



Revista Luna Azul

E-ISSN: 1909-2474

lesga@une.net.co

Universidad de Caldas

Colombia

MORALES-PINZÓN, TITO; ARIAS MENDOZA, JHON JAIRÓ
CONTAMINACIÓN VEHICULAR EN LA CONURBACIÓN PEREIRA-DOSQUEBRADAS

Revista Luna Azul, núm. 37, julio-diciembre, 2013, pp. 101-129

Universidad de Caldas

Manizales, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=321729206009>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

CONTAMINACIÓN VEHICULAR EN LA CONURBACIÓN PEREIRA-DOSQUEBRADAS

TITO MORALES-PINZÓN¹, JHON JAIRO ARIAS MENDOZA²

Recibido el 2 de mayo de 2013 y aprobado el 6 de junio de 2013

RESUMEN

Se realizó un estudio sobre la contaminación ambiental por ruido y emisiones de material particulado PM₁₀ asociado a fuentes móviles en la conurbación Pereira-Dosquebradas. **Objetivo:** Analizar la relación salud con el ruido ambiental y el PM₁₀ asociado al flujo vehicular. **Metodología:** Se realizaron mediciones de flujo vehicular y ruido ambiental en tres sitios de interés por congestión vehicular. Adicionalmente, se reunió información de estaciones de calidad del aire disponibles en la zona de estudio y población con enfermedad respiratoria aguda (ERA). A partir de estos datos, se desarrollaron modelos para estimar el ruido ambiental a partir de condiciones del flujo vehicular y se proponen dos modelos de simulación reuniendo características de la dinámica de crecimiento poblacional, flujo vehicular y posibles emisiones de material particulado, para estimar el efecto potencial sobre la salud y los costos inducidos asociados a la contaminación. **Resultados:** En los sitios estudiados, se encontró que el flujo vehicular y el ruido ambiental son estadísticamente mayores en horas pico de la tarde (5pm a 7pm). El mayor flujo vehicular se encontró en el sector de la avenida sur de Pereira con un promedio de 2693 veh-Eq/h. Adicionalmente, se pudo estimar que los costos ambientales asociados a la contaminación atmosférica (PM₁₀) podrán llegar a ser del orden del 2% del presupuesto para el municipio de Pereira. **Conclusión:** El ruido ambiental está correlacionado con el flujo vehicular. El ruido ambiental generado principalmente por efecto del flujo vehicular puede llegar a superar los límites permitidos en la norma nacional para sitios cerca de hospitales. De acuerdo con los modelos de simulación desarrollados, si las condiciones de crecimiento del parque automotor circulante continúan a igual ritmo, en menos de ocho años los efectos de las concentraciones elevadas de material particulado causarán un efecto evidente sobre la morbilidad por enfermedad respiratoria aguda y en los costos ambientales estimados.

PALABRAS CLAVE

Contaminación del aire, flujo vehicular, enfermedad respiratoria aguda, material particulado, ruido ambiental.

VEHICLE FUEL AND SOUND CONTAMINATION IN THE PEREIRA-DOSQUEBRADAS CONURBATION

ABSTRACT

A study on noise contamination and particle pollution of PM₁₀ associated with mobile sources in the Pereira-Dosquebradas conurbation was carried out. **Objective:** To analyze the relationship between health, environmental noise and PM₁₀ due to vehicular flow. **Methodology:** Measurements of environmental noise and vehicular flow in three sites of interest by traffic congestion were carried out. Additionally, information from air quality stations available in the study area and population with acute respiratory

disease (ARD) was collected. From these data, models to estimate the environmental noise from traffic flow conditions were developed and two simulation models using dynamic characteristics of population growth, traffic flow and potential emissions of particulate matter are proposed in order to estimate the potential effect on health and associated induced costs associated with pollution. **Results:** In the sites studied, it was found that the flow of traffic and environmental noise are statistically higher in the afternoon peak hour (5pm to 7pm). The higher traffic flow was found in the sector of Avenida Sur in Pereira with an average of 2,693 veh-Eq/h. Furthermore, from the simulation models, it was found that the environmental costs associated with air pollution (PM_{10}) may become around 2% of the budget for the municipality of Pereira. **Conclusion:** Environmental noise is correlated with traffic flow. Environmental noise is generated mainly by the effect of traffic flow and it may exceed the limits established in the national standard for sites near hospitals. According to the simulation models developed, if the growth conditions of the vehicle fleet continue in the same tendency, in less than eight years the effects of high concentrations of particulate matter will cause a significant effect on morbidity due to acute respiratory disease and a higher estimated environmental cost.

KEY WORDS

Air pollution, acute respiratory disease, environmental noise, particulate matter, traffic flow.

INTRODUCCIÓN

El Área Metropolitana Centro Occidente ha presentado en los últimos años un crecimiento vehicular que está por sobrepasar la capacidad de movilidad en algunos sitios estratégicos como en el viaducto Cesar Gaviria Trujillo, que conecta las ciudades de Pereira y Dosquebradas. Asociada con el incremento del flujo vehicular urbano, la contaminación vehicular por emisiones gaseosas de combustión es uno de los problemas ambientales más importantes que deben ser estudiados en las áreas urbanas de Colombia. Las causas que originan esta contaminación son diversas, pero el mayor índice es provocado por las actividades industriales, comerciales, domésticas, agropecuarias y por el transporte automotor, situación que es manifiesta en Colombia (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial & Ideam, 2007).

En el estudio presentado en el documento Conpes 3344 de 2005, la contaminación del aire en Colombia tiene su causa principal en el uso de combustibles fósiles. Así, el 41% de las emisiones se genera en solo ocho ciudades. Las principales emisiones son de material particulado menor a 10 micras (MP_{10} o PM_{10} por sus siglas en inglés), óxidos de nitrógeno (NO_x) y monóxido de carbono (CO) ocasionadas por fuentes móviles (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Es de destacar la importancia del material particulado, el cual consta de partículas o gotas en suspensión presentes en la atmósfera. El material particulado se divide en grueso (PM_{10} o menor a 10 micras) y fino ($PM_{2.5}$ o menor a 2,5 micras) y está asociado a enfermedades respiratorias agudas y crónicas, como enfermedades cardiopulmonares y cáncer de pulmón (U.S.

EPA, 2004; Pope & Dockery, 2006; WHO, 2009; Srimuruganandam & Shiva, 2012).

Particularmente, en cifras presentadas por The World Bank (2007), un estudio de Larsen (2004) reveló que en Colombia 6 mil personas (incluyendo 1100 niños y niñas), mueren cada año como consecuencia de la mala calidad del aire y especialmente por emisiones de partículas a la atmósfera. Adicionalmente, los costos asociados a morbilidad y mortalidad serían de 1,5 billones de pesos (0,8% del PIB de 2004).

Como respuesta a esta problemática ambiental, dentro del Plan de Acción de la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire, la modelación de la calidad del aire en los centros urbanos y corredores ambientales es una de las actividades propuestas para conocer e identificar el comportamiento de las principales fuentes contaminantes que afectan la salud y el bienestar de la población (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

A nivel local, es un hecho que en los últimos 10 años la conurbación Pereira-Dosquebradas ha estado viviendo un aumento considerable del parque automotor. Concretamente, según datos reportados por el Instituto Municipal de Tránsito de Pereira (2012), durante el periodo 2004-2012 se ha incrementado en 70,9% el parque automotor de la ciudad lo cual ha derivado en un escenario de congestión vehicular, particularmente en cruces estratégicos para la movilidad lo que conlleva a un incremento en los niveles de contaminación atmosférica (especialmente por material particulado y por ruido) que afecta a la población.

En un estudio realizado por Morales, Martínez y Valera (2012), se estimó que los costos ambientales por contaminación de material particulado para el 2010 en la ciudad de Pereira eran de 332 millones de pesos, lo que equivale a \$726/hab/año, sin embargo, los autores consideran que este es un límite inferior y que por tanto la estimación puede ser mejorada. Adicionalmente, no se cuenta con modelos sobre ruido ambiental que puedan ser aplicados en la conurbación Pereira-Dosquebradas como un factor de riesgo para la salud que debe ser considerado.

Consecuentemente, el objetivo general de este estudio es analizar la problemática general de contaminación del aire y su relación con la salud, específicamente en la relación del flujo vehicular con el ruido ambiental y el PM10 en el área urbana de la conurbación Pereira-Dosquebradas.

METODOLOGÍA

Área de estudio

El área de estudio seleccionada es la conurbación Pereira-Dosquebradas, localizada en la región centro-occidental de Colombia. En esta área de estudio fueron seleccionados 3 puntos de muestreo, en los cuales existen estaciones de monitoreo de calidad de aire en los municipios de Pereira y Dosquebradas, para medir variables de flujo vehicular y ruido ambiental contrastando y correlacionando con datos de contaminación del aire

suministrados por estaciones de monitoreo de calidad del aire localizados en los puntos de muestreo.

El primer punto se ubica en el centro de la ciudad de Pereira (**Figura 1**), el segundo sitio en la principal arteria vial de la ciudad de Dosquebradas (**Figura 2**), y el tercer punto se encuentra en la confluencia del flujo de vehículos procedentes de dos grandes superficies comerciales (Alkosto y Home Center) y barrios residenciales del sur de la ciudad de Pereira (**Figura 3**).



Figura 1. Sitio 1: carrera 4 entre calles 25 y 26, Hospital Universitario San Jorge, municipio de Pereira ($4^{\circ}49'4,37''\text{N}$ y $75^{\circ}41'57,91''\text{O}$).



Figura 2. Fábrica de Comestibles La Rosa, Avenida Simón Bolívar, municipio de Dosquebradas ($4^{\circ}49'58,14''\text{N}$ y $75^{\circ}40'26,90''\text{O}$).



Figura 3. Zona de confluencia acceso a la Avenida Sur frente a la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), municipio de Pereira ($4^{\circ}48'24,84''\text{N}$ y $75^{\circ}43'8,06''\text{O}$).

Los puntos de interés para la investigación, son los sitios en donde se encuentran ubicadas las estaciones de monitoreo de calidad de aire de la Corporación Autónoma Regional de Risaralda en el Área Metropolitana Centro Occidente de Colombia (AMCO).

El primer punto de muestreo se localiza en la carrera 4 entre las calles 25 y 26; según la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006b), este punto es clasificado como zona de tranquilidad por encontrarse ubicadas las instalaciones del Hospital Universitario San Jorge.

Los puntos dos y tres se encuentran en un área dedicada principalmente al comercio sobre dos arterias viales importantes para el AMCO, como son la avenida Simón Bolívar, puesto que es la avenida principal del municipio de Dosquebradas y la avenida Las Américas que, después de la implementación del megaproyecto de transporte masivo Megabús, se ha convertido en una de las principales vías de flujo vehicular dedicadas al servicio de transporte público urbano.

Selección de variables objeto de estudio

Para el desarrollo del estudio, se realizó una revisión del estado actual de la movilidad vehicular usando como fuentes primarias los datos reportados por las instituciones de tránsito de los municipios de Pereira y Dosquebradas. Se realizaron mediciones en sitios estratégicos de ambas ciudades y se obtuvieron datos de contaminación del aire en la ciudad de Pereira y Dosquebradas; asimismo, se consultó información en diferentes instituciones: Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), Secretarías de Salud y Seguridad Social de Pereira y Dosquebradas. Se revisó igualmente información bibliográfica y normativa existente sobre el tema.

Esta revisión permitió comprender variables relevantes que contribuyen significativamente a la problemática de la contaminación asociada a la salud, que posteriormente fueron contrastadas con las características y resultados del estudio de flujo vehicular y ruido ambiental en sitios concretos del área de estudio.

Después de tener variables, niveles y unidades identificadas se empleó el software Stella (herramienta de Dinámica de Sistemas), realizándose un modelo para ayudar a comprender el comportamiento de las variables observadas en campo y otras que fueron estudiadas por fuentes secundarias. Se plantearon dos escenarios de comportamiento para la población urbana del municipio de Pereira: el primero considera que durante el periodo simulado, la dinámica poblacional sigue un patrón de comportamiento exponencial; el segundo escenario contempla un patrón de crecimiento exponencial limitado. A partir de estos dos modelos se analizaron los comportamientos del crecimiento del parque automotor y de la morbilidad por enfermedad respiratoria aguda (ERA).

Una vez determinado el diagnóstico con información secundaria de movilidad y contaminación atmosférica, se procedió a identificar las variables que deberían ser caracterizadas y que servirían de soporte en la fase descriptiva del proyecto y en la posterior construcción del modelo de simulación. Estas variables se relacionan a continuación:

- Flujo vehicular, evaluado mediante muestreo *in situ*.
- Composición vehicular, evaluada mediante muestreo *in situ*.
- Material particulado PM₁₀, tomado de las mediciones de estaciones de monitoreo de calidad de aire, administradas por la CARDER.
- Ruido ambiental, evaluado mediante muestreo *in situ*.

Modelo para evaluar el ruido medio en una ciudad

Existen diferentes tipos de modelos que ajustan los datos teóricos obtenidos a los experimentales medidos *in situ*. Todos ellos se basan en calcular la dependencia que tiene el ruido medido en la ciudad con el tráfico vehicular, para lo que se desarrollan fórmulas que relacionan el nivel sonoro continuo equivalente (Leq) con la medida directa de aforos de vehículos a escala logarítmica.

En general los modelos son de la forma: $Leq1=A+B$;

Donde:

A hace referencia a las características de las emisiones.
B son las características físicas o urbanísticas del entorno.

A se compone de un término independiente que hace alusión a la emisión de un solo vehículo ligero, el logaritmo del número de vehículos, diferenciando la tipología de los vehículos, y otras contribuciones derivadas de los propios vehículos como velocidad y estado del vehículo.

B corresponde a las contribuciones adicionadas por efecto de las condiciones del entorno de medida como son: presencia de obstáculos en las cercanías que originen reflexiones (edificios), composición del suelo (firme), presencia de cruces o semáforos en las inmediaciones, pendiente de la calzada, distancia del punto de medida al eje de la calzada, longitud de la calzada.

B es entonces de la forma $B = (\Delta L_{dis} + \Delta L_{vel} + \Delta L_{suel} + \Delta L_{grad} + \Delta L_{refle} + \Delta L_{traf} + \Delta L_{sección} + \Delta L_{pantall} + \dots)$ donde los distintos incrementos, que pueden ser positivos o negativos, se refieren a las correcciones por:

ΔL_{dis} es la distancia al punto de medida.

ΔL_{vel} es la velocidad.

ΔL_{suel} es el pavimento.

ΔL_{grad} es la pendiente de la calzada.

ΔL_{refle} son las reflexiones en los obstáculos del entorno (edificios).

ΔL_{traf} son condiciones límite de tráfico lento.

$\Delta L_{sección}$ es la sección de calzada considerada (largo de la calzada).

$\Delta L_{pantall}$ es la difracción sobre pantallas y por efecto de absorción de la atmósfera (González, Machimbarrena & Sánchez, 2003).

Algunos de los valores propuestos se presentan en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Valores de términos independientes para los modelos teóricos de ruido presentados

| V(km/h) | ΔL_v | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------|--------------|----------------|--------------|---------------|--------------|---------------------------|-----------------|------------------------------|------------------|
| Menos de 30 | -2 | Afirmado | ΔL_s | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| De 30 a 50 | 0 | Asfalto liso | -0,5 | Pendiente (%) | ΔL_g | 15 | 16 | 17 | 18 |
| >50 | 4 | Asfalto rugoso | 0,0 | 5 | 0 | Condiciones de tráfico | ΔL_{vb} | Reflexiones de los edificios | |
| >70 | 5 | Hormigón | 1,5 | 6 | +0,6 | Velocidad <30km/h | -1,5 | Fachada próxima | $\Delta L_f=2,5$ |
| >90 | 6 | Adoquinado | 4,0 | Por unidad | +0,6 | Proximidad de un semáforo | 1,0 | Fachada lado opuesto | $\Delta L_s=1,5$ |

Fuente: González, Machimbarrena & Sánchez (2003).

Los modelos teóricos basados en datos tomados directamente en sitios de observación emplean el modelo general descrito anteriormente. Los más conocidos son los modelos alemán, inglés, suizo, austriaco, nórdico y francés. Particularmente los modelos alemán e inglés fueron probados con los datos del estudio.

Modelo alemán:

$Leq_{(1h)} = 37,3 + 10\log[M \cdot (1 + 0,082 \cdot P)] + (B)$ con M = número de vehículos equivalente por hora y P = porcentaje de vehículos pesados equivalentes por hora (González, Machimbarrena & Sánchez, 2003).

Modelo inglés:

$L_{10} = L_{básico} + (B)$. Donde $L_{básico}$ incluye un término independiente y el número de vehículos. Siendo $L_{10(básico-1h)} = 42,2 + 10\log(q)$ donde q = número de vehículos en una hora. En este caso el parámetro utilizado es el L_{10} (González, Machimbarrena & Sánchez, 2003).

Modelo para evaluar la contaminación por PM_{10} en una ciudad

A partir de las variables medidas *in situ* y los datos diarios de concentración de material particulado, se desarrolló un modelo de simulación para la ciudad de Pereira, con el propósito de representar el comportamiento del sistema en las variables estudiadas (parque automotor, contaminación con MP, enfermedad respiratoria aguda –ERA–), utilizando la metodología de

Dinámica de Sistemas desarrollada por Jay Forrester (1961) mediante el uso del software Stella (High Performance Systems, 2004). De acuerdo con esta metodología, se puede representar cualquier sistema a partir de los conceptos de nivel y flujo, siendo el primero de ellos el componente que tiene la función de acumular o servir de “depósito”, y el segundo el que define la cantidad de cambio del nivel (variación) en función del tiempo. El comportamiento del sistema es definido por los cambios y dinámica del nivel (Figura 4).

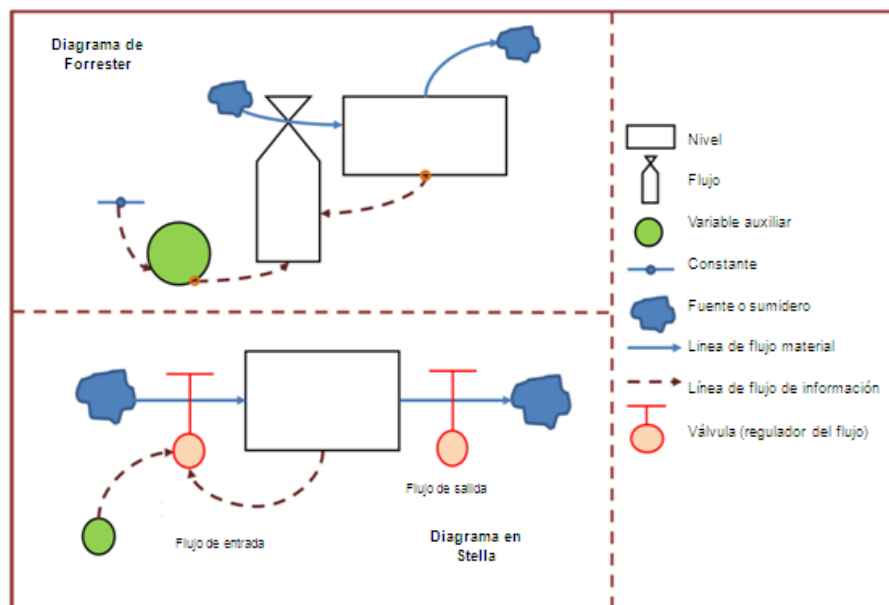


Figura 4. Representación gráfica de los diagramas de Forrester y el software Stella.

El comportamiento del sistema en el tiempo está definido por la dinámica del nivel. El nivel incrementa o disminuye como consecuencia de un flujo. Cuando el flujo de entrada es mayor que el flujo de salida, ocurre acumulación en el nivel. Cuando el flujo de entrada es menor que el flujo de salida, el nivel disminuye. Cuando ambos flujos son iguales, el nivel no presenta cambios.

La ecuación siguiente representa matemáticamente el sistema:

$$Nivel(t) = Nivel(t_0) + \int_{t_0}^t (Flujo\ de\ entrada - Flujo\ de\ salida) \cdot ds \quad Eq. 1$$

$$\frac{d(Nivel)}{dt} = (Flujo\ de\ entrada - Flujo\ de\ salida) \quad Eq. 2$$

El modelo fue construido tomando como factores de emisión seleccionados para vehículos livianos y pesados, la propuesta presentada en el estudio realizado por Manzi et al. (2003) para la ciudad de Bogotá y el estudio de Londoño, Correa y Palacio (2011) para el área urbana de Envigado. Adicionalmente, en el modelo se dan estimaciones de los costos ambientales asociados a la emisión contaminante y la concentración esperada bajo un modelo de celda fija como una herramienta para la

aproximación de la dinámica de material particulado, siguiendo la propuesta de Morales, Martínez y Valera (2012). Se aplicó un factor constante de inflación de 2%.

RESULTADOS

Niveles de contaminación ambiental del aire

De acuerdo con los informes de las estaciones de monitoreo de calidad del aire, obtenidos por la Red de Calidad del Aire de la Corporación Autónoma Regional de Risaralda, durante el periodo de 2000 a 2008 sobre los parámetros PM₁₀, monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y ozono, el único parámetro que se excede de las normas nacionales es el PM₁₀ (Tabla 2). Para el año 2012 los resultados promedios continúan indicando un índice de calidad bueno por presencia de partículas respirables y gases según los registros de en las estaciones de monitoreo de calidad del aire en el Área Metropolitana (CARDER, 2012b)

Tabla 2. Número de episodios diarios de material particulado menor a diez micras, PM₁₀ en los municipios de Pereira y Dosquebradas

| Variable | 2000-2008 | | 2012 | |
|--------------------------------|-----------|--------------|---------|--------------|
| | PEREIRA | DOSQUEBRADAS | PEREIRA | DOSQUEBRADAS |
| Número de datos | 367 | 249 | 65 | 40 |
| Promedio (µg/m³) | 40 | 41 | 39 | 56 |
| Dato máximo (µg/m³) | 82 | 90 | 110 | 116 |
| Dato mínimo (µg/m³) | 10 | 3 | 16 | 25 |
| Concentración de fondo (µg/m³) | 18 | 15 | - | - |
| Norma diaria (µg/m³) | 150 | 150 | 100 | 100 |
| Norma anual (µg/m³) | 70 | 70 | 50 | 50 |
| NVSND | 0 | 0 | 1 | 2 |
| NVSNA | 15 | 28 | 5 | 24 |

NVSND: número de veces que supera la norma diaria.
NVSNA: número de veces que supera la norma anual.
Fuente: CARDER (2012b).

Según el informe del “Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire” (CARDER, 2012b), “los promedios del Área Metropolitana Centro Occidente se encuentran dentro del mismo rango, y los resultados totales no superan la norma diaria, sin embargo en algunos episodios supera la norma anual, el más alto es el municipio de Dosquebradas”, esto se evidencia durante todos los diferentes años que han sido objeto de medición incluyendo 2008 (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados mediciones de material particulado menor a diez micras en los sitios estudiados, año 2008

| Variable | Sitio | | |
|---|--------|----------|--------------|
| | CARDER | HOSPITAL | DOSQUEBRADAS |
| Número de datos | 61 | 60 | 91 |
| Promedio del primer trimestre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 34 | | 48 |
| Promedio del segundo trimestre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 35 | 46 | 56 |
| Promedio del tercer trimestre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | - | - | 54 |
| Promedio del total año ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 34 | 46 | 53 |
| Dato máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 100 | 74 | 79 |
| Dato mínimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 13 | 26 | 23 |
| Concentración de fondo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 15 | 18 | 15 |
| AQI dato máximo | 73 | 60 | 63 |
| AQI dato mínimo | 12 | 24 | 21 |
| NVSND | 0 | 0 | 0 |
| NVSNA | 2 | 3 | 14 |
| Norma diaria | 150 | 150 | 150 |
| Norma Anual | 70 | 70 | 70 |

NVSND: número de veces que supera la norma diaria.

NVSNA: número de veces que supera la norma anual.

Fuente: CARDER (2012a).

De igual forma, CARDER (2012b) reporta que los resultados obtenidos sobre los parámetros de monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y ozono “están muy por debajo de la norma de calidad de aire y no la superan” (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados de monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y ozono en los municipios de Pereira y Dosquebradas

| PARAMETRO | MONOXIDO DE CARBONO | | DIOXIDO DE AZUFRE | DIOXIDO DE NITROGENO | OZONO |
|------------------|---------------------|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------|
| | PEREIRA | DOSQUEBRADAS | | PEREIRA | |
| PROMEDIO | 2,29 PPM | 0,14 PPM | 16,6 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 31,67 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 0,002975 PPM |
| VALOR MAXIMO PPM | 10,61 PPM | 0,16 PPM | 19 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 51,5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 0,044 PPM |
| NORMA 1 HORA | 35 PPM | 35 PPM | 19 | 200 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 0,061 PPM |
| NORMA 6 HORAS | 8,8 PPM | 8,8 PPM | 20 | 21 | 0,041 PPM |
| NORMA ANUAL | | | 80 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 100 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 22 |
| NORMA 24 HORAS | | | 250 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 150 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 23 |
| NORMA 3 HORAS | | | 750 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | 24 | 25 |
| NVSND | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| NVSNA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

NVSND: número de veces que supera la norma diaria.

NVSNA: número de veces que supera la norma anual.

Fuente: CARDER (2012b).

El Decreto 979 de 2006 en el artículo 108 establece la clasificación de “Áreas - Fuente de contaminación” en zonas urbanas o rurales del territorio nacional, según la cantidad y características de las emisiones y el grado de concentración de contaminantes en el aire. Conforme a esta clasificación, el informe de CARDER ha establecido la clasificación para los municipios monitoreados (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006a) (Tabla 5).

Tabla 5. Clasificación de áreas en la conurbación Pereira-Dosquebradas

| Variable | PEREIRA | DOSQUEBRADAS |
|---------------------------|--|-----------------------------|
| Número de datos | 367 | 249 |
| NVSNA | 15 | 28 |
| Frecuencia porcentual (%) | 4 | 11 |
| Clasificación | Área fuente con excedencia inferior al 10% | Área contaminación MARGINAL |

NVSNA: número de veces que supera la norma anual.

Fuente: según el Decreto 979 de 2006 artículo 5 (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006a).

Comportamiento del flujo vehicular y el ruido en sitios de muestreo

En general se encontró que el comportamiento del flujo vehicular como era de esperarse es significativamente superior ($p < 0,05$) en horas pico que en horas normales, al considerar como horas pico tres periodos de tiempo comprendidos entre las horas de la mañana (7:30a.m. a 8:00a.m.), horas del mediodía (11:30a.m. a 1:00p.m.) y horas de la tarde (5:00p.m. a 7:00p.m.) (Figura 5).

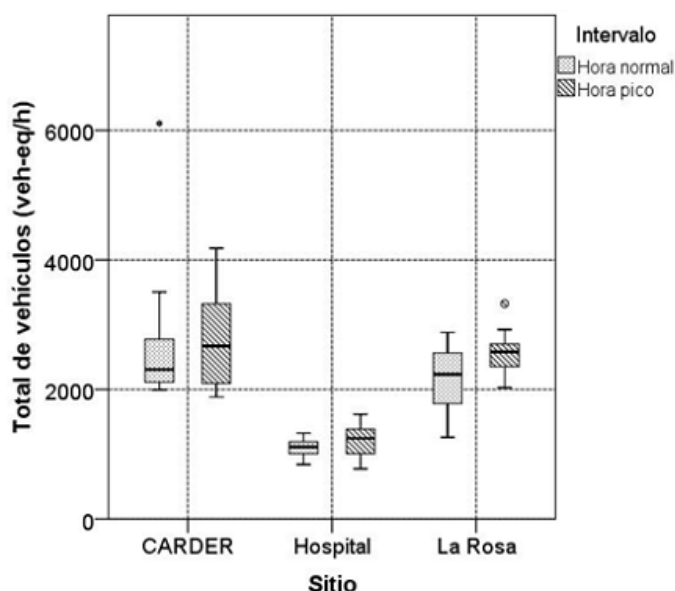


Figura 5. Comportamiento del ruido ambiental en sitios de muestreo según horas normales y horas pico.

Con respecto al ruido la tendencia general fue similar al comportamiento del flujo vehicular, siendo más evidente en los sitios de muestreo de las estaciones de monitoreo de calidad de aire ubicadas en CARDER y el Hospital San Jorge (Figura 6). La hora pico de la tarde es la que presentó el mayor flujo vehicular (Figura 7), mostrando una correspondencia esperada con los niveles de presión sonora tomados en los sitios estudiados (Figura 8).

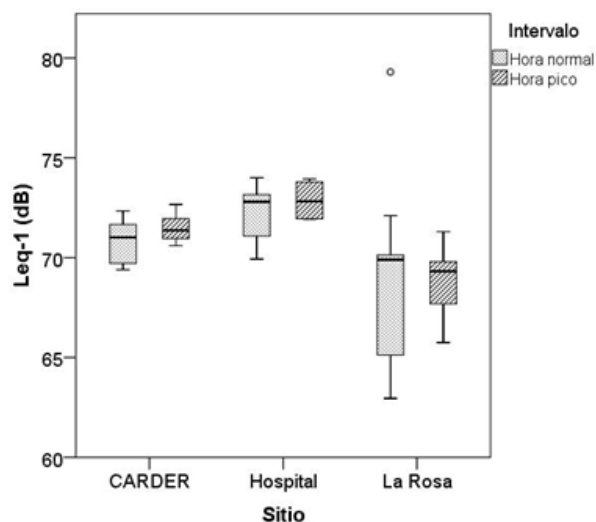


Figura 6. Comportamiento de la intensidad sonora media en sitios de muestreo.

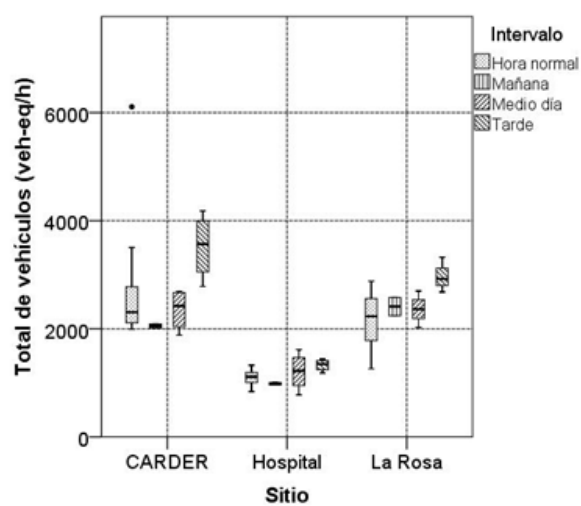


Figura 7. Comportamiento del flujo vehicular en sitios de muestreo según horas normales y jornada de hora pico.

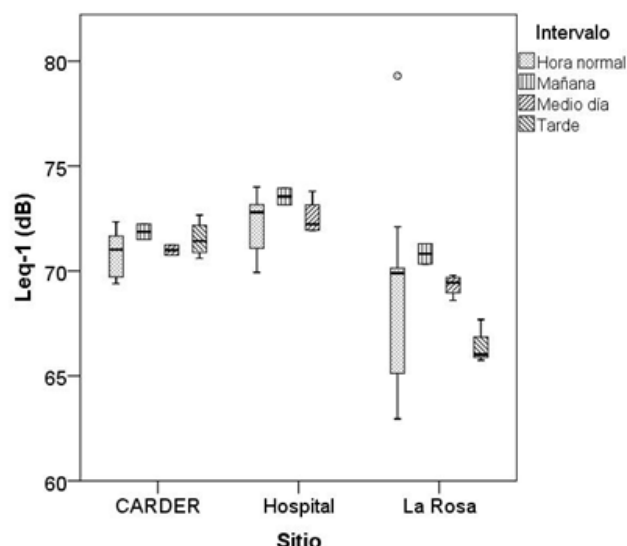


Figura 8. Comportamiento de la intensidad sonora media en sitios de muestreo según horas normales y jornada de hora pico.

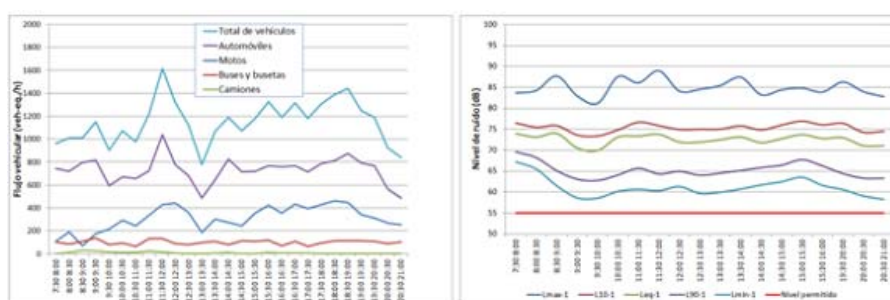
Muestreo en Hospital San Jorge de Pereira

Sobre los tres sitios estudiados, dada su importancia sobre la salud pública, se destaca el muestreo realizado en el Hospital Universitario San Jorge, que permitió estimar valores de flujo máximo y mínimo de 1616 Veh-Eq/h y 776 Veh-Eq/h con un promedio de 1143,9 Veh-Eq/h, siendo menor los valores que los encontrados en los otros dos sitios estudiados (**Tabla 6**). Se encontró una alta variabilidad en el flujo vehicular de este sector de la ciudad de Pereira, con evidentes picos en las horas del mediodía (11:30 a 12:30 p.m.) y horas de la tarde (5:30 a 7 p.m.) (**Figura 9**). El flujo máximo más importante corresponde a la tipología de automóviles con un pico máximo de 1040 Veh-Eq/h, seguido por motos con 464 Veh-Eq/h.

Sin embargo, es evidente que se están sobrepasando los límites permitidos por la norma nacional para ruido ambiental cerca de hospitales (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006b), alcanzando valores superiores a 55dB **Figura 9**).

Tabla 6. Intensidad de flujo vehicular en sitios de muestreo

| Intensidad del flujo vehicular (Veh-Eq/h) | | | | | |
|---|-------|-----------------|----------|-------------|--------------------|
| Estadística | Motos | Buses y busetas | Camiones | Automóviles | Total de vehículos |
| Sitio 1: Hospital San Jorge | | | | | |
| Máximo | 464 | 138 | 30 | 1040 | 1616 |
| Mínimo | 72 | 60 | 0 | 486 | 776 |
| Media | 308,1 | 98,9 | 8,3 | 728,5 | 1143,9 |
| Sitio 2: Comestibles La Rosa | | | | | |
| Máximo | 1376 | 196 | 108 | 1896 | 3324 |
| Mínimo | 408 | 72 | 6 | 744 | 1260 |
| Media | 925,9 | 129,8 | 54,6 | 1215,5 | 2325,8 |
| Sitio 3: CARDER | | | | | |
| Máximo | 2184 | 384 | 132 | 3492 | 6108 |
| Mínimo | 108 | 150 | 18 | 1086 | 1884 |
| Media | 781,4 | 240,9 | 76,1 | 1594,6 | 2693,1 |

**Figura 9.** Patrón de comportamiento del flujo vehicular y el ruido ambiental en Hospital San Jorge.

La composición del parque automotor encontrada en este sitio está representada principalmente por automóviles (64% incluyendo taxis) y motos (27%).

Modelo de ruido y flujo vehicular

Un estudio convencional muestra que no se encuentran correlaciones significativas ($P > 0,05$) entre el flujo vehicular y el nivel de ruido; de igual modo, los modelos lineal y no lineales estudiados mediante el análisis Curve Fitting del software SPSS no mostraron relación alguna entre las variables estudiadas. Sin embargo, se encontraron tendencias en algunos de los sitios.

Para lograr entonces describir el comportamiento del ruido en función del flujo vehicular, se acudió a la propuesta de los diferentes modelos que existen para este propósito y se establecieron los coeficientes apropiados para cada sitio de estudio.

El modelo general es de la forma:

$$Leq1 = \log(Veh) + B$$

El modelo presenta un R^2 de 0,53, permitiendo explicar un 53% de la variabilidad del nivel sonoro equivalente ($Leq1$) medido en los diferentes sitios muestreados.

$$Leq1 = 67,0 - 3,4 * TP + 1,2 * CLT - 1,6 * \log(Motos) + 3,5 * \log(Automóviles) - 1,3 * \log(Vehículos_grandes).$$

TP: coeficiente para tipo de pavimento (**Tabla 1**).
 CLT: coeficiente para condiciones límite del tráfico (**Tabla 1**).
 Motos: flujo de motos equivalente por hora.
 Automóviles: flujo de automóviles equivalentes por hora.
 Vehículos_grandes: flujo de buses, busetas y camiones equivalentes por hora.

Al comparar el modelo desarrollado con modelos alemán e inglés propuestos en la literatura, se encuentra que ninguno de ellos describe correctamente los datos observados y sus correlaciones son negativas, con coeficientes de correlación de Pearson $r = -0,48$ y $r = -0,26$, respectivamente. Desde el punto de vista de los autores, ambos modelos sobreestiman los valores reales de ruido ambiental en los sitios estudiados.

El modelo ajustado encontrado por los autores en este estudio, debe ser considerado como un modelo preliminar que puede ser de mucha utilidad para conocer las condiciones de ruido ambiental promedio en intervalos de 30 minutos (presión sonora equivalente), en los sitios estudiados a partir de mediciones de flujo vehicular, permitiendo proyectar situaciones futuras en función del crecimiento del parque automotor esperado y especialmente en horas de máximo flujo vehicular u horas pico.

Otros modelos simples sin contemplar el término independiente, mostraron un menor ajuste lineal ($0,3 < R^2 < 0,4$) para cada sitio y para el total de sitios muestreados entre las variables logaritmo del flujo vehicular ($\log_vehicul$) y presión sonora equivalente ($Leq1$) (**Figura 10**), sin embargo, pueden ser de utilidad para conocer el comportamiento del ruido en función del flujo vehicular total.

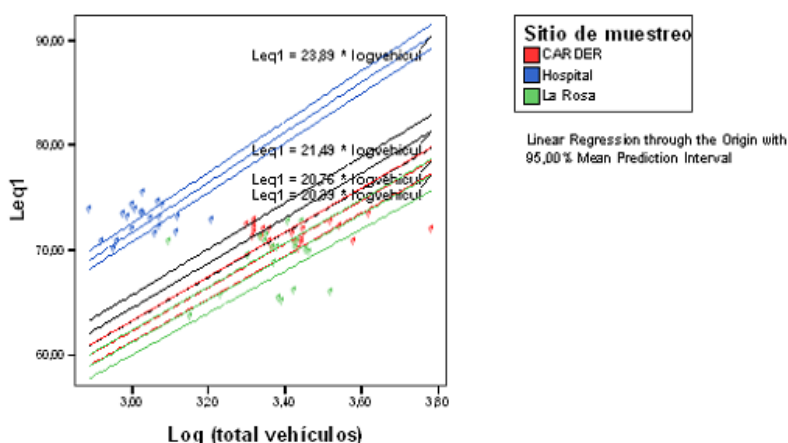


Figura 10. Modelos de regresión de presión sonora en función del flujo vehicular sin considerar término independiente.

Modelo de simulación para contaminación ambiental y flujo vehicular

Los modelos de simulación analizados permitieron mostrar la relación encontrada entre el crecimiento del parque automotor de la ciudad y la morbilidad por ERA. Cuando se relacionó la emisión contaminante con PM_{10} , el modelo evidenció dos comportamientos que deben ser considerados. El primero de ellos es la relación entre morbilidad y emisión, y el segundo la relación entre morbilidad y concentración. Ambas relaciones deben ser estudiadas con mayor detalle para obtener resultados más cercanos a la realidad (Figura 11).

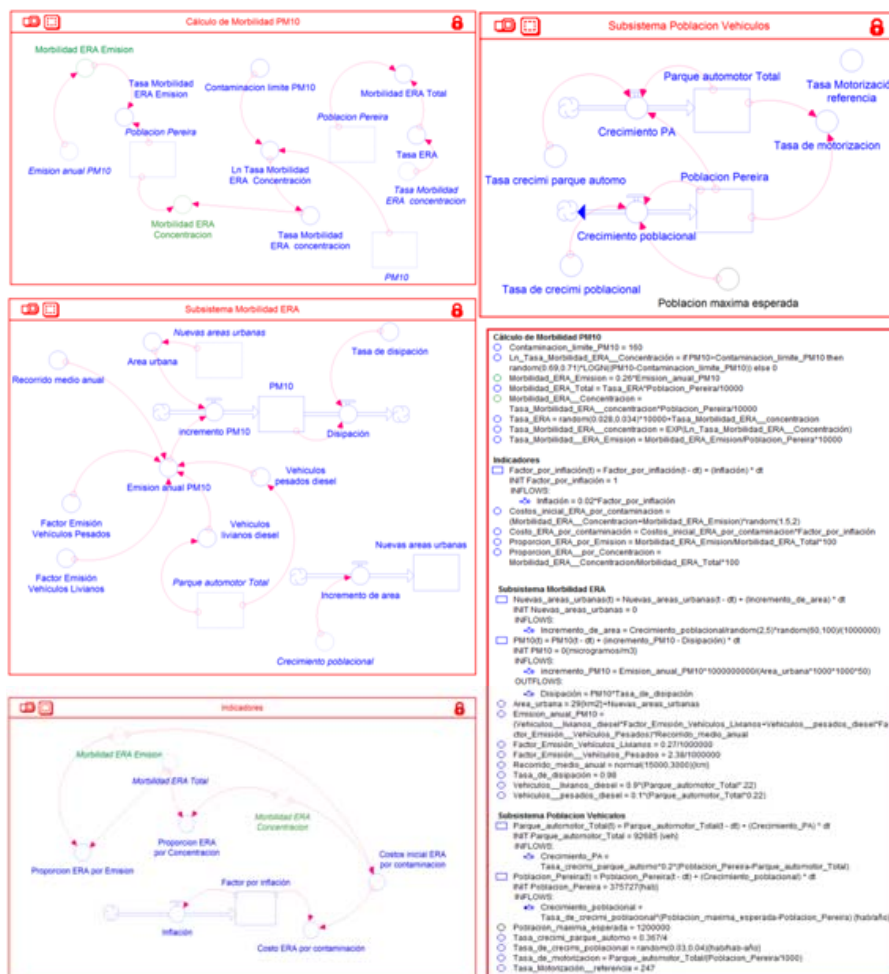


Figura 11. Modelo de dinámica del flujo vehicular, contaminación por PM10 y ERA con crecimiento urbano limitado.

De lo anterior se deriva que son dos fenómenos de contaminación que afectan la salud, que implican intervenciones de control distintas. Por un lado, la emisión contaminante participa anualmente con casos de morbilidad por ERA, lo cual significa que dependiendo de la cantidad de vehículos en circulación durante un periodo particular, se afectará el número de casos atendidos por ERA. Los análisis de correlación no paramétrica de Spearman entre los logaritmos naturales de la tasa ERA y la concentración de la contaminación fueron estadísticamente significativos ($P < 0,05$), encontrando un coeficiente de 0,7 como pendiente del modelo lineal sin término independiente. Este valor se usó como base para simular la tasa de morbilidad ERA por concentración, dado que el ambiente mantiene durante cierto tiempo los contaminantes emitidos, generando morbilidad por concentración cuando esta sobrepasa los niveles tolerables ($PM_{10} > 160 \mu g/m^3$, según estándares).

La mayor diferencia entre ambos modelos, crecimiento exponencial y crecimiento limitado, para las variables morbilidad, tasa de morbilidad ERA y costos ambientales asociados, se da sobre la tendencia en la dinámica de la población del modelo exponencial limitado, por no seguir creciendo más allá de los límites establecidos, mientras en el modelo exponencial es claro que seguirá creciendo a medida que la dinámica poblacional y del parque automotor lo siga haciendo, bajo el supuesto de que los límites territoriales

para el crecimiento urbano se puedan seguir incrementando. Ambos escenarios son probables en el horizonte de tiempo simulado, hasta el año 2050.

Modelo con dinámica poblacional de crecimiento exponencial

El modelo con dinámica de crecimiento exponencial muestra que bajo las condiciones actuales, si se mantienen las dinámicas de los últimos 5 años, la población urbana podrá llegar a valores entre 1,8 y 2,0 millones de habitantes para antes del año 2050 (Figura 12).

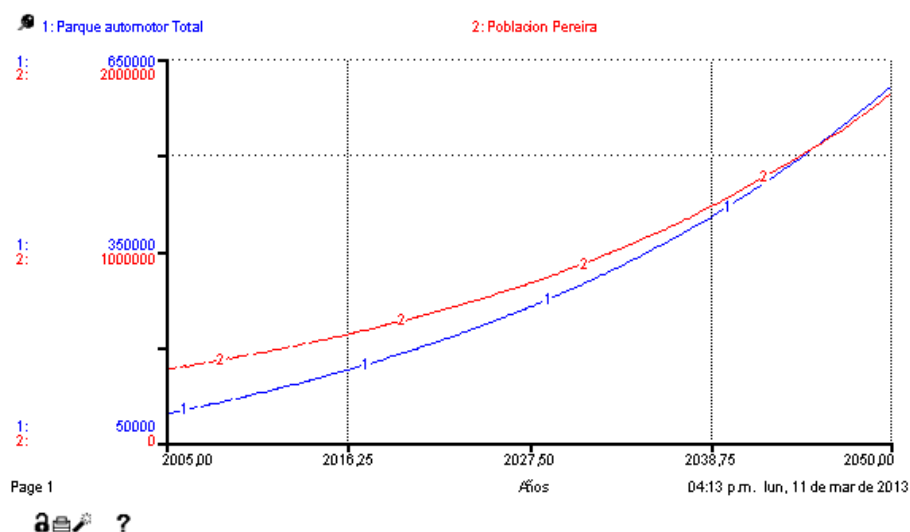


Figura 12. Comportamiento de la población urbana de Pereira y el parque automotor, según modelo de crecimiento exponencial.

La tasa de motorización encontrada en este modelo se elevaría hasta un 70% a 80% del valor actual (247 vehículos/1000hab), con una clara tendencia hacia la rápida estabilización derivada de las relaciones establecidas en el modelo (Figura 13).

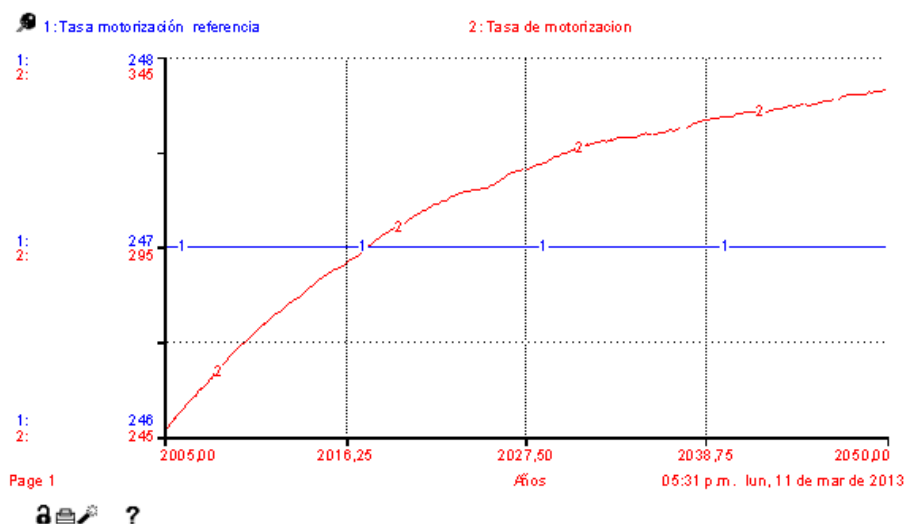


Figura 13. Comportamiento de la tasa de motorización, según modelo de crecimiento exponencial.

La emisión de contaminante PM_{10} llegará a valores alrededor de las 1000 toneladas/año, valor que variará en función del parque automotor circulante por la ciudad, la calidad de las vías disponibles, la tecnología de combustión predominante y el tipo de combustible empleado (**Figura 14**).

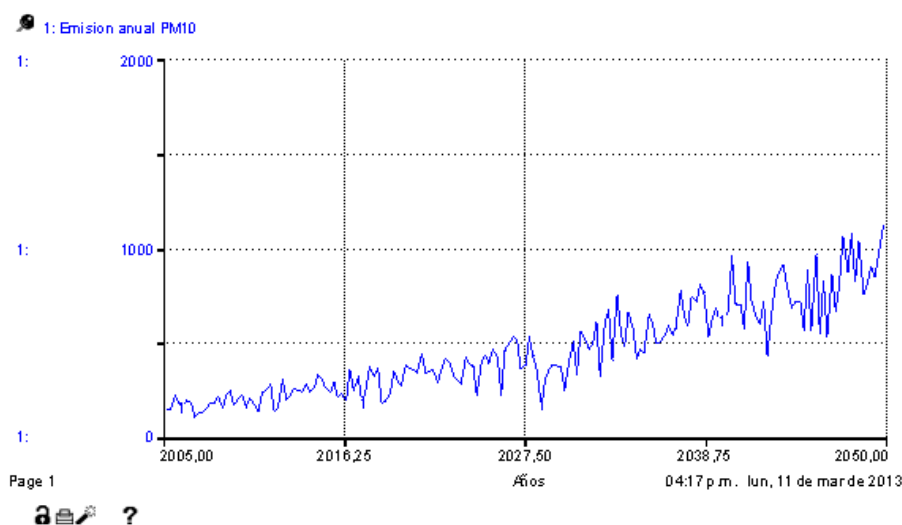


Figura 14. Comportamiento de la emisión PM_{10} , según modelo de crecimiento exponencial.

El modelo mostró que a medida que se emiten contaminantes (PM_{10}), la concentración de estas sustancias en el ambiente de la ciudad seguirá creciendo hasta valores críticos que comprometen la salud de la población de Pereira. De continuar esta tendencia, en el futuro se espera que superelos 160 $\mu g/m^3$ (**Figura 15**).

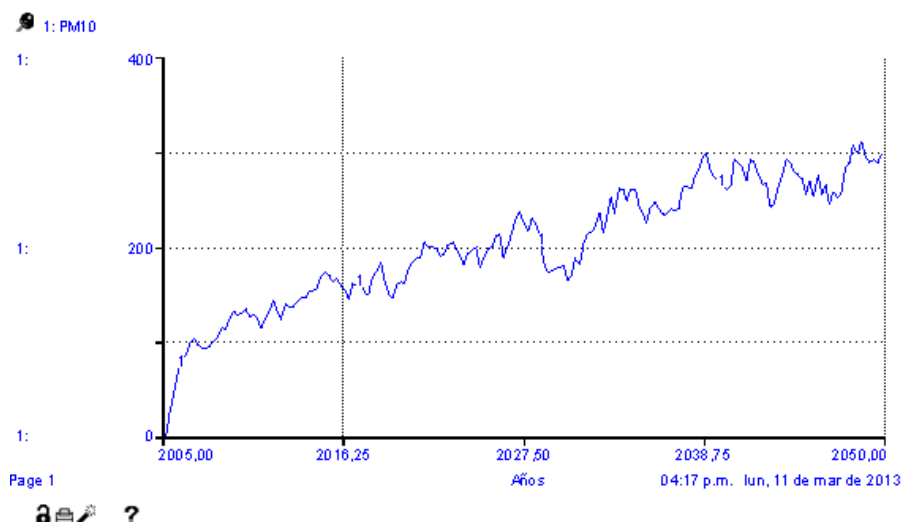


Figura 15. Comportamiento de la concentración PM_{10} , según modelo de crecimiento exponencial.

La tasa de morbilidad por ERA según emisión contaminante se mantendrá en el rango de los valores actuales, mientras que la tasa de morbilidad por concentración PM_{10} se incrementará, evidenciando que la capacidad del ambiente para disipar el contaminante acumulado se verá superada (Figura 16). La morbilidad por ERA calculada como efecto de la emisión contaminante del parque automotor crecerá en función del crecimiento de la población y el parque automotor (Figura 17), alcanzando proporciones cercanas al 10% del total de la morbilidad de ERA. Esta situación revela que aunque en la actualidad no es posible atribuir la morbilidad ERA como causa de la contaminación, dado que los niveles de concentración PM_{10} actualmente son inferiores a $160 \mu g/m^3$, a futuro su contribución será significativa (Figura 15 y Figura 18).

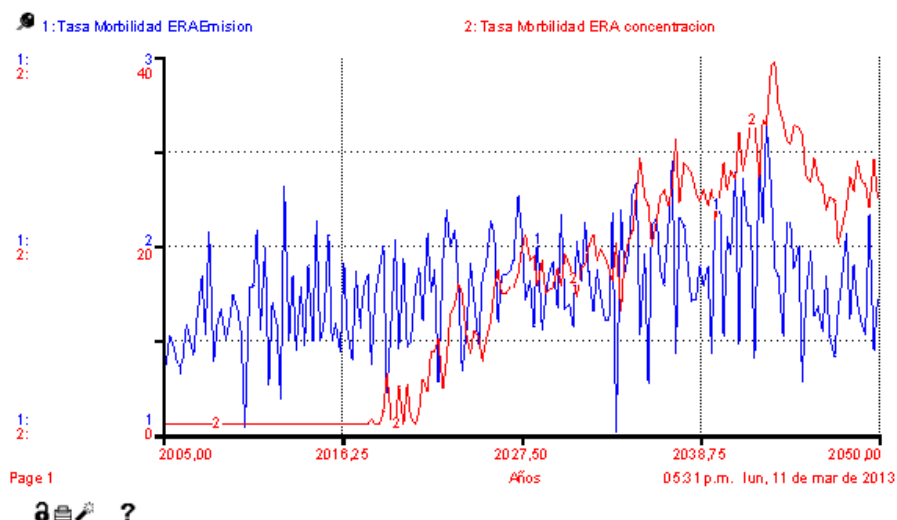


Figura 16. Comportamiento de la tasa de morbilidad ERA por causa de contaminante PM_{10} , según modelo de crecimiento exponencial.

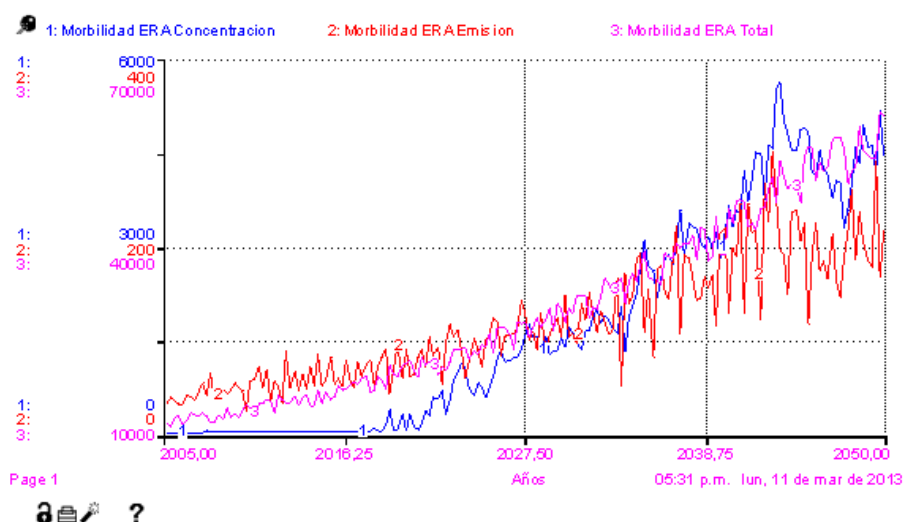


Figura 17. Comportamiento de la morbilidad ERA por causa de contaminante PM_{10} , según modelo de crecimiento exponencial.

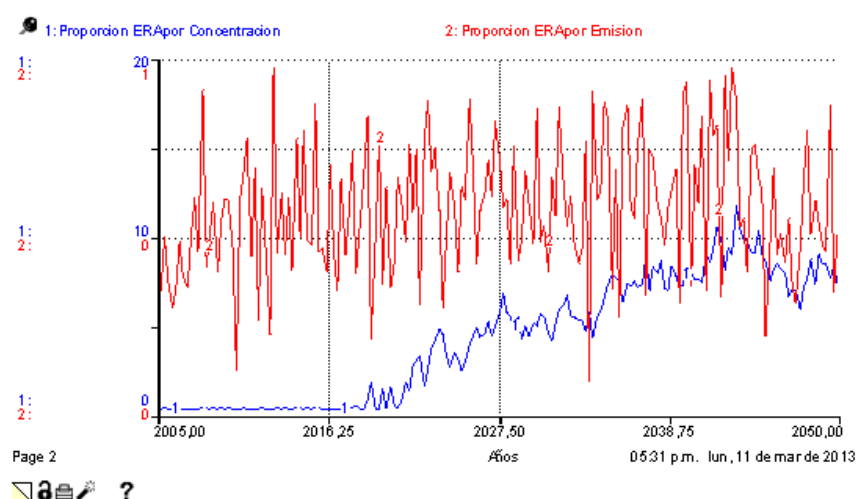


Figura 18. Proporción de ERA causada por contaminación PM_{10} , por emisión y concentración, según modelo de crecimiento exponencial.

Los costos de hospitalización derivados de la contaminación por PM_{10} emitido por el parque automotor, si bien es actualmente cero, podrá llegar a niveles cercanos a los 30000 millones de pesos para el año 2050 (15000 millones en pesos del año 2013) (Figura 19), lo que representaría cerca del 3% del presupuesto anual del municipio³ (ajustado por una tasa de inflación constante del 2%) y que es equivalente a \$32278/hab/año valor que llegaría a ser 100 veces el estimado para el año 2010 por Morales, Martínez y Valera (2012).

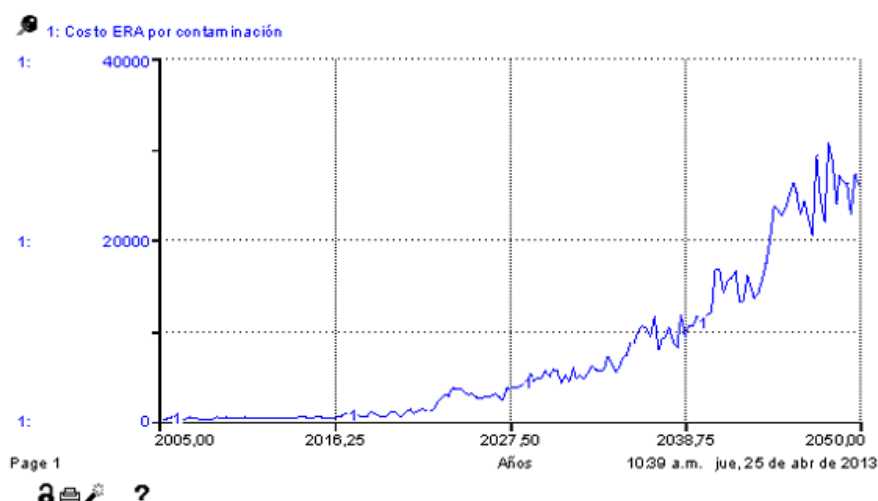


Figura 19. Comportamiento de los costos de atención hospitalaria por morbilidad ERA por causa de contaminante PM_{10} , según modelo de crecimiento exponencial.

Modelo con dinámica poblacional de crecimiento exponencial limitado

El modelo con dinámica de crecimiento exponencial limitado, muestra que bajo las condiciones actuales, la población urbana podrá llegar a valores cercanos a 1,0 millones de habitantes para antes del año 2050 (Figura 20).

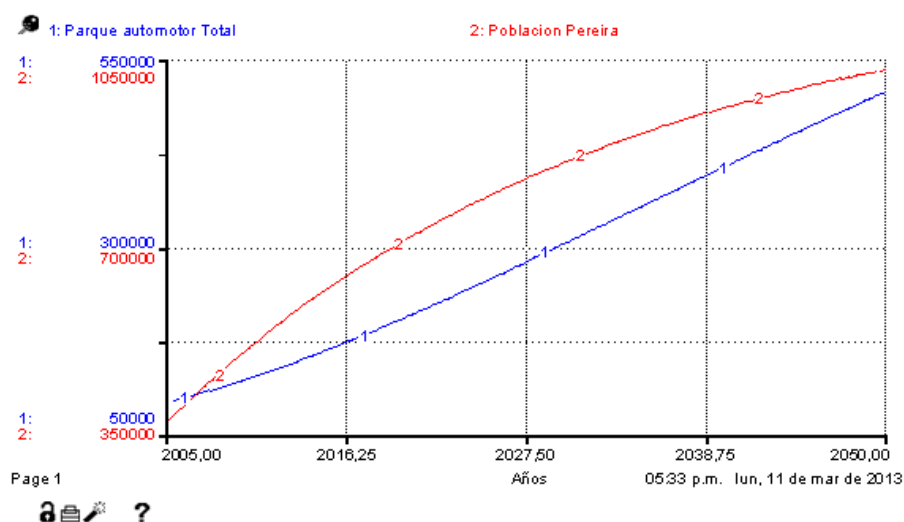


Figura 20. Comportamiento de la población urbana de Pereira y el parque automotor, según modelo de crecimiento exponencial limitado.

En este modelo, la tasa de motorización se duplicaría sobre el valor actual (247 vehículos/1000hab, como valor estimado a partir de estadísticas del Instituto Municipal de Tránsito de Pereira), con una clara tendencia de crecimiento con estabilización posterior al año 2050 en función de las relaciones establecidas en el modelo (Figura 21).

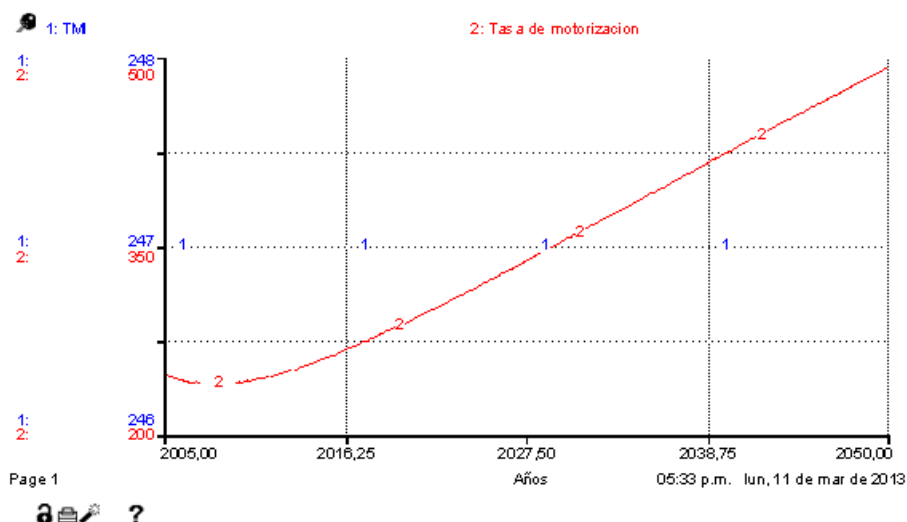


Figura 21. Comportamiento de la tasa de motorización, según modelo de crecimiento exponencial limitado.

Al igual que en el modelo de crecimiento exponencial, la emisión de contaminante PM_{10} llegará a valores alrededor de las 1000 toneladas/año, valor que variará en función del parque automotor circulante por la ciudad, la calidad de las vías disponibles, la tecnología de combustión predominante y el tipo de combustible empleado (Figura 22).

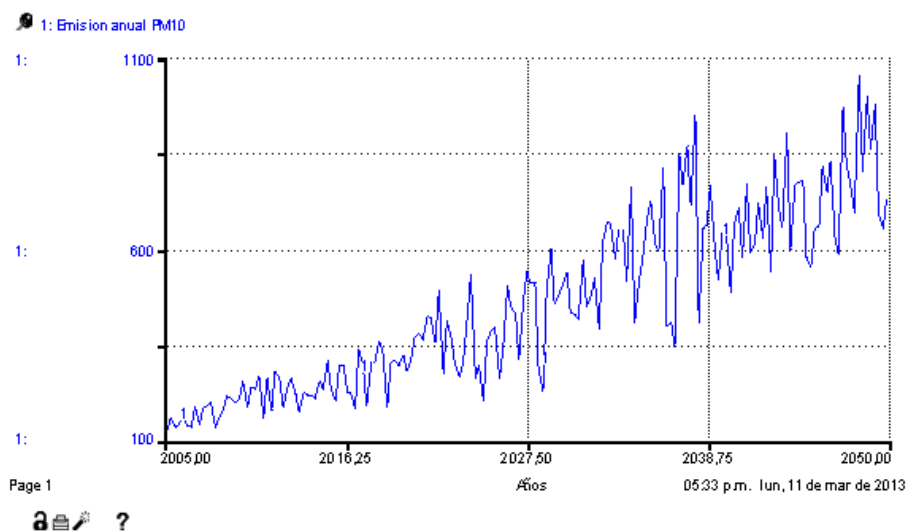


Figura 22. Comportamiento de la emisión PM_{10} , según modelo de crecimiento exponencial limitado.

El modelo con crecimiento limitado corroboró lo evidenciado en el modelo de crecimiento exponencial, mostrando que a medida que se emiten contaminantes (PM_{10}), la concentración de estas sustancias en el ambiente de la ciudad seguirá creciendo hasta valores críticos que comprometen la salud de la población de Pereira, superiores a $160 \mu g/m^3$ (Figura 23).

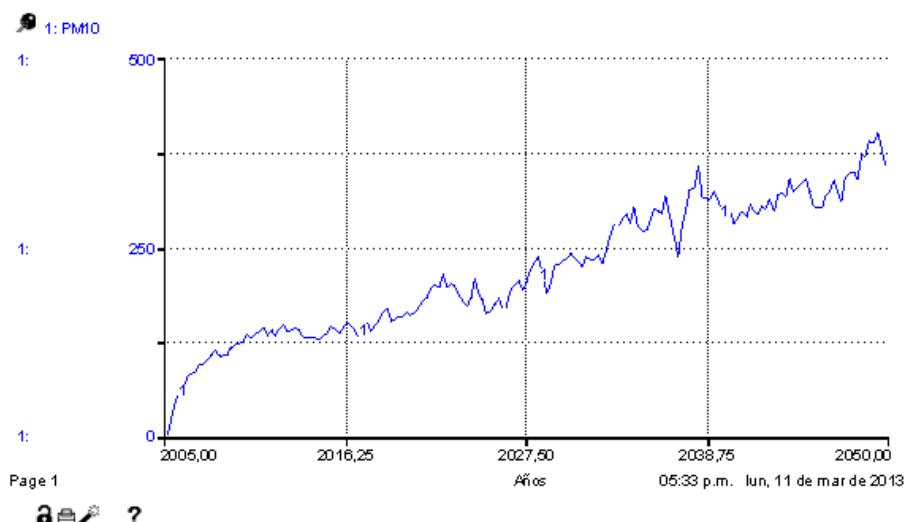


Figura 23. Comportamiento de la concentración PM_{10} , según modelo de crecimiento exponencial limitado.

Al igual que en modelo de crecimiento exponencial, la tasa de morbilidad por emisión contaminante y la tasa de morbilidad por concentración PM_{10} se incrementarán, evidenciando que la capacidad del ambiente para disipar el contaminante acumulado se verá superada (Figura 24). Consecuentemente, la morbilidad por ERA asociada a la emisión de contaminante (PM_{10}) por vehículos, se incrementará conforme se da el crecimiento de la población y del parque automotor (Figura 25), pasando de no afectación atribuible a los niveles de contaminación actual, alcanzando proporciones cercanas al 12,5% del total de la morbilidad de ERA en el futuro (Figura 23 y Figura 26).

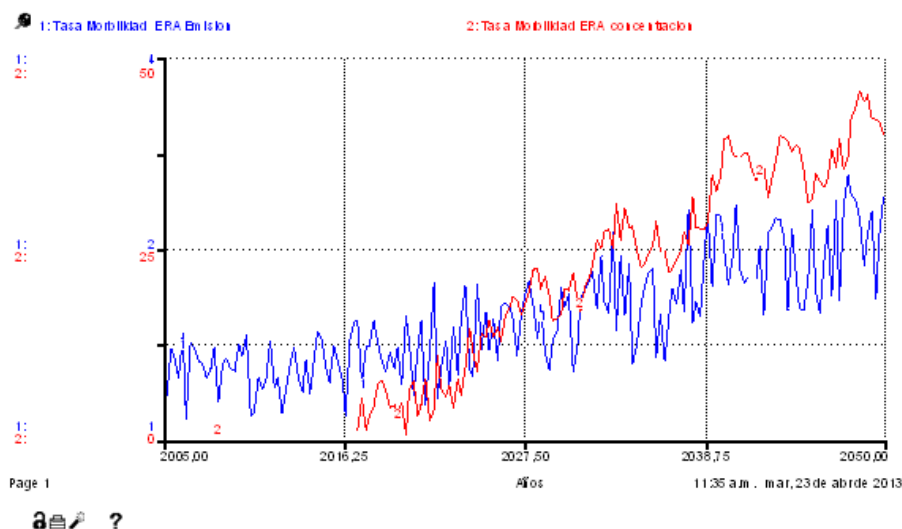


Figura 24. Comportamiento de la Tasa de morbilidad ERA por causa de contaminante PM_{10} , según modelo de crecimiento exponencial limitado.

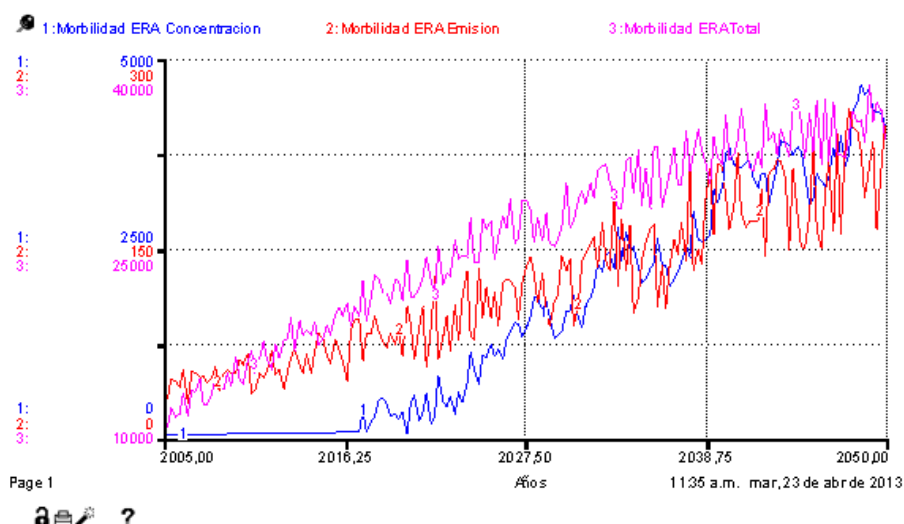


Figura 25. Comportamiento de la morbilidad ERA por causa de contaminante PM_{10} , según modelo de crecimiento exponencial limitado.

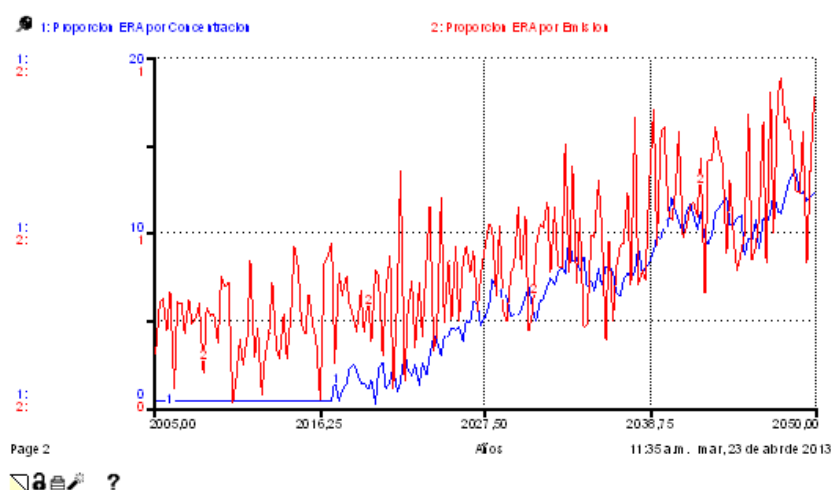


Figura 26. Proporción de ERA causada por contaminación PM_{10} , por emisión y concentración, según modelo de crecimiento exponencial limitado.

Los costos de hospitalización asociados a la contaminación por PM_{10} emitido por el parque automotor, llegará a niveles cercanos a los 22000 millones de pesos para el año 2050 (10000 millones en pesos del año 2013) (Figura 27), lo que representaría cerca del 2% del presupuesto anual del municipio⁴, siendo equivalente a \$21518/hab/año [67 veces el valor estimado para el año 2010 por Morales, Martínez y Valera (2012)].

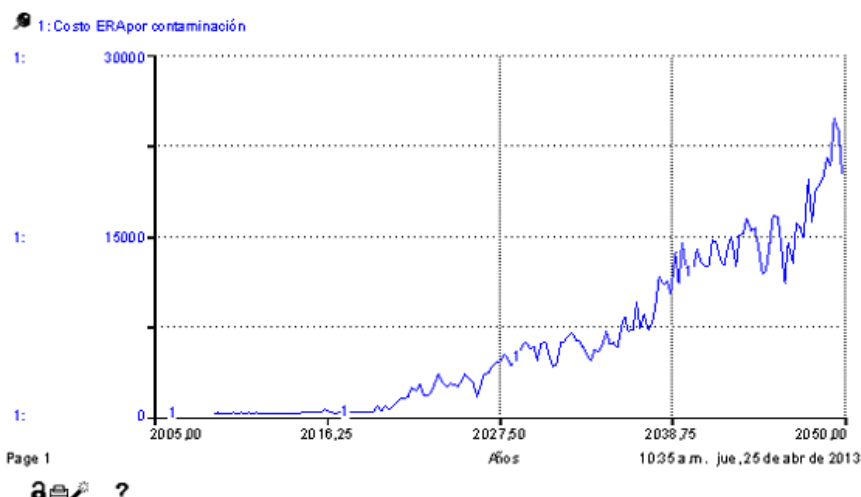


Figura 27. Comportamiento de los costos de atención hospitalaria por morbilidad ERA por causa de contaminante PM_{10} , según modelo de crecimiento exponencial.

CONCLUSIONES

Los niveles de contaminación actual de material particulado y gases reportado por las estaciones de monitoreo de la red de calidad ambiental del aire de la CARDER, se encuentran dentro de los límites permisibles por las normas nacionales.

Los niveles de contaminación por ruido en los sitios de muestreo llegan a superar la norma nacional, siendo especialmente crítico en el Hospital San Jorge y las instalaciones de la CARDER sobre la avenida Sur de Pereira.

El comportamiento del flujo vehicular es significativamente superior en horas pico de la tarde con relación a las restantes horas del día.

El comportamiento del ruido ambiental es significativamente superior en horas pico con relación a las horas de circulación normal de flujo vehicular.

El flujo vehicular en los sitios estudiados guarda correspondencia con los niveles de ruido ambiental medidos en campo, siendo el sector de las oficinas de la CARDER, el que presenta el mayor flujo vehicular tanto en horas normales como pico.

El modelo predictivo del ruido ambiental encontrado empíricamente se comporta mejor que los propuestos en la literatura y, aunque de forma preliminar, puede indicar un nuevo tipo de modelo aplicable al contexto de pequeñas ciudades en crecimiento como Pereira y Dosquebradas.

La Enfermedad Respiratoria Aguda (ERA) presente actualmente en la ciudad, bajo los estándares de contaminación medidos en las estaciones de monitoreo de calidad de aire de CARDER, no podría ser atribuible a la emisión producida por el parque automotor.

La dinámica de crecimiento de la población seguirá siendo creciente, mientras no existan limitaciones de disponibilidad de área urbana o para

expansión, y mientras se conserven las características de polo de atracción propios de la ciudad.

Si las condiciones de crecimiento del parque automotor circulante continúan a igual ritmo, en menos de 8 años se pueden empezar a notar considerablemente los efectos de las concentraciones elevadas de material particulado por efecto del parque automotor circulante en la ciudad de Pereira.

Los modelos para evaluar la Enfermedad Respiratoria Aguda como efecto de la contaminación ambiental del aire solo consideraron el efecto de las fuentes móviles, sin tener en cuenta las emisiones producidas por la industria y su potencial crecimiento futuro.

Los modelos de simulación mostraron que a pesar de trabajar sobre un escenario de crecimiento poblacional y del parque automotor limitado, los niveles de contaminación se harán evidentes en corto plazo, implicando gastos en atención hospitalaria al menos del orden del 2% del presupuesto del municipio.

Es posible evaluar puntualmente los efectos de las emisiones contaminantes arrojadas al ambiente por fuentes móviles a partir del estudio del flujo vehicular y relacionarlo con la incidencia de ERA en los sectores estudiados.

Dado que este estudio es solo preliminar, se deberá continuar depurando y ajustando los modelos a partir de mediciones que combinen al tiempo concentraciones de sustancias contaminantes y material particulado, ruido ambiental y flujo vehicular, y que permitan elaborar una zonificación de calidad ambiental del aire y ruido (mapa de ruido) para sectores de interés de la conurbación Pereira-Dosquebradas que sirvan como herramienta para el desarrollo de políticas que mejoren la calidad ambiental de dichos sectores.

AGRADECIMIENTOS

Al Semillero de Investigación en Sistemas Complejos, perteneciente al Grupo de Investigación en Gestión Ambiental Territorial y especialmente a Sara Varela, Jorge Carmona y Eduardo Forero por su compromiso con el proceso. Igualmente, agradecemos el apoyo técnico y financiero de la Universidad Tecnológica de Pereira (UTP) y el Grupo de Investigación en Gestión Ambiental Territorial (GAT) con el proyecto de investigación "Modelado de la dinámica de oferta y demanda de recursos naturales bajo criterios de sostenibilidad".

REFERENCIAS

- Consejo Nacional de Política Económica y Social, República de Colombia, Departamento Nacional de Planeación. (2005). *Lineamientos para la formulación de la política de prevención y control de la contaminación del aire*. Documento Conpes 3344.
- Corporación Autónoma Regional de Risaralda –CARDER–.(2012a). *Calidad del Aire*. Recuperado el 3 de abril de 2013, de http://www.carder.gov.co/SIAE/indicadores/Tablero_de_Mando/ind_calidad_aire.html
- _____. (2012b). Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire. Recuperado el 23 de marzo de 2012, de <http://www.carder.gov.co/web/es/sistema-de-vigilancia-de-la-calidad-del-aire>
- Forrester, J. (1961). *Industrial Dynamics*. Waltham, MA: Pegasus Communications.
- González, J.; Machimbarrena, M. y Sánchez, J. (2003). *Estudio comparativo de modelos predictivos de ruido para tráfico rodado*. TecniAcústica, Bilbao, España. Recuperado el 10 de febrero de 2012, de <http://www10.ava.es/rccava/documentos/sec8document/aa m048.pdf>
- High Performance Systems. (2004). Stella software - An Introduction to Systems Thinking. (H. P. Systems, Productor). Recuperado el 5 de febrero de 2012, de <http://www.iseesystems.com/>
- Instituto Municipal de Tránsito de Pereira.(2012). *Informe de Gestión a septiembre de 2012*. Recuperado el 15 de marzo de 2013, de <http://www.transitopereira.gov.co/intradocuments/webExplorer/indicadores-de-gesti-n>
- Larsen, Bjorn. (2004). *Cost of Environmental Damage: A Socio-Economic and Environmental Health Risk Assessment*. Prepared for Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Colombia.
- Londoño, J; Correa, M.A. y Palacio, C.A. (2011). Estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, Colombia. *Revista EIA*, 16, 149-162.
- Manzi, V.; Belalcázar, L.C.; Giraldo, E.; Zárate, E. & Clappier, A. (2003). Estimación de los factores de emisión de las fuentes móviles de la ciudad de Bogotá. *Revista de Ingeniería*, 18, 18-25.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006a). *Decreto 979 del 3 de abril de 2006*. Modifica el decreto 948 de 1995.
- _____. (2006b). *Resolución número 627 del 07 de abril de 2006*. Norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental.
- _____. (2010). *Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire*.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial e Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –Ideam–.(2007). *Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los Recursos Naturales Renovables en Colombia: Calidad del Aire*.
- Morales, T.; Martínez, J.A. y Varela, S.M. (2012). Valoración económica del efecto sobre la salud de la contaminación atmosférica por fuentes móviles en Pereira. *Scientia Et Technica*, XVII(52), 225-234.

- Pope III, C.A. y Dockery, W.D. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *J Air Waste Manage Assoc*, 56(6), 709-42.
- Srimuruganandam, B. y Shiva, S.M. (2012). Source characterization of PM10 and PM2.5 mass using a chemical mass balance model at urban roadside. *The Science of the Total Environment*, 433, 8-19. doi:10.1016/j.scitotenv.2012.05.082
- The World Bank.(2007). *Environmental Priorities and Poverty Reduction A Country Environmental Analysis for Colombia*.
- U.S. EPA. (2004). *Air quality criteria for particulate matter* (Vol. 1, 2 and 3). Research Triangle Park, NC: National Center for Environmental Assessment-RTP Office.
- WHO. (2009.) *Global health risks: mortality and burden of disease attributable to selected major risks*. Geneva, Switzerland: Autor.

1. Ph.D. Ciencia y Tecnología **Ambientales.tito@utp.edu.co**

Grupo de Investigación Gestión Ambiental Territorial, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), Colombia. La Julita, Pereira, Risaralda, Colombia. AA: 097.

Grupo de Investigación Sostenipra (UAB-IRTA-Inèdit). Institute of Environmental Science and Technology (ICTA).Universitat Autònoma de Barcelona (UAB). School of Engineering (EE), Campus de la UAB, Bellaterra (Cerdanyola del Vallès) 08193 Barcelona, Catalonia, Spain.

2. M.Sc. Administración Económica y Financiera. **jhonja@utp.edu.co**

Grupo de Investigación Gestión Ambiental Territorial, Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad Tecnológica de Pereira (UTP), Colombia. La Julita, Pereira, Risaralda, Colombia. AA: 097.

3. El proyecto de presupuesto para el año 2013 fue presentado en noviembre de 2012, al Concejo Municipal, con un monto de \$525.904'304.456 (Fuente: Consejo Municipal de Pereira, disponible en <http://www.concejopereira.gov.co>).

4. Ídem.

Para citar este artículo: Morales-Pinzón, T. & Arias, J. J. (2013). Contaminación vehicular en la conurbación Pereira-Dosquebradas. *Revista Luna Azul*, 37, 101-129. Recuperado de <http://lunazul.ucaldas.edu.co/index.php?option=content&task=view&id=848>