

# Impacto del sistema de transporte en los niveles de contaminación percibidos por los usuarios del espacio público

Eduardo Behrentz, Ph.D.

Ingeniero civil de la Universidad de los Andes, con título de Maestría en Ingeniería Ambiental de la misma institución. Ph.D. de la Universidad de California (Ciencias e Ingeniería Ambiental), donde también adelantó una investigación de nivel post-doctoral. Es columnista ocasional del diario El Tiempo, ex-delegado del Alcalde Mayor de Bogotá ante el Consejo Ambiental Distrital y actual Director del Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional de la Universidad de los Andes.

## Resumen

El artículo muestra los resultados de una investigación que pretende documentar los niveles de contaminación por material particulado en las inmediaciones de una vía de alto flujo vehicular en Bogotá. El sistema de transporte público colectivo de Bogotá, conformado principalmente por vehículos que utilizan combustibles diésel, genera uno de los mayores aportes de material particulado respirable ( $PM_{10}$ ), el cual causa no sólo contaminación del aire sino graves enfermedades respiratorias y cardíacas.

La optimización del sistema de transporte de la ciudad (reducción de sobreoferta, modernización de la flota y ampliación de la cobertura del sistema de transporte masivo) debe contemplarse como una estrategia importante para hacerle frente al problema de contaminación del aire en Bogotá.

## Palabras clave

Contaminación del aire, material particulado respirable ( $PM_{10}$ ), sistema de transporte público colectivo (TPC), combustible diésel, congestión vehicular.

## Introducción

De acuerdo con la información recolectada por la red de monitoreo de la calidad del aire de Bogotá (RMCAB), operada por la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), el contaminante atmosférico más crítico en la ciudad es el material particulado respirable ( $PM_{10}$ ), el cual a su vez es reconocido como causante de enfermedades respiratorias y cardíacas. Diversos estudios desarrollados por la Universidad de los Andes, la Universidad Nacional de Colombia (sede Bogotá) y la Universidad de la Salle, demuestran que las fuentes móviles contribuyen de manera muy importante en las emisiones de este contaminante.

Al interior de las diferentes categorías vehiculares (e.d., buses, busetas, camiones, camionetas, taxis, vehículos de pasajeros, motos), aquellos automotores alimentados con combustibles diésel tienden a generar mayores emisiones de material particulado, especialmente si dichos vehículos no se encuentran provistos de tecnologías de control de emisiones, como los filtros de partículas.

El sistema de transporte público colectivo (TPC) de Bogotá, conformado principalmente por buses y busetas que utilizan combustibles diésel, generan uno de los

mayores aportes al inventario de emisiones de material particulado de la ciudad. Según resultados de estudios adelantados por el Centro de Investigaciones en Ingeniería Ambiental (CIIA) y el Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR) de la Universidad de los Andes, mientras esta categoría vehicular representa aproximadamente el 5% de la flota de la ciudad, su aporte al inventario total de emisiones de  $PM_{10}$  es superior al 50%. De esta manera, el TPC es un sector crítico y debe ser considerado como una de las principales prioridades al momento de diseñar e implementar las soluciones al problema de contaminación del aire.

Al interior de un ambiente urbano existen múltiples factores que determinan las concentraciones atmosféricas de  $PM_{10}$ . Para el caso de las inmediaciones de una vía de transporte, se sabe que estos factores incluyen, entre otros, el tamaño y la geometría de las calles, el nivel de flujo vehicular y el tipo de vehículos que transitan por la vía. Varios de estos factores son altamente variables en el tiempo, asunto que hace necesaria una caracterización cuidadosa si se desea estar en capacidad de entender y cuantificar la importancia de cada uno de ellos.

El objetivo principal del estudio descrito en este artículo fue el de documentar los niveles de contaminación por material particulado en las inmediaciones de una vía que presenta un alto flujo vehicular. Para alcanzar dicho objetivo se llevaron a cabo mediciones de calidad del aire y del nivel de congestión vehicular en la Avenida Carrera Séptima de la Ciudad de Bogotá.

## Selección de la Vía de Estudio

La selección de la vía en la que se llevaron a cabo las mediciones de calidad del aire y de nivel de congestión vehicular, se elaboró teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Alta afluencia de vehículos que hacen parte de la flota de servicio público colectivo.
- Presencia de sectores con diversidad de flujo de vehículos en diferentes sectores de la vía y a diferentes horas del día.
- Diversidad de secciones transversales con diferentes características geométricas a lo largo de la vía.



Figura 1. Mapa de Bogotá y sus principales vías.

Con base en estos y a partir de una serie de pruebas piloto, se seleccionó la Avenida Carrera Séptima (en Bogotá) en el tramo entre calles 19 (centro de la ciudad) y 85 (norte de la ciudad) como la vía a estudiar durante la fase de campo de este estudio (Ver recuadro en la Figura 1).

## Selección de los Puntos de Monitoreo

Dentro del tramo de estudio (e.d., la Carrera Séptima entre calles 19 y 85) se seleccionaron seis lugares de monitoreo en donde se instalaron equipos para la medición de concentraciones de  $PM_{10}$  en tiempo real, así como una cámara de video para realizar los aforos vehiculares (ver sección *Aforos Vehiculares*). Estos lugares corresponden a tres tipos de "secciones transversales" y a dos tipos de "geometrías de calle".

En este estudio las diferencias en las secciones transversales hacen referencia al número de carriles presentes en la vía. La geometría de la calle hace referencia a la configuración de las edificaciones presentes de forma



Figura 2. Imagen de una zona de la ciudad considerada como cañón urbano.



Figura 3. Imagen de una zona de la ciudad considerada como calle abierta.



Figura 4. Ubicación del equipo de monitoreo en la acera y cerca de la vía vehicular. Fotografías Eduardo Behrenz

contigua a las vías. Por ejemplo, en algunos puntos de medición se pueden observar gran cantidad de edificios ubicados en ambos lados de la vía. Estos puntos son considerados como “cañón urbano” en donde es posible que las emisiones de los vehículos que transitan por la vía, presenten una tendencia a quedarse atrapadas al interior de dicho cañón (Ver Figura 2). En contraste, algunos puntos de medición están sobre “calles abiertas” que muestran poca presencia de edificios alrededor de la vía lo que podría promover una mayor dispersión de los contaminantes emitidos por los vehículos (Ver Figura 3).

El diseño experimental de la fase de campo del proyecto consideró el efecto de la sección transversal de la vía y de la geometría de la calle al mismo tiempo que tuvo en cuenta el efecto del flujo vehicular sobre las concentraciones de  $PM_{10}$ . El efecto del tráfico fue estudiado a través de aforos vehiculares que fueron llevados a cabo de forma simultánea a las mediciones de las concentraciones atmosféricas de  $PM_{10}$ . Estas, así como los aforos vehiculares, se desarrollaron durante tres diferentes momentos del día, de tal manera que se capturó información en horas con alto (7:00 a 9:00 a.m.), medio (3:00 a 5:00 p.m.), y bajo (11:00 a.m. a 1:00 p.m.) tráfico vehicular en cada uno de los seis puntos de muestreo seleccionados.

#### Matriz Experimental

Todos los monitoreos fueron llevados a cabo durante días hábiles ya que uno de los propósitos del estudio era el de establecer los niveles de contaminación asociados con una alta actividad vehicular. El equipo utilizado en la determinación de las concentraciones de material particulado en tiempo real, se ubicó sobre la acera localizada de forma contigua a la vía vehicular, lo más cerca posible al lugar por donde transitan los vehículos (Ver Figura 4). De esta manera, se caracterizaron las condiciones de contaminación en los lugares donde se presenta la exposición a contaminantes atmosféricos (relacionados con la actividad vehicular) por parte de la población que transita por las aceras.

Adicionalmente a los puntos de monitoreo descritos en la sección anterior y con el fin de darle contexto y validez a los resultados obtenidos, se caracterizaron los niveles de contaminación en tres lugares considerados como “controles”, los cuales corresponden a las siguientes características:

- En una vía sin TPC por donde transitan buses articulados del sistema Transmilenio (TM) de forma exclusiva. Estas mediciones se llevaron a cabo en la Estación Los Héroes sobre la troncal de la Avenida Caracas de TM.
- En una vía en la que el vehículo de servicio privado sea la categoría vehicular dominante. Estas mediciones se llevaron a cabo en la Calle 151 con Carrera 33 (al norte de la ciudad).
- Un lugar de la ciudad con bajos niveles de contaminación asociada con material particulado. Estas mediciones fueron llevadas a cabo en el Centro Comercial Bima, localizado en la Autopista Norte de la ciudad a la altura de la Calle 233 (en las afueras del perímetro urbano).

#### Aforos Vehiculares

Los aforos vehiculares fueron llevados a cabo a partir de filmaciones de la vía en estudio, elaboradas de forma continua durante los días de monitoreo. Las filmaciones fueron digitalizadas para su posterior análisis, siguiendo un riguroso protocolo que permitió determinar no sólo el número total de vehículos que transitaban por la vía, sino también el número de vehículos pertenecientes al TPC (buses y busetas).

Por medio del protocolo de análisis de las filmaciones de la vía, se determinaron los “eventos” más relevantes que ocurrieron durante el período en el que se llevaron a cabo las mediciones. Estos eventos se refieren a condiciones específicas en las que se esperaba contar altos niveles de contaminación por material particulado, tales como la cercanía de un vehículo operado con combustible diésel y la detención y posterior puesta en marcha de un vehículo diésel cerca del equipo de medición.

## Resultados y discusión

La Figura 5 resume los resultados obtenidos para las concentraciones de  $PM_{10}$  en las inmediaciones de la Carrera Séptima durante el desarrollo de este estudio (valores medios para períodos de monitoreo de dos horas). En esta figura se observa la alta variabilidad de los resultados, en donde el punto de mayor contaminación estuvo asociado a una concentración media de más de  $200 \mu g/m^3$ , lo que a su vez corresponde a aproximada-

mente 10 veces la concentración media registrada en el punto de más baja contaminación (lugar de control en las afueras de la ciudad).

En la Figura 6 se puede observar el comportamiento altamente dinámico al que obedecen las concentraciones de  $PM_{10}$  (valores minuto a minuto). Esta figura incluye dos líneas horizontales que corresponden a las normas

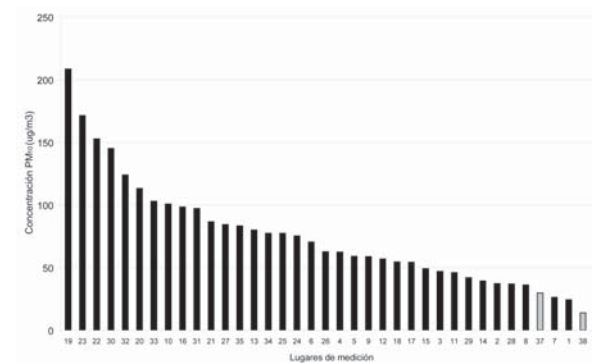


Figura 5. Concentraciones medias de  $PM_{10}$  documentadas en el estudio. (Las barras grises corresponden a lugares control!).

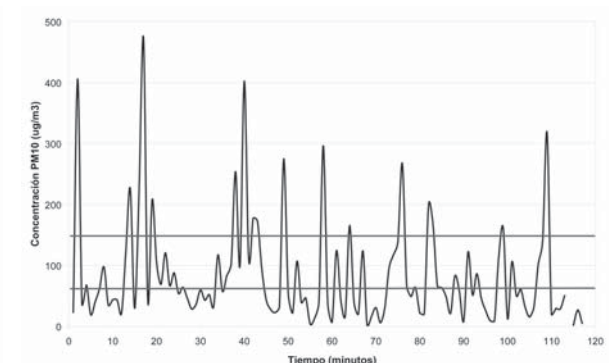


Figura 6. Concentraciones de  $PM_{10}$  en la acera de la Carrera Séptima con Calle 27. (Mediciones entre las 7:00 y 9:00 de la mañana).

1 Ver Matriz Experimental.

anual ( $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y diaria ( $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de calidad del aire, promulgadas por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

La comparación de los datos minuto-a-minuto con las normas anual y diaria indica que durante una fracción importante del período de monitoreo, las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  se encontraban en niveles que se consideran nocivos para poblaciones sensibles ( $70\text{-}150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Más importante aun, en los datos mostrados en la figura en referencia (los cuales son típicos y similares a los encontrados en otros puntos de medición y en otros momentos del día) fue común encontrar valores de concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  que se consideran nocivos para toda la población (valores superiores a  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

### Efecto del Tráfico de Buses y Busetas

Gracias a que la información fue recolectada utilizando equipos que funcionan en tiempo real, fue posible estudiar relaciones causa-efecto entre un “episodio” de alta contaminación y el “evento” externo al que puede estar asociado dicho episodio. Para propósitos de nuestros análisis, un episodio de alta contaminación fue definido como un instante en el tiempo en el que se presenta una concentración supremamente elevada de material particulado (pico de concentración). Un evento fue definido como la ocurrencia de un hecho que pudiese afectar de forma significativa los niveles de contaminación por  $\text{PM}_{10}$  (e.d., un vehículo diésel

pasando por el carril contiguo a la acera en donde se encuentra ubicado el equipo de medición de material particulado; un vehículo diésel que se detiene y reinicia su marcha en cercanías al lugar en donde se encuentra ubicado el equipo de medición; un vehículo diésel que transita cerca del equipo de medición mientras emite gases de escape visibles).

La Figura 7 muestra las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  en tiempo real obtenidas en la Carrera Séptima con Calle 31 entre 7:00 y 9:00 de la mañana. En esta figura se observa claramente cómo la gran mayoría de los episodios de alta contaminación se encuentran asociados con eventos que involucran vehículos que operan con combustibles diésel, especialmente aquellos que hacen parte de la flota de TPC (Por razones de forma no todas estas relaciones fueron ilustradas en la Figura 7).

Estos resultados demuestran que el tráfico vehicular, especialmente el que tiene que ver con motores diésel, influye de forma directa en los niveles de exposición a la contaminación por material particulado en las inmediaciones de una vía de transporte.

En la Figura 8 se muestra una comparación entre los niveles de contaminación por material particulado observados en los distintos tipos de vías que fueron objeto de este estudio. En esta figura se puede observar que, salvo un par de excepciones, durante el experimento control (Ver sección *Matriz Experimental*) llevado a cabo en la

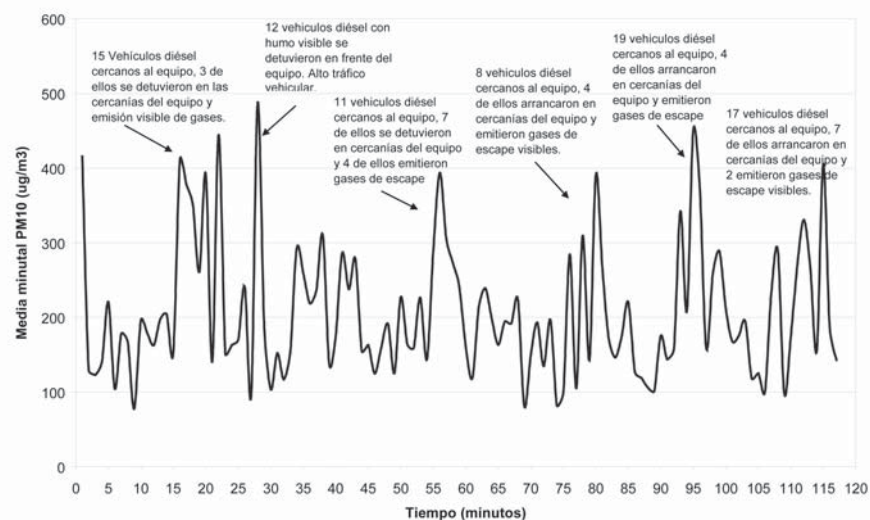


Figura 7. Relación entre las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  (media minatural –  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y eventos asociados con vehículos diésel.

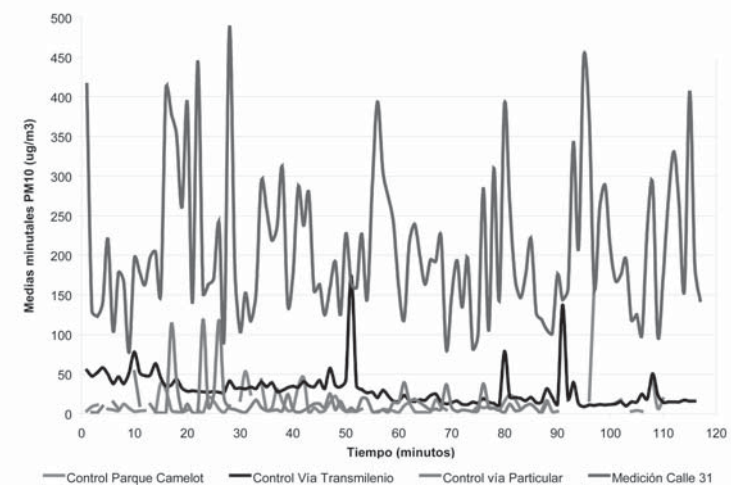


Figura 8. Comparación de las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  en diferentes lugares de medición.

vía dominada por la actividad de vehículos particulares (línea azul) no se sobrepasaron los niveles de la norma anual de calidad del aire ( $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Lo mismo es cierto para la totalidad del experimento control llevado a cabo en las afueras de la ciudad, en un lugar apartado de toda fuente de emisión (línea verde).

En el caso de las mediciones llevadas a cabo sobre la troncal del sistema Transmilenio (línea negra) se observa que los niveles de contaminación por material particulado son superiores a los encontrados en los otros dos experimentos de control. Este resultado es el esperado pues la flota de TM y la flota de TPC funcionan con el mismo tipo de combustible. Sin embargo, es claro que las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  en la troncal de TM son significativamente inferiores a las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  encontradas en la Carrera Séptima a la altura de la Calle 31.

Según lo documentado en este estudio, estas diferencias se encuentran relacionadas con la naturaleza de

la operación de la troncal de TM, la cual es bastante más ordenada y logra mover una mayor cantidad de pasajeros (cerca del triple de los pasajeros movilizadas por la Carrera Séptima) haciendo uso de un menor número de buses. Adicionalmente, los buses que operan por las troncales se detienen (y reinician su marcha) un menor número de veces por unidad de distancia recorrida. Esto último es de particular importancia pues los motores diésel tienden a producir grandes emisiones de material particulado cuando son sometidos a cargas importantes, como en el caso de su puesta en marcha.

Es importante resaltar que el análisis de los resultados presentados en la Figura 8 tienen que ver con la peor condición encontrada durante este proyecto en la Carrera Séptima. De esta forma, esta discusión no necesariamente aplica para todas las vías de TPC sino para aquellas en donde se presenten las condiciones más críticas: alto flujo vehicular (especialmente de TPC) y condiciones desfavorables para la dispersión de los contaminantes (calles tipo cañón urbano).

### Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos, es claro que los niveles de contaminación por material particulado registrados en cercanías a la Carrera Séptima, tienden a ser mayores que en otras zonas de la ciudad. Esto es en gran

parte debido al nivel de congestión vehicular asociado al transporte público colectivo que se presenta en diferentes sectores de esta avenida.

Durante los cerca de 40 experimentos realizados, correspondientes a más de 75 horas de medición en los diferentes sitios de muestreo, el porcentaje de excedencia de la norma anual para material particulado ( $70 \text{ ug/m}^3$ ) fue de más del 35% mientras que el porcentaje de excedencia de la norma diaria ( $150 \text{ ug/m}^3$ ) fue de más del 12%. Esto significa que durante una fracción importante del tiempo, las concentraciones observadas correspondieron a niveles nocivos no sólo para poblaciones sensibles sino para todos los sectores de la población expuesta.

Dentro del conjunto de datos recopilados en tiempo real fue común encontrar valores instantáneos de concentración de más de  $500 \text{ ug/m}^3$  de  $\text{PM}_{10}$ , alcanzando incluso valores de  $2,700 \text{ ug/m}^3$ . La exposición asociada con estos niveles de contaminación por material particulado, si bien tiene que ver con momentos específicos y períodos de tiempo cortos, es de gran preocupación dado que corresponde a niveles que superan de manera dramática cualquier norma de calidad del aire o de salud ocupacional.

Las más altas concentraciones medias de material particulado ( $210 \text{ ug/m}^3$ ) fueron registradas en el experimento llevado a cabo en la Carrera Séptima con Calle 31, lugar que corresponde a una sección transversal de ocho carriles y a una geometría de cañón urbano. Estos valores fueron cerca de nueve veces mayores a los registrados en el punto sobre esta misma avenida que presentó las más bajas concentraciones medias de  $\text{PM}_{10}$  ( $25 \text{ ug/m}^3$ ), el cual corresponde a la Carrera Séptima con Calle 19 (en donde la sección transversal es de tres carriles).

En términos generales, todas las variables consideradas demostraron tener un impacto estadísticamente significativo en las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  registradas en las inmediaciones de la vía estudiada: a) Las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  en los cañones urbanos fue-

ron significativamente superiores que aquellas encontradas en calles abiertas; b) Las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  fueron más altas en los sectores de la vía con un mayor número de carriles y en los momentos del día en los que se presentaron mayores niveles de congestión vehicular.

Los resultados aquí presentados demuestran de forma contundente el impacto que los vehículos que operan con combustibles diésel tienen sobre los niveles de calidad del aire al interior de su zona de influencia (e.d., la vía sobre la cual circulan).

Los niveles de contaminación sobre una troncal del sistema Transmilenio fueron significativamente superiores a los encontrados en la vía dominada por la actividad del transporte particular así como a los encontrados en el sitio ubicado en las afueras de la ciudad. Sin embargo, las concentraciones de  $\text{PM}_{10}$  en la troncal de TM fueron significativamente inferiores a las concentraciones encontradas en varios sectores sobre la Carrera Séptima. Estas diferencias se encuentran relacionadas con la más ordenada operación de la troncal de TM por donde circula un número inferior de buses que se detienen solamente en las estaciones destinadas para tal fin.

Esto significa que la optimización del sistema de transporte de la ciudad (reducción de sobreoferta, modernización de la flota y ampliación de la cobertura del sistema de transporte masivo) corresponde a una de las más efectivas estrategias para hacerle frente al problema de contaminación del aire.

#### Agradecimientos

Se agradece a la Corporación Ambiental Empresarial de la Cámara de Comercio de Bogotá por la financiación proveída para este estudio a través de su programa Acercar-Transporte (en convenio con la Secretaría Distrital de Ambiente). Se agradece también a Diana Osorio y Natalia Uscátegui por sus invaluable contribuciones.

## Proyectos de espacio público: Reciclaje de espacio público mediante la optimización de la sección vial en las calles de Bogotá

### Álvaro Rodríguez-Valencia

Ingeniero Civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería y Máster en Planeación de Infraestructura (MSc.) de la Universidad de Stuttgart. Coautor del libro "El transporte como soporte al desarrollo de Colombia. Una Visión al 2040". Es profesor en el área de transporte del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad del los Andes.

### Pablo Posada

Arquitecto de la Universidad de Los Andes (2009), estudiante de ingeniería civil de la Universidad de Los Andes. Tesis en curso.

### Resumen

Debido a las dinámicas dispersas de crecimiento urbano y a la forma seccionada en la que se desarrollaron las calles en Bogotá, muchas zonas de la ciudad presentan actualmente sobre oferta de la red vial de acceso y colectoras, donde grandes superficies pavimentadas sirven a unos pocos usuarios. Estas extensas superficies que son utilizadas exclusivamente por los usuarios de unas pocas construcciones, representan grandes sobrecostos para la ciudad en términos de mantenimiento vial. En contraposición, muchas de estas, así como la zona en la que se ubican, presentan deficiencias en materia de otras formas de espacio público, tales como andenes o zonas verdes. Para evitar esta situación se hace necesario un tratamiento más dinámico e integral de la red vial, basado en una relación directa entre volumen de tráfico y la sección vial, resultante de modelaciones zonales de tráfico.

### Palabras claves

Vía, sección transversal, capacidad de la vía, espacio público, simulación de tráfico, reciclaje, funcionalidad, eficiencia urbana, calidad de vida.

## Introducción

La forma desordenada en el crecimiento de Bogotá ha resultado, en muchos casos, en una incoherencia en la red vial existente. Diferencias temporales en los marcos regulatorios del desarrollo urbano, cambios no previstos en la división y usos del suelo y definición de nuevos corredores viales, han reconfigurado la morfología de la ciudad sin una visión integral de su malla vial, ni de su espacio público. Como resultado, es posible encontrar zonas urbanas consolidadas con secciones viales que no corresponden a las características de las construcciones a las que sirven, ni a los volúmenes de tráfico que por ellas transitan.

Lo anterior plantea inquietudes relacionadas con la dimensión, distribución y funciones del espacio público de Bogotá que deben ser analizadas en el contexto de los estándares internacionales.

Se considera que en una ciudad densa ( $200 \text{ hab/ha}$ ), a cada persona le corresponderán  $50\text{m}^2$  de suelo urbano; mientras que en una ciudad poco densa,  $10 \text{ hab/ha}$  por ejemplo, a cada persona le corresponderán  $1000 \text{ m}^2$ . Si de esta área total, solo un 20% en promedio pertenece a espacio público, (del cual la mayor parte corresponde a espacio vial), el área restante que puede destinarse a