

Calidad del Aire y Enfermedades Respiratorias bajo Diversos Esquemas de Circulación Vial en Bucaramanga (Santander, Colombia)¹

Giampaolo Orlandoni-Merli², Josefa Ramoni-Perazzi³, Miguel Oswaldo Pérez Pulido⁴

Resumen

Introducción. En 2017, la ciudad de Bucaramanga ensayó diversos esquemas de restricción vehicular para mejorar la movilidad y calidad del aire. Estos esquemas fueron: libre circulación (PP0), restricción limitada (PP1) y restricción ampliada (PP2). El **Objetivo** de este estudio fue comparar los niveles de material particulado (PM_{10}) y de ozono troposférico (O_3) en estos tres esquemas, y evaluar su efecto sobre la calidad del aire, así como el impacto de dicha calidad sobre la incidencia de enfermedades respiratorias. **Materiales y Métodos.** La información sobre variables meteorológicas y niveles de contaminantes por hora y día pertenece al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia. Las estadísticas de enfermedades

respiratorias corresponden a la Secretaría de Salud y Ambiente de Bucaramanga. Toda la información corresponde al año 2017. La comparación de los niveles de contaminantes se hizo con base en estadísticas descriptivas, pruebas ANOVA y funciones de densidad. El análisis de los factores que afectan la incidencia de enfermedades respiratorias se basó en un modelo de regresión de Poisson, con las variables climatológicas combinadas en factores obtenidos a través de análisis de componentes principales. **Resultados.** El ANOVA indicó diferencias significativas en niveles promedio de PM_{10} entre esquemas de movilidad. Las funciones de densidad muestran una sustancial reducción de PM_{10} bajo PP2. En el modelo de Poisson, O_3 resultó estadísticamente no significativo; el número de casos de enfermedades respiratorias atendidos

1 Artículo original derivado del proyecto de investigación: Evaluación de la Medida de Pico y Placa en la ciudad de Bucaramanga – Colombia. Ejecutado entre 2016 y finalizado en 2018. Financiado por la Universidad de Santander y la Dirección de Tránsito de Bucaramanga por convocatoria de interés institucional de acta N°07

2 Doctor en Estadística. Docente investigador del programa de Maestría en Estadística Aplicada. Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y Agropecuarias, Universidad de Santander, Bucaramanga (Santander), Colombia. Correo: gorlandoni@udes.edu.co / ORCID: 0000-0002-0031-2659

3 PhD en Economía. Docente programa de Economía y Administración. Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias Humanas, Escuela de Economía y Administración, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga (Santander), Colombia. Correo: jramonip@uis.edu.co / ORCID: 0000-0002-0493-1940

4 Magister en Estadística, Docente investigador del programa de Maestría en Estadística Aplicada, Universidad de Santander, Bucaramanga (Santander). Correo: miguel.perez@udes.edu.co / ORCID: 0000-0003-2945-0526

Autor para Correspondencia: Josefa Ramoni-Perazzi, correo: jramonip@uis.edu.co

Recibido: 11/09/2019 Aceptado: 31/07/2021

*Los autores declaran que no tienen conflicto de interés

en centros hospitalarios fue significativamente inferior en PP2 y se decrece con una disminución de PM_{10} . **Conclusiones.** PP2 permite 48 % de ganancia ambiental en cuanto a emisiones de PM_{10} ; bajo PP1 esta ganancia es inferior al 3 %. Ningún esquema contribuye a reducir las ya bajas concentraciones de O_3 . Una caída del 10 % en los niveles de PM_{10} disminuye el número de

casos de enfermedades respiratorias en 5,6 %. El estudio favorece la adopción del esquema PP2.

Palabras clave. Políticas, planificación y administración en salud, salud ambiental, contaminantes atmosféricos, estadísticas & datos numéricos.

Air Quality and Respiratory Diseases under Different Vehicular Restrictions Systems in Bucaramanga (Santander, Colombia)

Abstract

Introduction. In 2017, the city of Bucaramanga attempted different vehicle restriction systems to improve traffic flow and air quality. These systems were: free circulation (PP0), limited restriction (PP1), and extended restriction (PP2). The **Objective** of this study was to compare the levels of the particulate matter (PM_{10}) and tropospheric ozone (O_3) through the three systems and evaluate their effect on air quality and its impact on the incidence of respiratory diseases. **Materials and Methods.** The information on meteorology variables and levels of pollutants per hour and day was provided by the Colombian Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies. The statistics on respiratory diseases were provided by the Ministry of Health and Environment of Bucaramanga. All statistical

information relates to the year 2017. The comparison of levels of air pollutant was based on descriptive statistics, ANOVA tests, and density functions. The analysis of the factors affecting the incidence of respiratory diseases relied on a Poisson regression model, with meteorology variables combined into factors based on principal component analysis. **Results.** ANOVA indicates significant differences in average levels of PM_{10} among systems. Density functions show a substantial reduction of PM_{10} under PP2. In the Poisson model, O_3 ended up being not statistically significant; the number of cases of respiratory diseases was significantly lower under PP2 and decreases with the level of PM_{10} . **Conclusions.** The PP2 scheme allows a 48 % environmental gain in PM_{10} ; under PP1 this gain is less than 3 %. None of the schemes seems to contribute to reducing the already low concentrations of O_3 . A 10 % reduction in PM_{10} reduces the number of reported cases of respiratory diseases by 5.6 %. The study supports the adoption of the PP2 system.

Key words: Health policy, planning and management, environmental health, air pollutants, statistics & numerical data.

Qualidade do ar e doenças respiratórias em vários esquemas de circulação rodoviária Introdução em Bucaramanga (Santander, Colombia)

Resumo

Em 2017, a cidade de Bucaramanga testou vários esquemas de restrição de veículos para melhorar a mobilidade e a qualidade do ar: livre circulação (PP0), restrição limitada (PP1) e restrição estendida (PP2). O **Objetivo** deste estudo foi comparar os níveis de material particulado (PM_{10}) e ozônio troposférico (O_3) nesses três esquemas para avaliar o efeito na qualidade do ar e o impacto na incidência de doenças respiratórias. **Métodos** A informação sobre as variáveis meteorológicas e níveis de poluentes por hora e dia pertencem ao Instituto de Hidrologia, Meteorologia e Estudos Ambientais da Colômbia. As estatísticas de doenças respiratórias correspondem à Secretaria da Saúde e Meio Ambiente da cidade de Bucaramanga. Toda a informação utilizada corresponde ao ano de 2017. A comparação

dos níveis de contaminantes foi feita com base em estatística descritiva, testes ANOVA e funções de densidade. A análise dos fatores que afetam a incidência de doenças respiratórias foi baseada no modelo de regressão de Poisson, com as variáveis climáticas agrupadas em fatores obtidos por meio da análise dos componentes principais. **Resultados** A prova ANOVA indica diferenças significativas nos níveis médios de PM_{10} . As funções de densidade mostram uma redução substancial de PM_{10} em PP2. No modelo de Poisson, o O_3 mostrou-se não significativo; O número de casos de doenças tratadas em centros hospitalares foi significativamente menor no PP2 e é reduzido com uma diminuição no PM_{10} . **Conclusões** O PP2 permite ganho ambiental de 48 % no PM_{10} ; no PP1, esse ganho é inferior a 3 %. Nenhum esquema ajuda a reduzir as já baixas concentrações de O_3 . Uma queda de 10 % nos níveis de PM_{10} diminui o número de casos de doenças respiratórias em 5,6 %. Assim sendo, este estudo favorece a adoção do esquema PP2.

Palavras chave: Políticas, planejamento e administração em saúde, saúde ambiental, poluentes atmosféricos, estatística e dados numéricos.

Introducción

a) La medida de pico y placa (PP) busca normar la circulación de vehículos a partir de la restricción del horario y/o áreas de circulación según número de placa. Las motivaciones de este sistema son generalmente la búsqueda de soluciones a problemas de movilidad y/o la reducción de niveles de contaminación ambiental.

Al igual que en otras ciudades de Colombia, esta medida se ha implementado en Bucaramanga desde el 2006 pero de manera intermitente, con repetidas modificaciones y

suspensiones que obedecen a problemas de transporte público, festividades y tutelas. En enero de 2017 se firmó una resolución que restringía la circulación general de vehículos con base en dos dígitos en los horarios de 5:00 a 9:00 y de 16:00 a 20:00 de lunes a viernes y prohibición de circulación en el casco central de la ciudad, medida que no fue bien recibida por los comerciantes de la zona. En abril de ese año la medida fue suspendida en respuesta a una acción de nulidad introducida ante tribunales. Las consecuencias de la ausencia total de restricciones vehiculares en la ciudad fueron más que evidentes. Largas filas que se tradujeron en pérdida de tiempo y recursos,

así como el incremento de la informalidad del servicio de transporte público en detrimento del transporte formal, por citar algunos. Es por ello que en agosto de ese año se estableció de nuevo el PP, con restricciones de movilidad de lunes a viernes desde las 6:00 hasta las 20:00 horas aplicadas en toda la ciudad.

Este estudio buscó comparar la calidad del aire bajo los diferentes esquemas antes descritos, a fin de definir cuál de ellos arrojó los mejores beneficios ambientales en términos de reducción de material particulado inferior a diez micras (PM_{10}) y ozono troposférico (O_3), y cómo esa mejora puede haber incidido en la reducción del número de casos de enfermedades respiratorias tratados en centros asistenciales en la ciudad. El organismo encargado de las mediciones de contaminantes dispone de solo dos estaciones de monitoreo en esta ciudad, uno de los cuales (Cabecera) es de particular interés para este estudio, dada su ubicación estratégica y su dinámica económica. Las estadísticas de enfermedades respiratorias no se presentan desglosadas por centro asistencial o por barrios; en todo caso, la selección del centro asistencial al cual acudir no se basa en vecindad, sino en convenios entre los centros asistenciales y las aseguradoras⁶. Los resultados apuntan a que el esquema PP2 muestra las mejores ganancias en términos de calidad de aire. También se encuentra evidencia de que una reducción de los niveles de PM_{10} tiene un efecto significativo menos que proporcional en la reducción del número de casos de enfermedades respiratorias.

Materiales y Métodos

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) lleva a cabo el seguimiento de los niveles

de contaminantes en la atmósfera a través del Índice de Calidad de Aire que estima el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible del país. Dicho índice combina información acerca de los contaminantes identificados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos: ozono troposférico (O_3), material particulado menor a 10 micras (PM_{10}), material particulado menor a 2,5 micras ($PM_{2.5}$), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2) y dióxido de nitrógeno (NO_2). Estas sustancias pueden provenir de fuentes naturales, (incendios forestales, erupciones volcánicas, etc.) o ser el resultado de la dinámica propia de centros poblados, en especial por la utilización de combustibles fósiles en la industria y el transporte (IDEAM, 2017). Las mediciones de todos estos componentes aún no están disponibles para todo el país, ni siguen un formato estándar a nivel nacional, presentándose en miligramos por metro cúbico (mg/m³), partes por millón (ppm), partes por billón (ppb) o como concentraciones promedio horarias, diarias o anuales expresadas en microgramos por metro cúbico (µg/m³).

El país cuenta con 159 estaciones (fijas o indicativas) distribuidas en el centro y occidente, siendo los contaminantes más comúnmente medidos en ellas el PM_{10} , el $PM_{2.5}$ y el O_3 , en ese orden. Esta cantidad de estaciones resulta insuficiente, no solo a nivel de país sino también al interior de los 19 (de 32) departamentos en los que estas se encuentran. De ellas, solo dos se ubican en el municipio/ciudad de Bucaramanga (Santander), específicamente en las zonas de Cabecera y Ciudadela Real de Minas. Cabecera monitorea únicamente los niveles de PM_{10} y O_3 por hora y día, mientras que Real de Minas sólo monitorea O_3 .

Bucaramanga es una ciudad intermedia ubicada al centro norte del país. Es la capital

⁶ En Colombia, toda persona debe estar afiliada a una Entidad Prestadora de Salud (EPS), ya sea por régimen contributivo o subsidiado. Las EPS son empresas que fungen como aseguradoras.

del departamento de Santander y cuenta con cerca de 600.000 habitantes. Está dividida en barrios, de las que Cabecera es el de mayor dinamismo y actividad comercial, con centros comerciales, hospitales y centros de salud, restaurantes y predominio de viviendas de estratos medio y alto. Está ubicado al centro-este de la ciudad y, a pesar de contar con solo 45.000 residentes, tiene un alto flujo vehicular y peatonal debido a su propia actividad y por ser paso obligado entre el norte y sur de la ciudad. Cabe destacar que, según el IDEAM, la forma alargada de la ciudad, flanqueada a los costados por montañas que se van cerrando hacia el norte, hacen que los vientos circulen mayoritariamente de sur a norte y viceversa, o de suroeste a noreste. Ciudadela, por su parte, es un barrio netamente residencial ubicado al margen oeste de la ciudad, con viviendas de estratos medio, baja actividad comercial y poco flujo vehicular y cerca de 30.000 habitantes. La posición estratégica de Cabecera y su fuerte actividad comercial, conjuntamente con la no disponibilidad de información referida a niveles de PM_{10} para

el barrio Ciudadela, hacen que este estudio centre su atención en el barrio Cabecera.

En noviembre de 2017, Colombia adoptó una resolución (2254) en la que se fijan los valores máximos admisibles de contaminantes: 100 $\mu g/m^3$ diarios para PM_{10} y octo-horarios para O_3 . A partir de enero de 2018 los límites diarios permisibles de PM_{10} se redujeron a 75, en consonancia con los objetivos intermedios de la OMS. Con miras a mejorar la circulación vial y la calidad de aire en la ciudad, desde el 2006 la alcaldía de Bucaramanga viene implementando la medida de PP con repetidas modificaciones y suspensiones que obedecen a problemas de transporte público, festividades y tutelas. Sin embargo, el 2017 fue un año particularmente interesante por cuanto durante el mismo se experimentaron tres esquemas diferentes, que se resumen en la siguiente tabla y cuya implementación afecta en especial la movilidad vehicular en Cabecera. Estos esquemas se aplicaron a los vehículos según el último dígito de su placa, con rotación periódica, como se resume en la Tabla N°1:

Tabla N° 1. Esquemas de circulación vial (Bucaramanga, 2017)

Esquema	Fecha inicio	Fecha final	Días	Horas
PP1	20/01/2017	02/04/2017	Lunes-viernes	5:00-9:00 16:00-20:00
PP0	03/04/2017	21/08/2017	Sin restricciones	
PP2	22/08/2017	30/10/2017	Lunes - viernes Sábado	6:00-20:00 9:00-13:00

Fuente: elaborado por los autores

Para el análisis comparativo de los contaminantes bajo estos tres esquemas de movilidad, el estudio recurrió tanto a las estadísticas descriptivas básicas, como a pruebas de comparación de medias ANOVA y de funciones de densidad. La información proporcionada por el IDEAM, permite llevar a cabo este análisis por día y hora según los periodos del año 2017 identificados en la tabla anterior.

Para medir el posible efecto de las emisiones de contaminantes bajo los diferentes esquemas sobre la incidencia de enfermedades respiratorias (asma; bronquitis; otras afecciones respiratorias no especificadas; afecciones respiratorias no especificadas causadas por inhalación de gases, humos, vapores; afecciones respiratorias causadas por agentes externos no especificados, todas ellas

agrupadas sin desglose) se usó información suministrada por la Secretaría de Salud y Ambiente de Bucaramanga (SSAB). Siendo que la Secretaría reporta el número de casos por semana epidemiológica, se ajustaron los niveles de contaminantes a este esquema, con base en promedios semanales. Cabe destacar que no se cuenta con información desglosada por tipo de enfermedad respiratoria, centro asistencia o barrio no está disponible. El sistema de salud colombiano se basa en convenios entre centros asistenciales y empresas aseguradoras, de obligatoria afiliación para todos los habitantes. Son estos convenios y no la cercanía al lugar de residencia los que determinan los centros asistenciales a los cuales deben acudir los pacientes.

Siendo que la incidencia de enfermedades puede verse afectada por factores meteorológicos, el estudio incluyó información acerca de velocidad del viento, temperatura, humedad, presión atmosférica y radiación solar, toda ella proporcionada por el IDEAM.

El análisis de los factores que afectan la incidencia de enfermedades respiratorias se basó en un modelo de regresión de Poisson, los resultados obtenidos, se compararon con los generados por una regresión binomial negativa. La regresión de Poisson es un modelo lineal generalizado (MLG) utilizado para analizar los datos de conteo bajo el supuesto de que la variable de respuesta (y) sigue una distribución de Poisson con $E(y)=V(y)=\mu$ y con una función de enlace exponencial, de modo que

$$Y = E(y | x) + \sum = e^{\beta x} + \sum \quad (\text{Ecuación N}^\circ 1)$$

donde X es la matriz de las variables explicativas mencionadas, β es un vector de coeficientes estimados a partir de estimadores máximo-verosímiles y \sum es un término de error aleatorio que sigue una distribución normal. El MLG es una generalización de los modelos de regresión lineal en los que la variable respuesta puede seguir distribuciones distintas

de la normal, siempre que se encuentre en la familia exponencial. Para la inclusión de las variables meteorológicas en el modelo, se optó por combinar dichas variables en factores a través del análisis de componentes principales (ACP) a fin de corregir los problemas de colinealidad que se evidenciaron al incluir las variables originales. El ACP recoge la estructura de varianza-covarianza de los datos a través de combinaciones lineales de variables cuantitativas con base en distancias Euclídeas.

Resultados

Comportamiento de PM_{10} y O_3

Se observó una marcada diferencia en el comportamiento promedio de PM_{10} bajo el esquema PP2, comparado con los otros dos sistemas de movilidad. Las emisiones promedio bajo PP2 se ubicaron en $47,67 \mu\text{g}/\text{m}^3$, al menos 20 puntos por debajo de las observadas en PP0 y PP1, con diferencias estadísticamente significativas entre el promedio del primero y el de estos dos últimos, no así entre PP0 y PP1. Sin embargo, cabe resaltar la relativamente mayor variabilidad en las emisiones medidas durante PP2, llegando a un máximo de $244 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y con un valor atípico de $496 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones O_3 se mantuvieron siempre muy por debajo de los niveles de prevención establecidos, con diferencias significativas entre los diferentes esquemas de PP, siendo inferiores bajo PP0. En efecto, el 89,45 % y 91,13 % de las mediciones hechas durante PP0 y PP1 estaban por debajo del límite de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, porcentaje que ascendió al 97,4% de las mediciones durante la implementación de PP2. En el caso de O_3 , el 100 % de las observaciones cumplieron con los estándares, independientemente del esquema de circulación (ver Tabla N°2).

Tabla N° 2. Estadísticas básicas y ANOVA para PM₁₀ y O₃, según esquema de movilidad (año 2017)

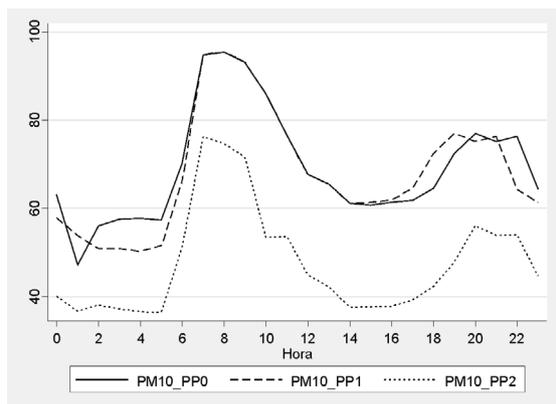
Estadísticas	PM ₁₀ (µg/m ³ x 24 horas)			O ₃ (µg/m ³ x 8 horas)		
	PP0	PP1	PP2	PP0	PP1	PP2
Media	69,33	67,45	47,67	4,89	9,21	6,01
Mediana	67,00	66,00	43,00	2,10	6,05	3,90
Desviación Estándar	22,97	24,57	23,35	5,99	8,82	5,87
Coeficiente de variación	0,33	0,36	0,49	1,22	0,96	1,28
Máximo	173,00	165,00	244,00	37,50	36,40	59,40
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,20
Resultados ANOVA*	PP0-PP1 1,87	PP1-PP2 19,78 ^a	PP0-PP2 21,65 ^a	PP0-PP1 -4,32 ^a	PP1-PP2 3,06 ^a	PP0-PP2 -1,26 ^a

Fuente: elaborado por los autores con datos de la CDMB

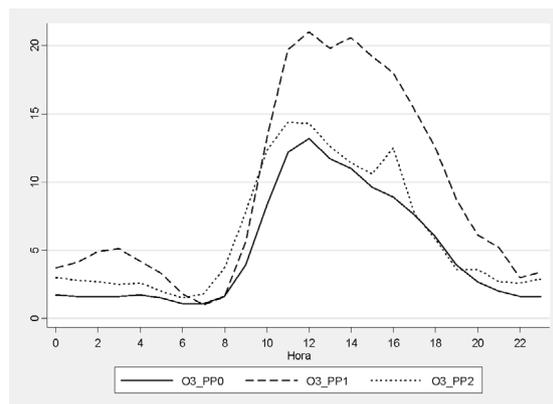
Nota: *Diferencia de medias según test de Bonferroni, estadísticamente significativa al 1% (a).

Producto de la dinámica propia de la actividad urbana, las emisiones de ambos componentes mostraron un patrón estacional que varió según día y hora, observándose ciclos no coincidentes de alta concentración que se alternaban con los de baja concentración. Independientemente del esquema de control de movilidad vehicular, existen dos momentos de mayor nivel de emisiones. Para el PM₁₀ se observó un primer momento en la mañana, generalmente entre las 7 y las 10 horas, alcanzando su pico a las 8 horas con valores que iban de 95,5 a 74,7 mg/m³ según esquema. El segundo de menor intensidad al final del

día, entre las 19 y las 22 horas, con máximos entre 77,0 y 56,1 µg/m³ a las 20 horas. En ambos casos, los niveles fueron inferiores con el esquema PP2, sin que se observaran diferencias estadísticamente significativas a lo largo de la semana. La concentración de O₃ exhibió una dinámica distinta, con un único momento crítico en horas del mediodía, con máximos a las 12 horas que iban de 21,0 µg/m³ bajo PP1 a 14,4 y 13,2 µg/m³ bajo PP2 y PP0, respectivamente (ver Figura N°1). En el caso de este componente O₃, los mayores niveles de concentración se registraron los días sábado y domingo.



a) Niveles promedio de PM_{10}



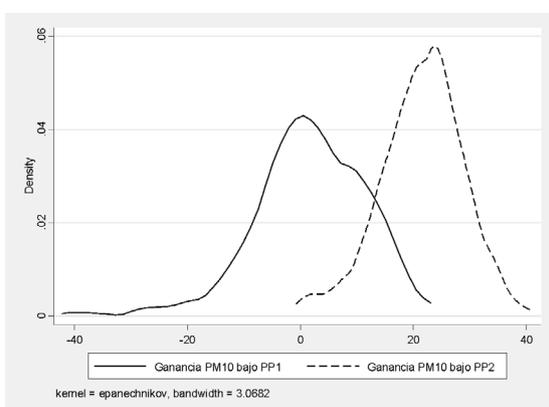
b) Niveles promedio de O_3

Figura N° 1. Función de densidad de PM_{10} y O_3 según hora y esquema de movilidad año 2017

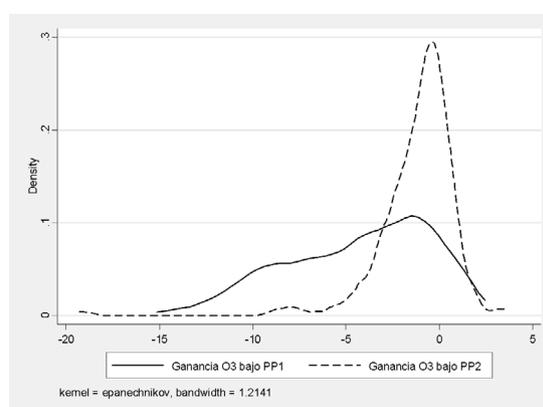
Fuente: elaborado por los autores con datos de la CDMB

En términos de calidad de aire, las ganancias promedio de los programas de restricción de movilidad vehicular pueden estimarse con base en la diferencia de las concentraciones de contaminantes por día y hora con respecto a la situación sin restricción. Un valor positivo indicaría que las concentraciones fueron mayores en situación sin restricción o, equivalentemente, la cantidad en la que se

reduciría la concentración del contaminante con la restricción. En el caso del material particulado, la ganancia promedio bajo PP1 fue de apenas $1,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con mediana igual a $1,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que equivale al 2,2%, mientras que bajo el esquema de restricción ampliado PP2, la ganancia promedio llegó a $21,48$ y la mediana a los $22,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para un ahorro del 47,6% (ver Figura N° 2a).



b) Ganancias en términos de PM_{10}



c) Ganancias en términos de O_3

Figura N° 2. Distribución de núcleo de las ganancias por esquemas de movilidad año 2017

Fuente: elaborado por los autores con datos de la CDMB

En cuanto a O_3 , ninguno de los esquemas de circulación vial restringida arrojó ganancias ambientales evidentes. En efecto, las ganancias promedio y medianas fueron negativas en ambos casos ($-4,34$ y $-3,55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bajo PP1, $-1,19$ y $-0,735 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bajo PP2), con cierta ventaja del esquema más restrictivo, según se muestra en la Figura N° 2b. Aun así, téngase presente que los niveles de O_3 se mantuvieron siempre muy por debajo de los niveles máximos admisibles.

Niveles de contaminantes e incidencia de enfermedades respiratorias

Para el análisis del posible efecto de las emisiones de contaminantes y esquemas de

circulación sobre la incidencia de enfermedades respiratorias, se dispuso de información a lo largo de 42 semanas epidemiológicas completas de enero a noviembre de 2017, con un promedio de 21.052 casos por semana, cuya evolución se resume en la Figura N° 3 y en Tabla N° 3. En ella se observa un patrón de comportamiento de los niveles de contaminantes similar al ya descrito, mientras que el número de casos reportados de enfermedades respiratorias luce inferior en el primer y último segmento: 20.174 casos en promedio en PP1, 22.155 en PP0 y 20.246 en PP2. Además, se observó una correlación positiva estadísticamente significativa únicamente entre el número de casos y los niveles de PM_{10} (0,33), no así con O_3 .

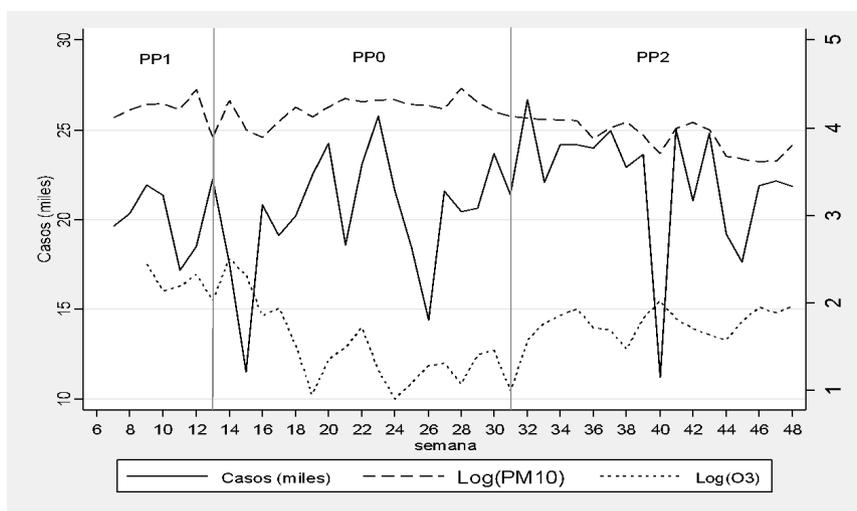


Figura N° 3. Enfermedades respiratorias, $\text{Log}(PM_{10})$ y $\text{Log}(O_3)$ por semana epidemiológica (2017)

Fuente: elaborado por los autores con datos de la CDMB y SSAB

A fin de corregir por el posible efecto de factores meteorológicos sobre la incidencia de enfermedades, se incorporó al estudio información referida a velocidad del viento (m/s), temperatura ($^{\circ}\text{K}$), humedad (%), presión atmosférica (hPa) y radiación solar (w/m^2), cuyos valores mostraron pocas variaciones a lo largo del año y a través de los diferentes

esquemas, sin diferencias significativas entre ellos, lo que puede explicar las bajas correlaciones entre estas variables y los niveles de contaminantes. Las mayores diferencias se presentaron en los niveles de radiación solar bajo el esquema PP1 con respecto a los otros dos (ver Tabla N° 3).

Tabla N° 3. Comportamiento de variables meteorológicas año 2017

Variable	PP0		PP1		PP2	
	Media	D. E.	Media	D. E.	Media	D. E.
Temperatura (°K)	283,64	0,72	283,59	0,58	283,78	0,37
Velocidad del viento (m/s)	5,26	1,92	4,88	0,77	4,41	1,62
Humedad (%)	87,21	3,73	87,99	2,47	84,82	3,32
Presión atmosférica (hPa)	711,55	0,43	710,99	0,43	710,95	0,69
Radiación solar (w/m ²)	179,02	23,53	181,85	26,68	178,21	19,41

Fuente: elaborado por los autores con datos de la CDMB

El modelo de regresión propuesto consideró el número de casos de enfermedades respiratorias como variable dependiente, mientras que las variables explicativas fueron los niveles de contaminantes PM₁₀ y O₃, así como dos variables ficticias para identificar los esquemas de circulación PP1 y PP2, con PP0 como grupo de comparación. Con respecto a las variables meteorológicas, se recurrió al análisis de componentes principales para generar factores que combinan temperatura, velocidad del viento, humedad, presión atmosférica y radiación solar en factores o componentes a partir de la correlación entre ellas, permitiendo con ello un mejor aprovechamiento de la información, además de corregir los problemas de colinealidad que se observaron al trabajar con estas variables. Siguiendo los estándares estadísticos, se seleccionaron aquellos factores con valor propio superior a la unidad, resultando tres

de ellos con un poder explicativo conjunto de la variabilidad total de las variables por el orden del 83,46 %. El primer factor (*velocidad-presión*) contrapone velocidad del viento y presión atmosférica con temperatura, de modo que altos niveles de la primera se asocian con bajas temperaturas. El segundo factor (*humedad-temperatura*) contrapone humedad con temperatura, mientras que el tercer factor (*radiación-presión*) asocia niveles de radiación solar y presión atmosférica entre sí (ver Tabla N° 4). La variable O₃ mostró ser estadísticamente no significativa, razón por la cual fue excluida del modelo final. Cabe destacar que estos resultados fueron semejantes, en estructura y estimaciones, a los obtenidos en una regresión binomial negativa no reportada. Sin embargo, los criterios de información favorecieron al modelo de Poisson (AIC: 219,68 versus 311,48; BIC: 219,91 versus 323,65).

Tabla N° 4. Resultados del análisis de componentes principales (factores de carga)

Variable	Componente		
	Velocidad-Presión	Humedad-Temperatura	Radiación-Presión
Velocidad del viento	0,6125	-0,2771	0,1182
Temperatura	-0,4507	-0,5143	0,0097
Humedad	-0,0598	0,7959	-0,1487

Variable	Componente		
	Velocidad-Presión	Humedad-Temperatura	Radiación-Presión
Presión atmosférica	0,5528	0,0625	0,4037
Radiación solar	-0,3354	0,1463	0,8949
Poder explicativo (%)	38,55	0,2684	0,1807

La Tabla N° 5 resume los resultados del modelo de Poisson, en el que se incluyen las interacciones entre PM_{10} y los diferentes esquemas, dada la evidente reducción de la concentración de material particulado bajo PP2. El mejor ajuste se logró con la variable PM_{10} a nivel. De este modo, una reducción del 10 % en las concentraciones de PM_{10}

generaría una disminución estadísticamente significativa en el número de casos de enfermedades respiratorias por el orden del 5,6 %⁷. Las restantes variables no ameritan análisis, puesto que su papel es garantizar que la significancia de los niveles de PM_{10} y de los esquemas no sea resultado de sesgo de especificación.

Tabla N° 5. Modelo de regresión de Poisson (variable dependiente número de casos)

Variable	Coefficiente	Error estándar	Intervalo confianza 95%	
PM_{10}	0,4426	0,0148*	0,4136	0,4716
PP1	0,6336	0,0233*	0,5878	0,6793
PP2	-0,1273	0,0218*	-0,1701	-0,0845
PM_{10} *PP1	-0,0101	0,0003*	-0,0108	-0,0093
PM_{10} *PP2	0,0069	0,0004*	0,0062	0,0076
Velocidad-Presión	-0,0207	0,0012*	-0,0231	-0,0183
Humedad-Temperatura	0,0397	0,0012*	0,0373	0,0421
Radiación-Presión	-0,0165	0,0013*	-0,0191	-0,0139
Cons	8,0539	0,0623*	7,9315	8,1757
LR Chi ²		6747,25		
Pseudo R ²		0,2847		

Nota: Estadísticamente significativo al 1% (*).

La evidencia soporta la tesis de que el esquema de circulación vehicular ampliado (PP2) contribuyó significativamente a reducir la tasa de incidencia de enfermedades respiratorias, si se le compara con la libre

movilidad vehicular. Así, el estudio favorece la adopción del esquema movilidad vehicular restringida a lo largo del día, antes que el esquema puntual por horas.

⁷ $10^{*(\exp(0,4426)-1)}$

Discusión

Se analizó el comportamiento de las concentraciones de PM_{10} y O_3 a lo largo de tres esquemas de circulación vehicular establecidos en la ciudad de Bucaramanga (Santander, Colombia) a lo largo del año 2017: movilidad restringida durante horas específicas al inicio y final del día (PP1), libre circulación vial (PP0) y movilidad restringida a lo largo de todo el día (PP2), en ese orden. El estudio puso en evidencia que bajo el esquema PP2 es posible observar una sustancial reducción del PM_{10} , tanto si se le compara con el esquema PP0 como con PP1, mientras que en este último no se observan variaciones importantes que reportar. Ninguno de los esquemas de restricción pareció tener efecto sobre la reducción de la concentración de O_3 . La ganancia ambiental observada con PP2 se extiende al plano de la salud, con una significativa reducción de la incidencia de enfermedades respiratorias a medida que decrecen los niveles de PM_{10} . Es de hacer notar que las conclusiones acerca de la efectividad de la medida de PP sobre las reducciones de PM_{10} deben tomarse con cuidado, tanto por la dicotomía de resultados con respecto a O_3 , como por la limitada información disponible acerca de otros contaminantes.

Pocos son los trabajos que se han publicado que evalúan el impacto ambiental de medidas de este tipo en Colombia, por cuanto la mayoría centra su atención en la efectividad de estas en términos de tiempos de movilidad vehicular. Según González (2009), se conoce que el PP en la ciudad de Medellín tuvo efecto parcial, debido a que se trasladan los problemas de vialidad de horas pico a horas valle, sin lograr desestimular el uso del transporte privado. DTB (2017) analizó el impacto de medidas destinadas a promover el uso de métodos alternativos de transporte como lo son la bicicleta y los corredores peatonales, con miras a reducir los tiempos de traslado y los niveles de ruido en la ciudad. Lamentablemente, las medidas no han tenido todavía el impacto esperado.

Para el caso de Medellín, un estudio evaluó la efectividad del PP en términos de flujo vehicular y niveles de contaminación, comparando porcentajes de contaminantes durante periodos sin restricción (2004) con periodos con restricción (2005-2007). Sus resultados mostraron una sustancial reducción de SO_2 , no así las partículas suspendidas (PST) y NO_2 , razón por la cual no concluyeron acerca de la efectividad de la medida (Posada, V, & González, 2011). Para el caso particular de Bucaramanga, estudios como los de Fajardo et al. (2013) y Castro et al. (2009) utilizaron modelos de series temporales con intervención para evaluar el impacto de una medida de restricción vehicular similar a PP1, así como la implementación del Sistema Integrado de Transporte sobre las concentraciones de CO , NO_2 , PM_{10} , O_3 y SO_2 que se medían en el centro de Bucaramanga para el periodo 2001-2010, encontrando una significativa mejora en la calidad del aire, la cual atribuyen a las medidas implementadas. Si bien ninguno de los trabajos disponibles intenta medir el impacto de programas de movilidad vehicular sobre enfermedades respiratorias en Colombia, varios analizan la posible relación entre dichas enfermedades y la calidad del aire. Un estudio disponible para Bucaramanga analizó la incidencia de enfermedades respiratorias en un grupo de preescolares (menores de 7 años) residentes en diferentes puntos de la ciudad evaluados a lo largo del periodo julio 2007 – junio 2008. La medición de la incidencia de enfermedades se basó en el cuestionario ISAAC, mientras que los niveles de PM_{10} se midieron de manera manual con equipos específicos. Con base en los resultados de modelos mixtos de Poisson, Rodríguez et al. (2010) concluyeron que no encuentran asociación concluyente entre concentración de PM_{10} y desarrollo de enfermedades respiratorias. Sin embargo, en otras regiones del país se encontró evidencia de que la mayor exposición a PM_{10} incrementa las afecciones respiratorias en niños menores de cinco años en Bogotá y en niños y adultos en Manizales, según Hernández et al. (2013) y

Carmona (2009). En el caso de niños menores de 14 años, este incremento está en el orden de 8,0 % por un 10,0% de aumento en PM_{10} en Bogotá (Solarte et al., 2002)

Pero estas no son las únicas ciudades de Colombia en las que se ha encontrado evidencia de relación inversa entre calidad de aire y enfermedades respiratorias. Un estudio de Gaviria et al. (2011) recurre a modelos de regresión lineal para medir el efecto del PM_{10} y $PM_{2,5}$ sobre las enfermedades respiratorias en Medellín, controlando por factores meteorológicos, y concluye que una disminución del 10% en estos contaminantes reduce la incidencia de enfermedades respiratorias por el orden del 6,2 % y 3,4 %, respectivamente. Sus conclusiones concuerdan con resultados similares obtenidos previamente en la zona de Guayabal de esa ciudad por Gómez et al. (2003). Por su parte, el estudio de Ortiz et al. (1996) se recurre a función dosis-respuesta para medir el costo social de la morbilidad inducida por contaminación atmosférica en Cali, y encuentra evidencia de una caída por el orden del 7 % del número de casos de enfermedades respiratorias por cada 10 % de reducción de PM_{10} . Si bien no son directamente comparables, estos resultados se asemejan a los obtenidos en nuestro estudio y están en línea con la evidencia hallada para América Latina de una relación directa entre niveles de contaminación del aire por material particulado y salud (OPS, 2005). En efecto, este documento muestra que un estudio comparativo entre áreas con mayor

y menor exposición a PM_{10} encontró evidencia de diferencias significativas en el número de casos de consulta por enfermedad respiratoria en niños menores de 2 años en Chile y mayor incidencia de asma bronquial en escolares en La Habana. Otro trabajo de Gilliland et al. (2011), esta vez para Perú, encontró fuerte asociación entre ausentismo escolar por enfermedades respiratorias y altos niveles de O_3 y PM_{10} .

Conclusiones

Se comparó el comportamiento de las concentraciones de PM_{10} y O_3 bajo tres esquemas de circulación vehicular en la ciudad de Bucaramanga (Santander, Colombia) durante 2017 y se analizó su impacto sobre la incidencia de enfermedades respiratorias. El estudio puso en evidencia que bajo el esquema de circulación más restrictivo (PP2) se observa una importante mejora en la calidad del aire en términos de PM_{10} , mientras que un esquema de restricción menos limitante (PP1) no parece contribuir a mejorar la calidad del aire. Esta mejora en la calidad del aire bajo PP2 contribuye a reducir de manera significativa los casos reportados de enfermedades respiratorias.

Agradecimiento

Este trabajo contó con el apoyo de la Dirección de Tránsito de Bucaramanga y de la Secretaría de Salud y Ambiente de Bucaramanga.

Referencias

Carmona, J. (2009). Infección respiratoria aguda en relación con la contaminación atmosférica y otros factores ambientales. *Archivos de Medicina*, 9(1), 69-79.

Castro, H., Campos M, R. L., & Herrera, A. (2009). Efecto de la construcción de la infraestructura vial para el transporte masivo "Metrolínea" sobre la calidad del aire en dos zonas de Bucaramanga. *Revista del Observatorio de Salud Pública de Santander*, 4, 22-26.

- DTB. (2017). *Estructuración de medidas para el mejoramiento de la movilidad en Bucaramanga*. Obtenido de www.transitobucaramanga.gov.co/pico_y_placa.php
- 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. *Ágora*, 16(32), 17-32.
- Gaviria, C., Benavides, P., & Tangarife, C. (2011). Contaminación por material particulado (PM10 y PM2.5) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009). *Rev. Fac. Nac. Salud Pública.*, 29(3), 240-250.
- Gilliland F, Berhane, K., Rappaport, E., Thomas, D., Avol, E., Gauderman, W., & al, e. (2011). The effects of ambient air pollution on school absenteeism due to respiratory illnesses. *Epidemiology*, 12(1), 43-54.
- Gómez, A., Henao, E., Molina, E., & Molina, F. (2003). Evaluación de las partículas totales (PST) y partículas respirables (PM10) en la zona de Guayabal, Medellín, Colombia. *Revistas Facultad de ingenierías*, 30, 24-33.
- González, C. (2009). Estrategias tarifadas y desestimulación del uso del vehículo particular por medio del pico y placa en Medellín. *Revista de ingenierías Universidad de Medellín*, 8(14), 93-108.
- Hernández, L., Aristizábal, G., Quiroz, L., Medina, K., Rodríguez, N., Sarmiento, R., & Osorio, S. (2013). Contaminación del aire y enfermedades respiratorias en menores de cinco años en Bogotá. *Revista de salud Pública*, 15(4), 503-516.
- IDEAM. (2017). *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2016*. . Obtenido de <http://www.ideam.gov.co>
- OPS. (2005). *Evaluación de los efectos de la contaminación del aire en la salud de América Latina y el Caribe*. Obtenido de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsea/fulltext/contaminacion/contaminacion.pdf>
- Ortiz, C., Escobar, J., & García, D. (1996). Contaminación atmosférica y salud: estimación de una función dosis-respuesta para Cali. *Documentos de trabajo CIDSE: Universidad del Valle*, 1, 1-21.
- Posada, J., V, F., & González, C. (2011). Análisis del "pico y placa" como restricción a la circulación vehicular en Medellín basado en volúmenes vehiculares. *Dyna*, 78(165), 112-121.
- Rodríguez, L., Herrera A, C. H., Niederbacher, J., & Vera, L. (2010). Incidencia de síntomas respiratorios y su asociación con contaminación atmosférica en preescolares: un análisis multinivel. *Cad Saude Publica*, 26(7), 1411-1418.
- Solarte, P., Caicedo, M., & Restrepo, S. (2002). Contaminación atmosférica y enfermedad respiratoria en niños menores de 14 años en Bogotá. *Revista Médica Sanitas*, 5(2), 1-18.