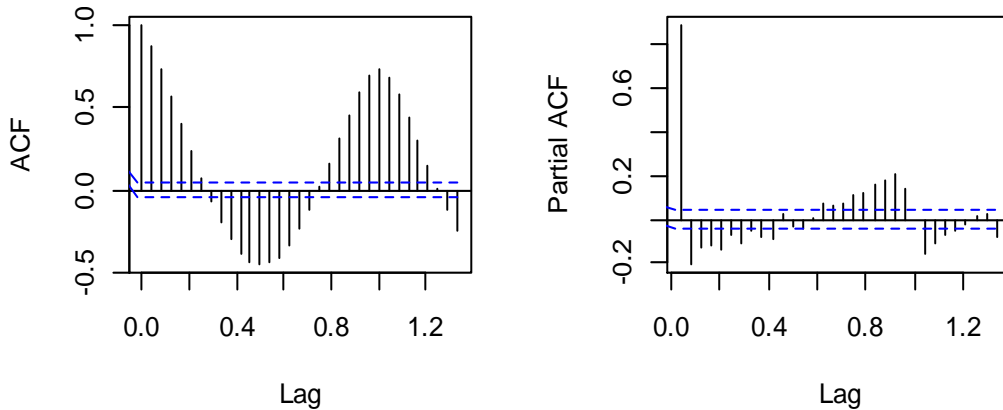
Figura 22. Descomposición por el método aditivo, de la serie de tiempo de O_3 para el periodo comprendido entre el 1 de septiembre y el 20 de noviembre (81 días) de 2017 en Cabecera.



En la Figura 22, se observa que no la serie es estacionaria en media (no presenta tendencia), sin embargo, no es estacionaria en varianza (heterocedástica) y es estacional (presenta ciclos horarios). Se realizó la prueba de Dickey-Fuller y no se detectó presencia de raíces unitarias (p -valor $< 0,05$), por tanto, se concluye que la serie si es estacionaria en media. Mientras que para lograr heterocedasticidad, se aplicó una transformación Box-Cox ($\lambda = -0,06$). En la Figura 23 se observan los

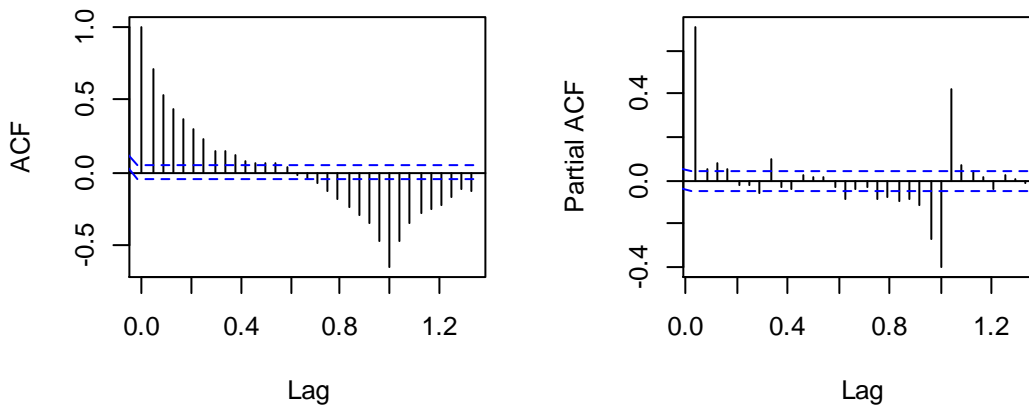
correlogramas de la serie transformada. Sin embargo, en estos, al igual que sucede con el PM_{10} , se observa que hay presencia de ciclos.

Figura 23. Correlogramas de la serie de tiempo transformada para O_3 en el periodo comprendido entre el 1 de septiembre y el 20 de noviembre (81 días) de 2017 en Cabecera.



Posteriormente, se aplicó primera diferencia en la parte estacional con un retraso de 24, con el fin de eliminar los ciclos diarios. Los correlogramas obtenidos después de estas diferencias se presentan a continuación (Figura 24).

Figura 24. Correlogramas de la serie de tiempo transformada y diferenciada en la parte estacional para O_3 en el periodo comprendido entre el 1 de septiembre y el 20 de noviembre (81 días) de 2017 en Cabecera.



Teniendo en cuenta el comportamiento de los correlogramas, el modelo puede ser de tipo AR2, ya que el correlograma simple cae lentamente a cero y el correlograma

parcial presenta 2 líneas significativas. Sin embargo, esto se comprobará mediante diferentes combinaciones y evaluación de los coeficientes.

II) Identificación del modelo

Al igual que con el PM₁₀, para el modelo ARIMA de O₃ se plantearon diversas combinaciones, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 8. Se tuvieron en cuenta los mismos parámetros de selección, coeficiente de determinación R² y el criterio de información Akaike (AIC), además del periodograma integrado.

Tabla 8. Resumen de resultados obtenidos mediante diferentes modelos ARIMA para la serie de tiempo de O₃ en el periodo comprendido entre el 1 de septiembre y el 20 de noviembre (81 días) de 2017 en Cabecera.

MODELO (p,d,q) (P,D,Q)	R²	AIC	OBSERVACIONES
(1,0,0) (1,1,0)	0,80	2261,46	Queda información sin explicar.*
(2,0,0) (1,1,0)	0,80	2251,28	
(2,0,0) (2,1,0)	---	---	No hay convergencia.
(3,0,0) (1,1,0)	---	---	No son significativos todos los coeficientes.
(0,0,1) (1,1,0)	0,74	2787,11	Queda información sin explicar.*
(0,0,1) (2,1,0)	0,76	2660,55	Queda información sin explicar.*
(0,0,2) (2,1,0)	0,79	2369,45	Queda información sin explicar.*
(0,0,2) (0,1,1)	0,82	2074,16	Queda información sin explicar.*
(0,0,2) (0,1,2)	0,82	2047,32	Queda información sin explicar.*
(1,0,1) (1,1,0)	0,80	2248,53	
(1,0,2) (1,1,0)	0,80	2242,43	
(2,0,1) (1,1,0)	0,80	2241,01	
(1,0,1) (0,1,1)	0,85	1763,57	
(1,0,1) (1,1,1)	0,85	1757,69	
(2,0,1) (2,1,0)	0,82	2082,46	
(2,0,1)(1,1,1)	0,85	1734,46	
(2,0,1)(2,1,1)	---	---	No son significativos todos los coeficientes.

*Teniendo en cuenta el periodograma integrado.

Como se observa en la Tabla 8, varios de los modelos analizados no logran explicar la totalidad de la información que contiene la serie de O_3 , en uno de los casos el modelo no logra la convergencia, y en 2 no son significativos los coeficientes evaluados. Dentro de los modelos que si cumplen con los requisitos de convergencia y significancia, existe una gran similitud en los valores de R^2 que se encuentran entre 0,8 y 0,85, mientras que los valores de AIC oscilan entre 1734,5 y 2251,3. Con base en esto se determinó que el mejor modelo para explicar el comportamiento de O_3 en Cabecera es un ARIMA (2,0,1) (1,1,1)_[24], el cual presenta un R^2 de 0,85 y un AIC de 1734,5.

III) Estimación y adecuación del modelo

Modelo seleccionado:

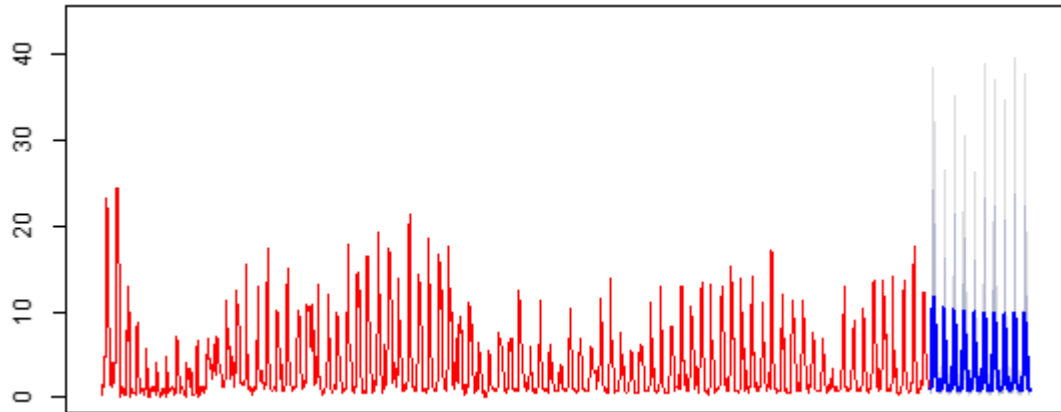
$$(O_3)_t = 1,59(O_3)_{t-1} - 0,61(O_3)_{t-2} - 0,89\varepsilon_{t-1} + 1 - 0,09(O_3^S) + 0,92(\varepsilon_{t-1}^S) + \varepsilon_t$$

Este modelo presenta un varianza estimada de 0,139, AIC = 1734,46 y permite explicar el 85% de la varianza de los valores de O_3 en Cabecera. Para comprobar que este modelo explica toda la información posible de la serie, se realizó el test de Box-Ljung para aleatoriedad de residuos, mediante el cual se determinó a un nivel de confianza de 95 %, que los residuos del modelo son aleatorios (p-valor = 0, 86). Por otra parte (al igual que sucede con el modelo planteado para PM_{10}), los residuos no cumplen con el supuesto de normalidad. Sin embargo, es posible predecir valores futuros, ya que el no cumplimiento de este parámetro (normalidad) no afecta las predicciones obtenidas con el modelo.

IV) Estimación de los valores futuros o predicción de la serie.

Como se observa en la Figura 25, mediante el modelo escogido, se logra una buena aproximación de los valores obtenidos teóricamente y las concentraciones horarias medidas, para un lapso de tiempo diez días.

Figura 25. Predicción de valores mediante el uso de un modelo ARIMA $(2,0,1)(1,1,1)$ _[24]



En el estudio realizado por Jaramillo *et al.*, (2006)⁶³ [62] se planteó un modelo ARMA (24,4) con el cuál se obtenía un buen nivel de concordancia entre los resultados del modelo y los datos para concentraciones de O₃ para un periodo de tiempo de 8 h en adelante en la ciudad de Cali. Por otra parte, en el estudio realizado por Fajardo *et al.*, (2013)⁶⁴ [63] se encontró que el modelo que mejor se ajustaba a los datos era un ARIMA $(2,1,2)(1,1,1)$ ₅₂ con el cuál se lograban buenas predicciones para un periodo de tiempo de 2 años, basado en las concentraciones de 10 años atrás en la ciudad de Bucaramanga.

⁶³ JARAMILLO *et al.*, 2006. Análisis de series de tiempo univariante aplicando metodología de Box-Jenkins para la predicción de ozono en la ciudad de Cali, Colombia.

⁶⁴ Fajardo *et al.*, 2013. 'Política ambiental de restricción vehicular e implementación de SITM en la concentración de contaminantes atmosféricos en la zona centro de Bucaramanga, Colombia. Un análisis de intervención.

7. CONCLUSIONES

Se realizó el estudio descriptivo del comportamiento de PM_{10} y O_3 para la estación de cabecera, mediante el cual se observó que existen ciclos diarios en las concentraciones de PM_{10} y O_3 con gran diferencia entre los valores máximos y los mínimos. Así como algunas diferencias en los niveles de concentraciones para los días entre semana respecto a los fines de semana y un comportamiento estable a lo largo del año.

Se estudió la relación entre las concentraciones de PM_{10} y O_3 y las variables meteorológicas, encontrando que la radiación solar, humedad relativa y temperatura se encuentran altamente relacionadas con las concentraciones de O_3 , mientras que las variables que más influyen en las concentraciones de PM_{10} son la velocidad del viento y la presión.

Se compararon las concentraciones de PM_{10} y O_3 en Cabecera, Floridablanca y Real de Minas y se encontró que existe una relación con las actividades antropogénicas de cada sector y el comportamiento cíclico de estos contaminantes. Las concentraciones más altas se registran en Floridablanca y Bucaramanga, sin embargo, el comportamiento de la serie de PM_{10} es muy similar en las estaciones de Cabecera y Real de Minas.

Se plantearon modelos de series de tiempo mediante la metodología Box-Jenkins, que permiten predecir dentro de un rango confiable, concentraciones de estos dos contaminantes (PM_{10} y O_3) hasta con diez días de anticipación.

8. RECOMENDACIONES

Realizar mayor seguimiento a las concentraciones de O_3 en el ambiente, así como sus posibles fuentes de emisión, ya que es un contaminante que representa un alto riesgo para la salud humana.

Analizar de manera directa la relación existente entre la flota vehicular de la ciudad y las concentraciones de estos contaminantes, con el fin de implementar medidas que permitan reducir sus emisiones.

Implementar modelos de series temporales como estrategia para la predicción de concentraciones de PM_{10} y O_3 que puedan presentar un riesgo para la salud de las personas, para tomar medidas de prevención oportunas.

BIBLIOGRAFÍA

ACEVEDO J.; BOCAREJO J.; VELÁSQUEZ J.; TYLER N.; RAMÍREZ C.; PEROZA A.; GALARZA D., 2013. Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia. University College London, Universidad de los Andes – Colombia.

AEMA, 2008. Ozono Troposferico. Ciudades para un futuro más sostenible. Agencia Europea de Medio Ambiente.

ALCALDÍA DE BUCARAMANGA. Plan de Ordenamiento Territorial de Bucaramanga 2013 – 2027. Informe técnico.

ARIAS, J. & UMAÑA, J., 2016. Proyección del flujo de caja para una cooperativa de intermediación financiera basado en modelos estadísticos de series de tiempo.

BOLDO E.; LINARES C.; LUMBRERAS J.; BORGE R.; NARROS A.; GARCÍA-PÉREZ J.; FERNÁNDEZ-NAVARRO P.; PÉREZ-GÓMEZ B.; ARAGONÉS N.; RAMIS R.; POLLÁN M.; MORENO T.; KARANASIOU A.; LÓPEZ-Abente G., 2011. Health impact assessment of a reduction in ambient PM(2.5) levels in Spain. *Environment International*, 37(2), pp.342-348.

BOUBEL R.; FOX D., TURNER D., 1994. *Fundamentals of Air Pollution*. 3.th ed. Washington. Academic Press. pp. 165-178

BOX G. & JENKINS G., 1973. Some comments on a paper by Chatfield and Prothero and on a review by Kendall. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 136(3), 337-352.

CAPPELLI C.; D'URSO P.; DI LORIO F., 2015. Regime change analysis of interval-valued time series with an application to PM10. *Cheometrics and Intelligent Laboratory Systems* 146 (2015) 337-346. Disponible en: ScienceDirect.

CDMB, 2017. Informe de la calidad de aire en Bucaramanga. Disponible en: <http://www.cdm.gov.co/web/ciudadano/prensa/noticias/item/4350-la-calidad-del-aire-que-respiran-bucareguenses-esta-entre-buena-y-moderada>.

CHATFIELD C., 1978. The Holt–Winters forecasting procedure, *Applied Statistics*, 27(3), 264–279.

CONPES 3344, 2005. Lineamientos para la formulación de la política de prevención y control de la contaminación del aire.

COTRINA J. & CABRERA Z., 2004. Análisis de la relación entre el comportamiento estacional de los contaminantes sólidos sedimentables con las condiciones meteorológicas predominantes en la zona metropolitana de Lima-Callao durante el año 2004. *ACTA NOVA*; Vol. 3, Nº 2, junio 2006 · 398

DAGMA, 2017. Informe anual de calidad del aire de Santiago de Cali, 2016. Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente.

DENG W.; ZHENG H.; TSUI A.; CHEN X., 2016. Measurement and health risk assessment of PM_{2.5}, flame retardants, carbonyls and black carbon in indoor and outdoor air in kindergartens in Hong Kong. *Environment International*, 96, pp.65–74

ESPINOSA M.; ORTÍNEZ A.; GARCÍA D., 2016. Evolución del comportamiento de las concentraciones de contaminantes atmosféricos en un sitio en Salamanca, Guanajuato. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

FAJARDO E.; ORLANDONI G.; BORGES R.; VILLALBA D., 2013. 'Política ambiental de restricción vehicular e implementación de SITM en la concentración de contaminantes atmosféricos en la zona centro de Bucaramanga, Colombia. Un análisis de intervención', *Agora*, 16 (32), 17-32.

FAJARDO E.; VILLALBA D.; ORLANDONI G. Análisis de Intervención. Efectividad de política Ambiental de restricción vehicular en la concentración de contaminantes en centro de Bucaramanga. Editorial académica Española.

FORERO D. & DELGADO M., 2008. Análisis comparativo de la concentración de carbono orgánico, carbono elemental contenido en el material particulado menor a 10 micrómetros entre las áreas metropolitanas de cali y valle de aburrá.

GÓNZALEZ M. & TORRES C., 2015. Incidencia de las variables meteorológicas en el comportamiento de la concentración de PM10 y NOx. Universidad Distrital Francisco José De Caldas. Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Tecnología en Saneamiento Ambiental

GÓNZALEZ V., 2016. Análisis del efecto de ozono de fin de semana en Bogotá. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental.

GUERRERO V. & VERA G., 1981. Una aplicación del análisis de intervención a series de tiempo de la economía mexicana. Banco de México.

GÜLER N. & AKKUŞ Ö., 2017. A new time series model based on robust clustering for forecasting of air pollution. Ecological Informatics 43 (2018) 157-164. Disponible en: ScienceDirect.

HOLEŠOVSKÝ J.; ČAMPULOVÁ M.; MICHÁLEK J., 2017. Semiparametric outlier detection in nonstationary times series: Case study for atmospheric pollution in Brno, Czech Republic. Atmospheric Pollution Research 9 (2018) 27-36. Disponible en: ScienceDirect.

IBÁÑEZ C., 2004. Los sistemas terrestres y sus implicaciones medioambientales, Ministerio de Educación. Instituto Superior de Formación del Profesorado (España).

JARAMILLO M.; GONZÁLEZ D.; NÚÑEZ M.; PORTILLA G.; LUCIO J., 2006. Análisis de series de tiempo univariante aplicando metodología de Box-Jenkins para la predicción de ozono en la ciudad de Cali, Colombia. Grupo de Producción más Limpia. Facultad de Ingeniería. Pontificia Universidad Javeriana, Sede Cali. Cali, Colombia.

LESTARI P. & MAULIADI Y., 2009. Source apportionment of particulate matter at urban mixed site in Indonesia using PMF. *Atmospheric Environment*, 43(10), pp.1760–1770. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231008011485>.

LÓPEZ L. & ZAPATA Y., 2016. Identificación de las principales fuentes de material particulado pm2.5 en una zona de alto tráfico y una zona de bajo tráfico vehicular en Bucaramanga mediante la aplicación del modelo receptor-fuente CMB. Universidad Pontificia Bolivariana.

MARTÍNEZ E.; BEDOYA J.; CORREA M.; MUÑOZ A.; PAZ J.; MORALES O.; ROMERO A.; MARÍN A.; MONTOYA A., 2007. Contaminación atmosférica y efectos sobre la salud de la población en Medellín y su área metropolitana. Diagnóstico ambiental. Centro de investigaciones. Facultad Nacional de Salud Pública. Universidad de Antioquia

MAURICIO, J., 2007. Introducción al análisis de series temporales. Universidad Complutense de Madrid.

MÉSZÁROS E., 1999. *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*. Akadémiai Kiado. Disponible en: http://akkrt.hu/3/science_books/chemistry/fundamentals_of_atmospheric_aerosol_chemistry.

MOOLGAVKAR S.; MCCLELLAN R.; DEWANJI A.; TURIM J.; LUEBECK E.; EDWARDS M., 2012. Time-series analyses of air pollution and mortality in the

United States. A subsampling approach. *Environ Health Perspect* 121:73–78 (2013).

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. Actualización mundial 2005.

OPAZO D., 2011. Distribución espacial de la contaminación por material particulado y su relación con las temperaturas del aire y los vientos en Santiago para el año 2009. Universidad de Chile. Facultad de Arquitectura y Urbanismo.

PACHECO P., 2008. Análisis estadístico de datos de contaminación ambiental del lago de Valencia. Universidad Central de Venezuela. Facultad de ciencias. Escuela de Matemáticas.

PACSI S., 2015. Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en Lima Metropolitana. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú. ISSN 2519-7398 (Versión electrónica).

PENG R.; DOMINICI F.; LOUIS T., 2005. Model choice in time series studies of air pollution and mortality. Johns Hopkins University, Dept. of Biostatistics Working Papers. Working Paper 55. Disponible en: <http://biostats.bepress.com/jhubiostat/paper55>.

POPE C.; MUHLESTEIN J.; RENLUND D.; ANDERSON J.; HOME B., 2006. Ischemic heart disease events triggered by short-term exposure to fine particulate air pollution. *Circulation*, 114(23), pp.2443–8. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17101851>.

PEÑA C.; CARTER D.; AYALA-FIERRO F., 2001. Toxicología ambiental. Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental. Southwest Hazardous Waste Program. The University of Arizona.

RAMOS S.; BAUTISTA R.; VALDEZ A., 2007. Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de Chiapas, México. División Académica de Ciencias Biológicas.

RMCAB, 2017. Informe anual de calidad del aire de Bogotá, 2016. Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá. Secretaría Distrital de Ambiente. Dirección de Control Ambiental

RUBIO K., 2014. Impacto de las políticas económicas de Venezuela sobre el precio del bolívar en la frontera Norte de Santander: Un análisis de series de tiempo. Universidad Industrial de Santander.

SAENZ M.; PÉREZ S.; TOBIAS A.; SAURINA C.; BARCERLÓ M.; BALLESTER F., 1999. Métodos de series temporales en los estudios epidemiológicos sobre contaminación atmosférica. *Rev Esp Salud Pública* 1999; 73: 133-143.

SALINI G. & MEDINA E., 2015. Estudio sobre la dinámica temporal de material particulado pm10 emitido en Cochabamba, Bolivia. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 33 (3) 437-448, 2017 DOI: 10.20937/RICA.2017.33.03.07.

SALCEDO, R. ALVIM M.; ALVES C.; MARTINS F., 1998. Time-series analysis of air pollution data. *Atmospheric Environment* 33 (1999) 2361-2372.

SHI L.; ZANOBETTI A.; KLOOG I.; COULL B.; KOUTRAKIS P.; MELLY S.; SCHWARTZ J., 2016. Low-concentration PM2.5 and Mortality: Estimating Acute and Chronic Effects in a Population-Based Study. *Environ Health Perspect.* 2016 Jan;124(1):46-52. doi: 10.1289/ehp.1409111. Epub 2015 Jun 3.

SIATA 2017. Informe anual de calidad del aire del Valle de Aburrá, 2016. Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

SIERRA M., 2006. Establecer la asociación existente entre las variables meteorológicas temperatura, velocidad del viento y precipitación y las

concentraciones de PM₁₀ registradas en la red de calidad del aire de Bogotá D.C. Ingeniería Ambiental y Sanitaria. Universidad de la Salle.

SILVA, J. & MONTOYA, Z., 2004. análisis del comportamiento del ozono troposférico y su relación con la radiación solar en las ciudades de Lima, Ica y Arequipa, 2004. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI.

SILVA-VINASCO J. & CANCHALA T., 2013. Variación espacial y temporal de concentraciones de pm10 en el área urbana de Santiago de Cali, Colombia. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. ISSN: 1692-9918. Universidad del Valle Colombia

URIBE J.; FAJARDO E.; ROMERO H., 2014. Incidencia de las políticas públicas de empleo sobre la desocupación en Colombia: un análisis de intervención para el periodo 2002-2014. Revista Espacios. 38 (Nº 36) Año 2017. Pág. 22.

VARGAS, M. Modelización de series temporales estacionarias en espacio de estados. Área de Estadística. Facultad de Ciencias Sociales de Cuenca. Universidad de Castilla-La Mancha. Disponible en: http://www.leg.ufpr.br/lib/exe/fetch.php/pessoais:modelizacion_de_series_temporales.pdf

VELÁZQUEZ DE CASTRO F., 1997. Modelización y análisis de las concentraciones de ozono troposférico. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Químicas.

VERA R., 2016. Análisis con modelos de series de tiempo de la evolución de disponibilidad y accesibilidad de alimentos en Colombia 1961-2011.

VILLALBA D.; Fajardo E.; Borges R., 2012. Contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas. Una aplicación del Análisis de Datos Longitudinales y del Análisis de Correlación Canónica.

XINRUI R., 2016. The interactive effects between high temperature and air pollution on mortality: A time-series analysis in Hefei-China. *Science of the Total Environment* 575 (2017) 1530-1537. Disponible en: ScienceDirect.