



Análisis de la relación velocidad-densidad vehicular de la avenida calle 26 en Bogotá

Vehicular speed-density relationship analysis for the 26th avenue in Bogotá-Colombia

Para citar este artículo / To reference this article

/ Para citar este artículo: Naranjo Torres, D. (2015).

Análisis de la relación velocidad-densidad vehicular
de la avenida calle 26 en Bogotá. *Ingenio Magno*,
6, pp. 76-88.

Darío Naranjo-Torres

Universidad la Gran Colombia,
Facultad de Ingeniería Civil, Grupo de
Investigación Desarrollo de la Ingeniería
Civil en y para Ámbitos Urbanos
dario.naranjo@ugc.edu.co

Recepción: 13 de Abril de 2015

Aceptación: 23 Septiembre de 2015

Resumen

Cuando estamos transitando dentro de una corriente vehicular, hemos sentido que conforme varía el número de vehículos, también lo hace nuestra velocidad de circulación, tal vez por la “fricción” que se genera cuando intentamos interactuar con los demás vehículos. En este orden de ideas, a partir de una investigación de tipo correlacional se desarrolló un proceso para tratar de predecir en qué proporción se disminuye o aumenta la velocidad media espacial de los conductores conforme varía el número de vehículos. Este estudio se realizó para dos puntos ubicados sobre una de las principales vías de Bogotá: la avenida calle 26. El presente artículo resume cómo se desarrolló secuencialmente la investigación a partir de: a) mediciones en sitio para establecer las zonas que permiten que el flujo vehicular se desarrolle libremente; b) análisis de la demanda aforada para establecer los periodos en los que la corriente vehicular es más densa; y c) ajuste correlacional de las variables densidad vs. velocidad media espacial, a través de diferentes análisis estadísticos para inferir la mejor tendencia de ajuste.

Palabras clave: Bogotá, densidad, flujo vehicular, velocidad, volumen.

Abstract

When travelling in a vehicular current, we perceived that there is a numeric variation in vehicles as well as circulation velocity. This is perhaps a response to “friction” generated when interacting with other vehicles. Given the previous ideas, a correlative investigation was developed to try to predict at what rate the average spatial velocity of the drivers decreases or increases in relation to the variation of the number of vehicles. This case study was conducted for two sites located on one of the main roads of the city of Bogota, Colombia, known as the 26th Avenue. This article summarizes how the investigation was sequentially developed with (i) in situ measurements to establish the areas that allow free traffic flow; (ii) analysis of metered demand to establish the traffic periods in which the vehicular flow is more dense; (iii) correlational adjustment of the density vs. average spatial velocity variables to obtain different analytical statistics to obtain the best adjustment tendency.

Understanding the way in which a vehicular current occurs, implies also understanding the way inhabitants drive under operational rules previously established by physical infrastructure of the road and its geometry. In this way, the analysis of the elements of vehicular flow is a basic requirement for planning and management of the roadway infrastructure with the purpose of creating better traffic policies.

Keywords: Bogotá, density, vehicular flow, velocity, volume.

1. Introducción

La premisa fundamental sobre la que trabajan los ingenieros de tránsito y transporte es la de mantener en niveles de servicio adecuados de operación las corrientes vehiculares. Tal objetivo tiene en cuenta

dos elementos: la oferta y la demanda. En este caso, la oferta de transporte permanece fija, mientras que la demanda tiene un componente dinámico, ya que varía en función de la hora, la oferta de transporte disponible en el momento y su interrelación con otros usuarios.

A un nivel más detallado, los vehículos se movilizan en corrientes vehiculares. Cada corriente posee elementos que la caracterizan. En el caso de las corrientes de tránsito o corrientes de flujos vehiculares, estas están constituidas por vehículos de cualquier tipo, entre los cuales podemos citar automóviles, motos, buses, camiones, articulados, etc.

Cada corriente vehicular es diferente y única a la vez, conforme varían los factores que la componen; sin embargo, existen ciertos parámetros que reflejan las propiedades intrínsecas de una corriente vehicular y que de alguna manera permiten inferir el comportamiento del tránsito, para pronosticar con cierta certidumbre la forma en la que se desarrollará.

Los parámetros que resumen las características de las corrientes vehiculares en conjunto son conocidos como *parámetros macroscópicos del tránsito*, a saber:

- La velocidad media, medida en kilómetros/hora (km/h).
- El volumen o flujo vehicular, medido en vehículos/hora (veh/h).
- La densidad vehicular, medida en vehículos/kilometro (veh/km).

La investigación desarrollada se concentró en el análisis de dos parámetros macroscópicos: la densidad vehicular y la velocidad media. A partir de estos se infirió la relación con la que los conductores de Bogotá modifican su percepción de la corriente vehicular en la que transitan, disminuyendo o aumentando su velocidad de circulación.

En octubre del 2005, la entonces Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá (hoy Secretaría Distrital de Movilidad) desarrolló un contrato de consultoría con la empresa mexicana Cal y Mayor Asociados, cuyo producto final fue la elaboración del *Manual de*

planeación y diseño para la administración del tránsito y el transporte.

Dicho documento se concibió como soporte técnico para mejorar la normalización y estandarización de procesos de contratación, supervisión y ejecución de estudios y monitoreos al tránsito, en relación con la planeación, el diseño, la operación y el mantenimiento de proyectos y elementos del tránsito y transporte de la capital del país.

Dentro del documento mencionado se desarrolló un capítulo que correspondió a la calibración de los parámetros macroscópicos del tránsito en un flujo continuo; por ello, para esa época, en algunos tramos de la ciudad, se calibraron algunas curvas de velocidad/volumen y densidad/volumen, con lo cual se determinaron las fronteras de nivel de servicio para estos segmentos viales.

A la fecha, este ha sido el único esfuerzo técnico debidamente reglamentado que se ha realizado para obtener medidas correlacionales a partir de los parámetros macroscópicos del tránsito, como un esfuerzo para validar el comportamiento de los conductores de vehículos en un tránsito tan característico como el de Bogotá.

2. Marco conceptual

Llamamos *corriente vehicular* al conjunto de vehículos que circulan a lo largo de una calzada y en el mismo sentido. Las corrientes suelen estar constituidas por filas de vehículos en movimiento que se acomodan en los distintos carriles de la calzada, estén demarcados o no.

Las corrientes de varias filas en movimiento tienen características algo distintas a las de una sola. En calzadas de dos carriles con circulación en ambos sentidos existen dos corrientes vehiculares opuestas de una fila, y para que los vehículos más rápidos puedan adelantar los más lentos, deben invadir el carril del

sentido opuesto. Pero esto solo puede hacerse en determinadas oportunidades, pues se necesita que ocurra un vacío relativamente grande en la corriente opuesta, además de disponer de una distancia de visibilidad prudente.

En cambio, cuando hay más de un carril destinado a una corriente vehicular, los adelantamientos son muchos más fáciles, pues se hacen simplemente cambiando de un carril a otro adyacente, para lo que se requieren vacíos en la fila adyacente comparativamente pequeños y requisitos de visibilidad menos estrictos. De este modo, la eficiencia de las vías que permiten circulación en más de un carril representa casi el doble de las de un solo carril por sentido.

De acuerdo con la forma en que circulan las corrientes vehiculares, las vías se pueden clasificar en *vías de flujo continuo* o *vías de flujo discontinuo*. En las primeras, el tránsito circula normalmente sin interrupciones, pues no hay elementos de control, y los vehículos solo se detienen por interacción vehicular y por motivos ajenos al tránsito, tales como cobro de peaje. Entre estas vías se encuentran las autopistas y las carreteras de dos carriles. En las vías de circulación discontinua, por el contrario, la forma normal de transitar requiere detenciones más o menos frecuentes, impuestas por la regulación del tránsito, tal como sucede en las arterias y otras vías urbanas.

A diferencia de las corrientes continuas de agua y de otros fluidos, las corrientes vehiculares están constituidas por elementos bien discretos: los vehículos, cuyos movimientos dependen de sus características funcionales, de la interacción entre ellos, de las restricciones que impone la vía, de la regulación del tránsito y el medioambiente, y también de las decisiones individuales de sus conductores. Sin embargo, existen ciertos parámetros que reflejan esas propiedades y cuya observación y medida sirven para establecer

límites a esa variabilidad y predecir hasta cierto punto el funcionamiento de esas corrientes.

Los parámetros pueden clasificarse en dos categorías: a) *parámetros microscópicos*, que caracterizan la interacción de los vehículos individuales dentro de la corriente; y b) *parámetros macroscópicos*, que expresan las características de las corrientes vehiculares en conjunto.

Los parámetros macroscópicos fundamentales de las corrientes vehiculares son el volumen (veh/h), la velocidad media (km/h) y la densidad (veh/km), y estas son las variables que caracterizan el tránsito (Roess y Prassas, 2004, p. 106).

2.1. Velocidad

La velocidad en particular, como parámetro macroscópico de una corriente vehicular que interesa, es la media colectiva de los vehículos de la corriente. Sin embargo, hay más de una media. Cuando se calcula la velocidad media de los vehículos que recorren un trecho de vía, existe la disyuntiva de promediar los valores de las velocidades medias individuales a lo largo del trecho, o bien, dividir la longitud del trecho entre el promedio de los tiempos de recorrido de los vehículos. Uno y otro procedimiento producen valores distintos de la media, si los vehículos no van a la misma velocidad, como sucede siempre en la realidad (Gal y Mayor y Cárdenas, 2000, p. 209).

La velocidad de un vehículo está definida como la distancia de viaje por unidad de tiempo. La mayor parte de las veces cada vehículo en la vía tendrá una velocidad que es un tanto distinta del resto trayecto. En la cuantificación del flujo de tráfico, el promedio de velocidad del tráfico es una variable significativa.

Desde el punto de vista del tránsito, la velocidad de un vehículo en particular y en un momento dado no

cuenta tanto como su velocidad media cuando hace un recorrido, o como también sucedería con la media de todos los vehículos de una corriente de tránsito. Si bien el volumen es una medida de la cantidad de tránsito que pasa por cierto lugar, la velocidad media mide, hasta cierto punto, la calidad del servicio que ofrece la vía en ese lugar, y eso es algo que pueden percibir directamente los usuarios de una vía. En cambio, el volumen es una variable básica del tránsito difícil de percibir por los que no son ingenieros de tránsito y aun por los que lo son.

La velocidad media temporal se ha definido como la media de las velocidades de los vehículos que pasan por un punto de una vía (velocidades puntuales) durante cierto periodo (distribución temporal). La velocidad media espacial es la que resulta de promediar las velocidades de los vehículos que se encuentran en un tramo de vía (distribución espacial) en un instante dado (velocidades instantáneas).

Como puede colegirse de todo esto, los conceptos de velocidades medias temporales y espaciales son incompatibles teóricamente, tal como sucede con los conceptos de volumen y densidad; no obstante, es posible establecer relaciones aproximadas entre ellos.

La velocidad media temporal u_t es la media aritmética de las velocidades de los vehículos que transitan por un punto de vía durante un intervalo de tiempo. La velocidad media temporal se calcula así:

$$u_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i \quad (1)$$

Donde n es el número de vehículos que transitan por un punto de la vía y u_i es la velocidad del vehículo i -ésimo. La velocidad media espacial es la media armónica de las velocidades de los vehículos que transitan por un punto

de una vía durante un intervalo de tiempo (Secretaría de Tránsito y Transporte, 2004). Se obtienen al dividir la distancia total recorrida por dos o más vehículos en un tramo de vía, entre el tiempo total requerido por esos vehículos para que recorran esa distancia. Esta es la velocidad que interviene en las relaciones flujo-densidad. La velocidad media espacial se calcula mediante esta ecuación:

$$u_s = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{u_i}\right)} = \frac{nL}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (2)$$

Donde n es el número de vehículos; t_i es el tiempo que le toma al vehículo i -ésimo recorrer el tramo de vía; u_i es la velocidad del vehículo i -ésimo, y L es la longitud del tramo de vía.

2.2. Densidad

La densidad es el número de vehículos que se encuentran en cierto momento, parados o andando, en un tramo de una vía, una calzada o un carril. Se expresa en vehículos por kilómetro, ya que en un metro no suele haber un vehículo real y mucho menos en un punto, que es donde se mide el volumen. Conviene destacar que si bien la densidad se mide en un punto temporal y en una unidad espacial suficientemente grande para que quepa al menos un vehículo, el volumen se mide en un punto espacial y en una unidad temporal suficientemente grande para que pase al menos un vehículo.

Son conceptos teóricamente incompatibles y solo se pueden relacionar aproximadamente utilizando valores medios. Por el contrario, la velocidad se puede medir tanto en un punto como en un tramo y en cualquier unidad de tiempo, mientras se trate de un tiempo finito (Roess y Prassas, 2004, p. 112).

Los usuarios de la vía no pueden percibir directamente la densidad en sí, pero pueden apreciar la separación

longitudinal y lateral entre vehículos, lo que da la idea de la densidad, al menos en lo que ven de la vía. La densidad restringe principalmente la libertad de movimiento de los vehículos; por eso se ha usado como indicador de la calidad del servicio que proporciona una vía.

Medida indirectamente, la densidad se ha usado mucho para detectar cuando una autopista está próxima a saturarse e impedir la entrada de un exceso de vehículos que puedan desencadenar una temida congestión de tránsito.

Si en un kilómetro de vía, calzada o carril hay n vehículos en un momento dado, la densidad será d veh/km. Pero también se puede considerar que la suma de los espaciamientos de estos n vehículos en ese momento será de 1 km, o sea, 1000 m, y su espaciamiento medio será de $1000/n$. Ya que n es también la densidad, se pueden expresar las siguientes relaciones:

$$\text{espaciamiento medio (m)} = \frac{1000}{\text{densidad (veh/km)}}$$

$$\text{densidad (veh/km)} = \frac{1000}{\text{espaciamiento medio}}$$

2.3.El modelo de Greenshields

A fin de cuantificar los parámetros de las corrientes vehiculares durante las situaciones descritas, se han elaborado numerosos modelos analíticos y de simulación. Uno de los primeros modelos analíticos macroscópicos que se han creado para ello es el de Greenshields (Secretaría de Tránsito y Transporte, 2004).

El modelo nació de los análisis que realizó Greenshields a medidas de volúmenes y velocidades medias que hizo en carreteras de dos carriles (Greenshields, 1934). Las densidades correspondientes las estimó usando la ecuación fundamental del tránsito, y llegó a la conclusión de que la relación entre la densidad y la velocidad media

era prácticamente lineal. Definió esa relación por la siguiente ecuación lineal:

$$v = \left(1 - \frac{k}{k_e}\right) v_f$$

Donde v es la velocidad media espacial; v_f es la velocidad a flujo libre; k es la densidad, y k_e es la densidad estática (cuando la velocidad es cero)

3. Toma de información sobre la corriente vehicular

3.1. Metodología de toma de información

Para determinar la variación de la demanda del tráfico vehicular, se hizo una evaluación sobre el corredor de la avenida calle 26, con el fin de identificar las zonas que más asemejan su comportamiento a un flujo no interrumpido o un segmento multicarril. Esta actividad derivó en la selección de dos puntos: calle 26 con carrera 45, y calle 26 con avenida Ciudad de Cali (los sitios de aforo corresponden a los presentados en las figuras 1 y 2).



Figura 1. Sitios de aforo para el tramo de la avenida calle 26 con avenida Ciudad de Cali (punto de aforo 1 y 2)

Fuente: autor.



Figura 2. Sitios de aforo para el tramo de la avenida calle 26 con carrera 45 (punto de aforo 3 y 4)

Fuente: autor.

- Punto de aforo 1: calle 26 con carrera 45, sentido este-oeste
- Punto de aforo 2: calle 26 con carrera 45, sentido oeste-este
- Punto de aforo 3: calle 26 con avenida Ciudad de Cali, sentido este-oeste
- Punto de aforo 4: calle 26 con avenida Ciudad de Cali, sentido oeste-este

Para los cuatro puntos de toma de información se realizaron aforos a tres tipos de vehículos: livianos, buses y camiones, en un periodo comprendido entre las 5:00 y las 21:00 horas del día. Los aforos vehiculares se realizaron en estos días:

- Martes 10 de septiembre de 2013
- Miércoles 11 de septiembre de 2013
- Martes 17 de septiembre de 2013
- Miércoles 18 de septiembre de 2013
- Jueves 19 de septiembre de 2013

Para cada punto de aforo se determinó el periodo de máxima demanda vehicular, el cual puede llegar a ser el periodo en el que mayor cantidad de usuarios hacen uso de la vía.

Una vez determinados los periodos de máxima demanda, se lograron establecer cuáles eran las franjas de tiempo previas y posteriores a esta hora del día en las que se pueda esperar que el segmento de vía pase de un estado de operación normal a un estado de saturación por la alta demanda presentada.

La importancia de determinar estas horas de máxima demanda radicó en que sobre ellas se realizaron las mediciones para determinar el comportamiento de las variables macroscópicas evaluadas en esta investigación, es decir, la velocidad y densidad.

A partir de tomas de video para los diferentes puntos de aforo, se capturó la velocidad media espacial respecto a la densidad vehicular, para lo cual, a partir de los videos realizados, se tomó una base de 200 metros cada segmento. Sobre esta base se iba contando sucesivamente la densidad en ese tramo y, a su vez, los tiempos de paso, para estimar la velocidad media espacial conforme a las definiciones contenidas en los apartados 2.1 y 2.2.

4. Resultados y discusión

Conforme al procedimiento citado en el apartado 3.1. se procedió con la digitalización y el análisis de los volúmenes vehiculares recolectados, lo cual permitió identificar los siguientes periodos de máxima demanda.

Posteriormente, una vez se determinaron los periodos transicionales en los que las corrientes vehiculares de los diferentes puntos de estudio cambian de un estado de libre circulación a un estado de circulación en congestión (periodos pico o de máxima demanda), se procedió con el emparejamiento de la densidad vehicular y la velocidad media espacial. Esto permitió hacer su análisis estadístico, con el fin de establecer una posible tendencia desde el punto de vista lineal y exponencial (Ellis, 1964).

4.1. Punto de aforo 1

En este punto de aforo se presentaron dos periodos pico representativos en el día, conforme se muestra en la figura 3; sin embargo, es el periodo de la mañana el más marcado, destacándose la franja del día que van desde las 6:00 a 7:30 horas.

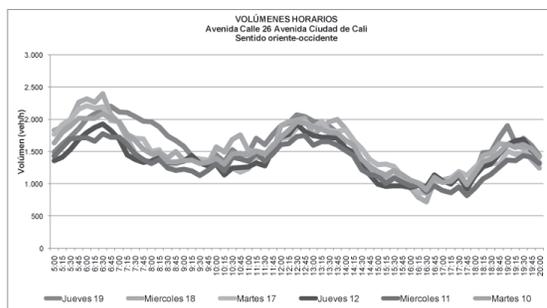


Figura 3. Variación horaria del volumen vehicular sobre la avenida calle 26 con avenida Ciudad de Cali, sentido este-oeste

Fuente: autor.

Así se calcularon los parámetros o las estadísticas contenidas en la tabla 1, que muestra que el coeficiente de correlación es mayor en un ajuste del tipo lineal que en una ajuste del tipo logarítmico.

Tabla 1. Estadísticas de regresión para el punto de aforo 1 en un ajuste de tipo lineal y logarítmico

Parámetro	Ajuste lineal	Ajuste logarítmico
Intercepto	106,289	111,742
Coefficiente	-1,687	0,976
Coefficiente de determinación	0,757	0,687
Error estándar	10,092	0,170
Numero de observaciones	364	364

Fuente: autor.

No obstante, las líneas de tendencia mostradas en las figuras 4 y 5 muestran que se mantiene un ajuste bueno y similar frente a la dispersión de las observaciones.

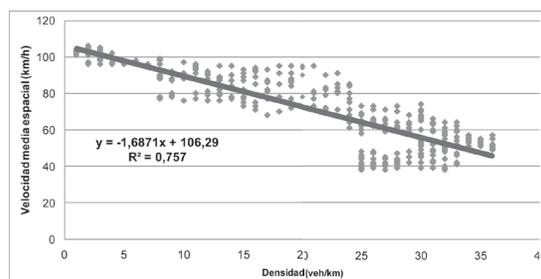


Figura 4. Dispersión de la velocidad vs. densidad en el punto 1, con una tendencia de ajuste lineal

Fuente: autor.

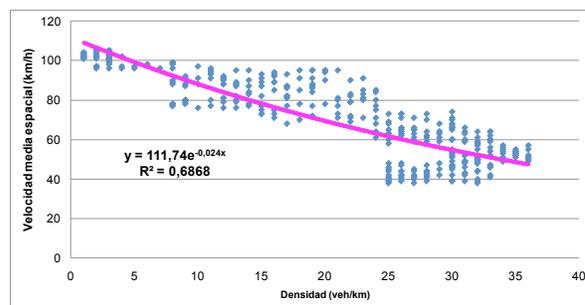


Figura 5. Dispersión de la velocidad vs. densidad en el punto 1, con una tendencia de ajuste logarítmica

Fuente: autor.

4.2. Punto de aforo 2

En este caso se siguió el mismo procedimiento del apartado 4.1.: se estableció en primer lugar el periodo de máxima demanda, franja horaria en la cual también se midió la velocidad media espacial y la densidad vehicular para determinar una posible relación de ajuste. Así, el periodo de máxima demanda se encontró al finalizar el día, el cual se originó entre las 19:00 y 20:00 horas, conforme se aprecia en la figura 6.

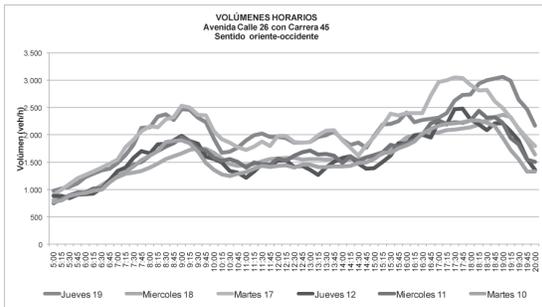


Figura 6. Variación horaria del volumen vehicular sobre la avenida calle 26 con avenida Ciudad de Cali, sentido oeste-este

Fuente: autor.

De manera muy similar a lo encontrado para el punto de aforo 1, el mejor ajuste está siendo generado por una relación de tipo lineal (tabla 2).

Tabla 2. Estadísticas de regresión para el punto de aforo 2 en un ajuste de tipo lineal y logarítmico

Parámetro	Ajuste lineal	Ajuste logarítmico
Intercepto	106,591	116,022
Coefficiente	-1,680	0,976
Coefficiente de determinación	0,832	0,806
Error estándar	8,202	0,131
Numero de observaciones	364	364

Fuente: autor.

Tal y como se aprecia en las figuras 7 y 8, la diferencia de ajuste no es demasiado significativa.

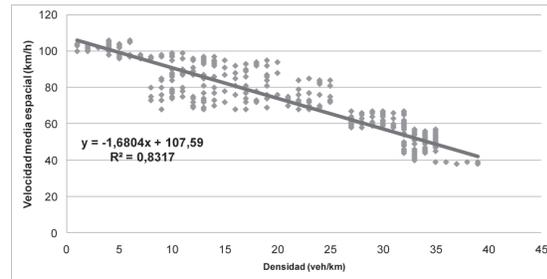


Figura 7. Variación horaria del volumen vehicular sobre la avenida calle 26 con avenida Ciudad de Cali, sentido oeste-este

Fuente: autor.

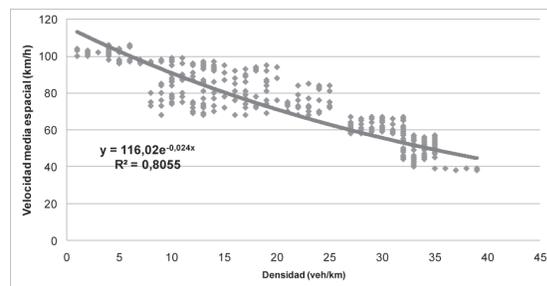


Figura 8. Variación horaria del volumen vehicular sobre la avenida calle 26 con avenida Ciudad de Cali, sentido oeste-este

Fuente: autor.

Si se realiza una comparación entre los parámetros macroscópicos calculados para el punto de aforo 1 y el punto de aforo 2, que por su ubicación geográfica corresponden al mismo sector de la avenida calle 26 pero para sentidos de circulación opuestos, se encuentra una similitud en cuanto a sus valores, lo cual también se justifica por la similitud de condiciones geométricas y operativas.

Teniendo presente que la mejor línea de ajuste es dada por una tendencia lineal, se puede prever que el crecimiento o la disminución en la velocidad media espacial por parte de un usuario serán proporcionales al número de vehículos que circulan en ese momento. Así, verificando los coeficientes de la variable densidad

vehicular (que es la variable independiente para el ajuste de regresión) de las tablas 1 y 2, el promedio es equivalente a un valor absoluto de 1,68 km/h; es decir, un usuario de vehículo que circula por una corriente vehicular en Bogotá disminuirá su velocidad en 1,68 km/h por cada vehículo adicional que se haga presente dentro de la corriente vehicular.

Por otra parte, teóricamente la velocidad a flujo libre se presenta cuando la densidad vehicular tiende a cero, lo cual corresponde al intercepto de la línea de ajuste con el eje de las ordenadas. Se puede notar así que no existe una mayor variación en los valores presentados en las tablas 1 y 2, por lo cual se puede dar por sentado que un límite operacional de 107 km/h es propio de una operación a flujo libre o no restringido.

Finalmente, los valores de densidad vehicular máxima esperada también guardan muy poca diferencia y se establecen un máximo de 64 veh/km-carril (intercepto con las abscisas cuando la velocidad es igual a cero).

4.3. Punto de aforo 3

Para el punto de aforo 3 se evidenció un comportamiento más uniforme a lo largo del día en cuanto a distribución del flujo vehicular o demanda se refiere. Justamente al final del día y a partir de las 18:00 horas se encuentra el periodo pico de demanda, con un flujo vehicular que oscila entre los 2500 y 3000 veh/h (figura 9).

Conforme se evidencia en la Tabla 3 la mejor tendencia de ajuste también fue dada por una regresión de tipo lineal frente a una de tipo logarítmico.

Tabla 3. Estadísticas de regresión para el punto de aforo 3 en un ajuste de tipo lineal y logarítmico

Parámetro	Ajuste lineal	Ajuste logarítmico
Intercepto	98,887	105,580
Coefficiente	-1,377	0,979
Coefficiente de determinación	0,911	0,887
Error estándar	5,740	0,103
Numero de observaciones	364	364

Fuente: autor.

Las figuras 10 y 11 presentan, respectivamente, la línea de tendencia de ajuste sobre las dispersiones de datos. Al igual que en otros, los casos no se evidenciaron diferencias significativas. Esta situación se validó numéricamente con la escasa diferencia encontrada entre los valores del coeficiente de determinación de la tabla 3.

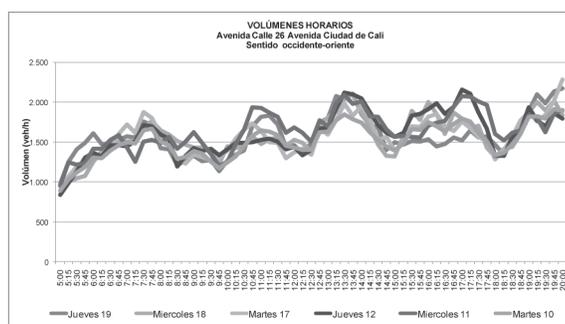


Figura 9. Variación horaria del volumen vehicular sobre la avenida calle 26 con avenida Ciudad de Cali, sentido oeste-este

Fuente: autor.

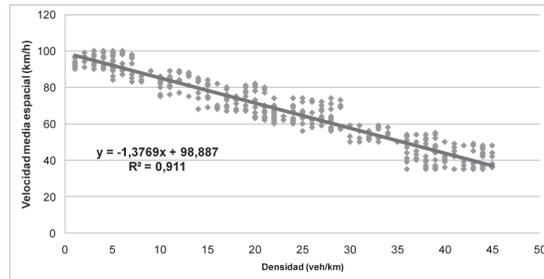


Figura 10. Variación horaria del volumen vehicular sobre la avenida calle 26 con avenida Ciudad de Cali, sentido oeste-este

Fuente: autor.

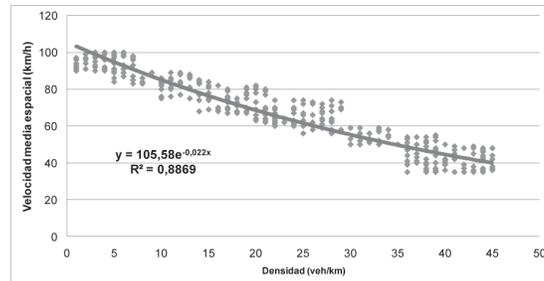


Figura 11. Variación horaria del volumen vehicular sobre la avenida calle 26 con avenida Ciudad de Cali, sentido oeste-este

Fuente: Autor del proyecto

4.4. Punto de aforo 4

Finalmente, los datos recopilados para el punto de aforo 4 mostraron que el periodo de máxima demanda se presentó sobre las 17:15 horas del día (figura 12).

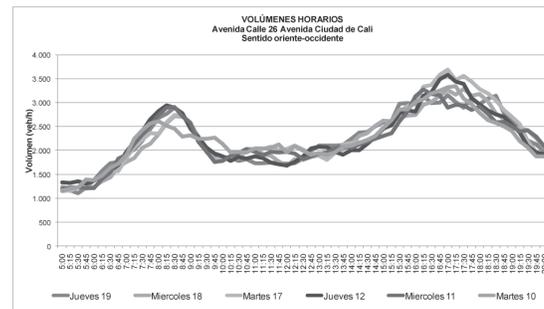


Figura 12. Variación horaria del volumen vehicular sobre la avenida calle 26 con avenida Ciudad de Cali, sentido oeste-este

Fuente: autor.

En concordancia con la tabla 4, se presentan las estadísticas resultantes del proceso de ajuste. Nuevamente se evidencia que la correlación más alta la brinda por una regresión de tipo lineal.

Tabla 4. Estadísticas de regresión para el punto de aforo 2 en un ajuste de tipo lineal y logarítmico

Parámetro	Ajuste lineal	Ajuste logarítmico
Intercepto	99,962	107,106
Coefficiente	-1,377	0,979
Coefficiente de determinación	0,902	0,879
Error estándar	5,933	0,104
Numero de observaciones	364	364

Fuente: autor.

De los parámetros presentados en las tablas 3 y 4, el intercepto con las ordenadas se da alrededor de los 99 km/h (figuras 13 y 14), que en este caso corresponde a la velocidad a flujo libre o de libre circulación. Esta sería la máxima velocidad a la que circularía un vehículo si no tuviera otros usuarios sobre la vía.

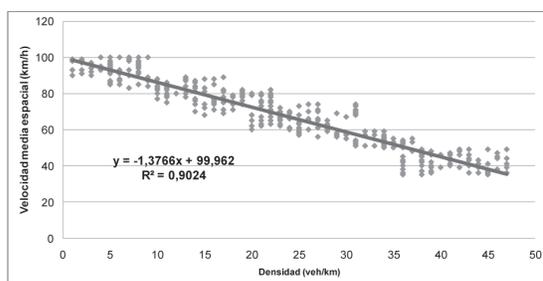


Figura 13. Variación horaria del volumen vehicular sobre la avenida calle 26 con avenida Ciudad de Cali, sentido oeste-este

Fuente: autor.

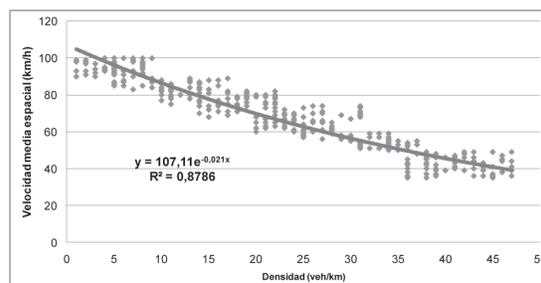


Figura 14. Variación horaria del volumen vehicular sobre la avenida calle 26 con avenida Ciudad de Cali, sentido oeste-este

Fuente: autor.

Adicionalmente, la relación decreciente o pendiente de la recta que se muestra en la figura 13 indica que por cada vehículo presente en un kilómetro de vía, los usuarios disminuirán su velocidad a una tasa de 1,37 km/h.

5. Conclusiones

A través de varias observaciones realizadas en campo para la avenida calle 26, en Bogotá, en segmentos de flujo no interrumpido y que asemejan su comportamiento a una vía multicarril, es posible obtener relaciones o ecuaciones de ajuste del tipo lineal y logarítmica con muy buenas aproximaciones (coeficientes de determinación por encima de 80%). Particularmente en los diferentes casos de análisis, el ajuste del tipo lineal minimiza los errores en cuanto a la predicción de valores y se ajusta de una mejor forma con las observaciones obtenidas en campo a partir de mediciones.

Un análisis más detallado de los diferentes parámetros estadísticos obtenidos en la relación de ajuste lineal permitió establecer la proporcionalidad con la que los conductores de la ciudad disminuyen su velocidad de circulación, conforme se incrementa el número de vehículos sobre la corriente vehicular. Estos valores oscilan entre 1,37 km/h y 1,68 km/h de disminución cada vez que se incorpora un nuevo vehículo a su corriente vehicular.

Por otra parte, se estableció que la máxima velocidad a la que circularán la mayor parte de los vehículos si no estuvieran en interacción con otros vehículos estaría entre los 99 km/h y 107 km/h para aquellos viales que asemejen su geometría a segmentos multicarril donde el flujo no es interrumpido por factores externos como semáforos, reductores de velocidad, entre otros.

Referencias

- American Association of State and Transportation Officials (1994). *A policy on geometric design of highways and streets*. Washington: Autor.
- Banks, J. H. (1995) *Another look at a priori relationships among traffic flow characteristics*. *Transportation Research Record 1510*. Washington: Transportation Research Board.
- Cal y Mayor, R. y Cárdenas, G. (2000). *Ingeniería de tránsito: fundamentos y aplicaciones* (7.ª ed.): México: Alfaomega.
- Ellis, R. (1964). *Analysis of linear relationship in speed-density and speed-occupancy curves final report*. Northwestern University: Evanston IL
- Garber, N. y Hoel, L. (2005). *Ingeniería de tránsito y carreteras* (3.ª ed.). Ciudad de México: International Thompson.
- Gerlough, D. L. y Capelle, D.L. (1964). *An introduction to traffic flow theory. Special report 79*. Washington: Transportation Research Board.
- Greenberg, H. (1959). *An analysis of traffic flows* (vol. 7). Washington: ORSA
- Greenshields, B (1934). *A study of highway capacity proceedings of the highway research board* (vol. 14). Washington: Transportation Research Board.
- Kraemer, C. (2009). *Ingeniería de carreteras* (vol. I, 2.ª ed.). Madrid: McGraw-Hill e Interamericana de España.
- Radelat, G. (2003). *Principios de ingeniería de tránsito*. Washington: Institute of Transportation Engineers.
- Roess, R. y Prassas, E. (2004). *Traffic engineering* (3.ª ed). Nueva Jersey: Pearson Education.
- Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá (2004). *Manual de planeación y diseño para la administración del tránsito y el transporte* (tomo II). Bogotá: Autor.
- Transportation Research Board (2000). *Highway Capacity Manual*. (4.ª ed.). Washington: Autor.
- Underwood, R. (1961). *Speed, volume, and density relationships*. New Heaven: Yale University.
- Valdés González, A. (2008). *Ingeniería de tráfico*. Madrid: Bellisco.