

# Caracterización y modelación de flujos peatonales en infraestructuras continuas. Caso estudio Tunja - Colombia

Characterization and Modeling of Pedestrian Uninterrupted Flow Infrastructure. Study Case Tunja-Colombia

Fredy Alberto Guío Burgos\*

## Resumen

Este artículo muestra el resultado de un proyecto de investigación cuyo objetivo fue definir una metodología para determinar la capacidad y nivel de servicio en infraestructuras peatonales continuas en Colombia, a partir de la formulación de modelos representativos del entorno, tomando como caso estudio la ciudad de Tunja, Colombia. La metodología partió del análisis de la movilidad peatonal en algunas ciudades de tamaño medio, luego se realizó la caracterización de variables macroscópicas de flujo peatonal en la ciudad caso estudio, y mediante la utilización de videos se procedió a encontrar la relación entre variables en diferentes ámbitos de flujo peatonal continuo. Finalmente se propone un procedimiento que permita determinar la capacidad y el nivel de servicio en infraestructuras peatonales de flujo continuo en Colombia.

**Palabras clave:** infraestructura peatonal, modelación de flujo peatonal, movilidad.

## Abstract

This paper shows the result of an investigation project, whose object is to define a methodology to determine the capacity and level of service in continuous pedestrian infrastructures in Colombia, starting from the formulation of representative models of the environment, taking as study case the city of Tunja - Colombia. The methodology left of the analysis of the pedestrian mobility in some cities of half size, then I did the characterization of macroscopic variables of pedestrian flow in the city study case, and by means of the use of videos, I proceeded to determine the relationship among variables in different environments of continuous pedestrian flow. Finally I proposed a procedure that allows to find the capacity and level of service in pedestrian infrastructures of continuous flow in Colombia.

**Key words:** pedestrian facilities, pedestrian flow modelling, mobility.

\* Candidato a Magíster en Ingeniería con énfasis en Tránsito. Docente de tiempo completo, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Correo electrónico: ingefreg@gmail.com – fredy.guio@uptc.edu.co

## I. Introducción

Uno de los grandes avances tecnológicos en la historia de la humanidad, el automóvil, ha causado grandes cambios en la estructura de las ciudades y en el comportamiento de las personas. La caminata, como modo de transporte, reviste gran importancia en las ciudades, y no es solo una cuestión ambiental, es un asunto de salud pública y de sentido social de los asentamientos humanos. La ciudad caminable es un entorno agradable para vivir, permite la interacción de los ciudadanos y el fortalecimiento del tejido social.

Existen dos categorías de infraestructuras de tráfico peatonal: *infraestructuras de flujo continuo o ininterrumpido* (aceras, senderos peatonales, escaleras, vías exclusivas), e *infraestructuras de flujo discontinuo o interrumpido* (pasos de cebra en intersecciones semaforizadas y cruces peatonales en intersecciones no semaforizadas).

Se distinguen dos clases de parámetros en el análisis de corrientes de tráfico peatonal: *parámetros macroscópicos*, que describen la corriente de tráfico como un todo, y los *parámetros microscópicos*, que describen el comportamiento de peatones individuales o las interacciones entre ellos.

Los tres parámetros macroscópicos principales son: volumen o tasa de flujo, velocidad y densidad. Los parámetros microscópicos peatonales más importantes son el espaciamiento, la velocidad individual de caminata y las dimensiones de la elipse corporal.

El volumen, velocidad y densidad se relacionan mediante (1).

$$q = \bar{v}_e \cdot K \quad (1)$$

Donde:

q = tasa de flujo peatonal, peatones/minuto/metro o peatones/hora/metro

Ve = velocidad media espacial de caminata, metros/segundo

K = densidad peatonal, peatones/metro cuadrado

Durante los últimos 50 años un amplio rango de teorías de flujo de tráfico y modelos se han desarrollado para tratar de comprender la complejidad de estos fenómenos. Existen modelos que relacionan las tres variables macroscópicas, lo cual permite determinar la capacidad teórica de la infraestructura (máxima tasa de flujo peatonal) y las características operativas del flujo, y cuantificar el nivel de servicio percibido por los usuarios.

El *modelo de flujo lineal* propuesto por Greenshields [1] es uno de los más utilizados, esto se debe a la simplicidad de uso y la facilidad para calibrar los parámetros del modelo. La forma del modelo se muestra en (2).

$$\bar{v}_e = v_l - \frac{v_l}{k_c} K \quad (2)$$

Donde:

$V_e$  = velocidad media espacial de caminata [m/s]

$V_l$  = velocidad de caminata a flujo libre [m/s]

$K_c$  = densidad de congestamiento [pe/m<sup>2</sup>]

K = densidad peatonal [pe/m<sup>2</sup>]

La modelación de flujos de tráfico comenzó hace más de 50 años, cuando Lighthill y Whitham [2] presentaron un modelo basado en la analogía entre el flujo de tráfico vehicular y las partículas en un fluido. Desde entonces, la descripción matemática del flujo de tráfico ha sido objeto de debate e investigación en la ingeniería de tránsito. Esto ha resultado en una amplia gama de modelos que describen diferentes aspectos del flujo del tránsito, bien sea considerando el comportamiento espacio-tiempo de conductores o peatones individuales bajo la influencia de otros vehículos o peatones, o su proximidad (modelos microscópicos), o el comportamiento de conductores o peatones sin diferenciar explícitamente su comportamiento espacio-tiempo (modelos mesoscópicos), o desde el punto de vista del flujo en general (modelos macroscópicos). Algunos investigadores se han inclinado a pensar que los modelos macroscópicos son más aproximados para realizar una correcta descripción del flujo de tráfico [3, 4].

Los modelos de flujo continuo macroscópico asumen que el comportamiento agregado de los conductores o peatones depende de las condiciones del tráfico en el ambiente directo en el que se encuentran. Esto es, ellos interactúan con el flujo de tráfico en términos de variables agregadas (como densidad, velocidad o flujo). Usualmente, los modelos son derivados de la analogía entre el flujo vehicular o peatonal y el flujo en un medio continuo (como fluidos o gases), obteniendo modelos de flujo con un limitado número de ecuaciones que son fáciles de manejar.

El manual HCM 2000 [5, 6], para el análisis de flujo peatonal en aceras y senderos peatonales, utiliza el modelo encontrado por Fruin en 1971 [7]; se trabaja con una velocidad de caminata a flujo libre de 1.43 m/s (5,15 km/h), en el caso de flujo unidireccional, y 1,36 m/s (4,9 km/h) para flujo bidireccional (3).

$$\begin{aligned} \bar{v}_e &= 1.43 - 0.35K \text{ (para flujo unidireccional)} \\ \bar{v}_e &= 1.36 - 0.34K \text{ (para flujo bidireccional)} \end{aligned} \quad (3)$$

La mayoría de los investigadores han utilizado la ecuación básica de flujo de tráfico (1) para derivar las relaciones entre flujo, velocidad y densidad con base en datos recolectados en campo.

La variación de la velocidad y del flujo peatonal debida a cambios en la densidad fue estudiada en principio por Hankin y Wright (1958) [8], para determinar la capacidad en las estaciones subterráneas del metro en Londres; también desarrollaron experimentos en colegios. Estos autores sugerían un flujo de diseño máximo de 5300 pe/m/h (peatones por metro de ancho por hora). Daly et ál. (1991) [9] encontraron que la capacidad máxima de flujo es 5160 pe/m/h en vías peatonales en el metro de Londres.

Older (1968) [10] basó sus estudios en datos recolectados en calles comerciales de Londres y encontró un flujo máximo de 4600 pe/m/h, también determinó que los peatones empiezan a caminar sobre la calzada vehicular cuando las aceras comienzan a

presentar congestión, y esto puede explicar la diferencia entre los máximos valores de flujo en los metros y aceras de calles comerciales. Older no halló diferencias en las velocidades para flujos bidireccionales.

Otro estudio, desarrollado en un área de compras en la ciudad de Leeds (Inglaterra) con base en resultados para cuatro segmentos de la misma acera, encontró pequeñas diferencias atribuidas al entorno local inmediato, tales como presencia de paraderos de buses, personas observando vitrinas, cercanía de intersecciones [11]. Un estudio en Ascot encontró velocidades, en condiciones de altas densidades, menores que las observadas en los pasillos subterráneos del metro y calles comerciales [12], sugiriendo la actitud más relajada de los espectadores y la falta de urgencia en el viaje (menor valor del tiempo).

La diferencia entre los estudios podría deberse a los variados enfoques de modelación adoptados para la curva ajustada a los datos observados (modelos de múltiple régimen o único, modelos lineales, no lineales, curvas doble S); pero las diferencias se deben, principalmente, a los distintos propósitos de viaje de las poblaciones muestreadas. Es clara la diferencia entre las curvas velocidad-densidad de Navin y Wheeler (1969) [13] con estudiantes jóvenes dándose prisa entre clases, y el modelo obtenido por Virkler y Elayadath (1994) [14] con personas moviéndose lentamente y sin prisa en su viaje. Navin y Wheeler [13] sugirieron una relación lineal entre velocidad y densidad, mientras que Virker y Elayadath [14] propusieron dos tipos de relaciones (para densidades menores y mayores que 1,07 pe/m<sup>2</sup>). Polus (1983) [15] también definió tres rangos para las relaciones (para densidades en el rango de <0,6, 0,6-0,75 y >0,75 pe/m<sup>2</sup>). El modelo de los tres intervalos mostró un mejor ajuste con los datos observados.

Fruin (1971) [7] propuso dos modelos lineales para flujos peatonales unidireccionales y bidireccionales, con base en datos recolectados en un terminal de buses en New York con alto tráfico de personas al trabajo. Modelos separados también sugirieron

algunas pérdidas de capacidad debidas a flujo bidireccional. Para vías en espacios interiores en una estación de tren encontrado por Lam et ál. (2000) en Hong Kong [16], las curvas muestran velocidades un tanto mayores a bajas densidades.

Es difícil comparar estos dos resultados con los encontrados por Hankin y Wright (1958) [8] para estaciones subterráneas del metro en Londres, debido al uso de diferentes modelos (lineales versus no lineales); sin embargo, a bajas y altas densidades, el modelo de Fruin [7] se acerca bastante al de Hankin y Wright [8].

Otros autores, como Dandan et ál. (2007) [17], han encontrado, mediante estudios en poblaciones de China como Nanjing, que los factores que tienen mayor incidencia en el nivel de servicio peatonal en aceras son: elementos de separación entre flujo peatonal y vehicular, volumen de tránsito peatonal, volumen vehicular y de bicicletas, obstáculos en la acera y discontinuidades en la acera por intersecciones y elementos generadores de flujos conflictivos. Seyfried, Steffen et ál. (2005) [18] estudian el efecto, en los modelos de flujo, del espacio ocupado por el peatón en función del ancho de la elipse corporal.

Tabla 1. Relaciones  $V - K$  encontradas en diferentes estudios

| Estudio   | Relación Velocidad - Densidad        |
|---|--------------------------------------|
| Hankin y Wright, 1958                                   | No definido matemáticamente          |
| Older, 1968   | $v = 1,31 - 0,34 K$                  |
| Navin y Wheeler, 1969                                   | $v = 2,13 - 0,79 K$                  |
| Fruin, 1971 (unidireccional)                            | $v = 1,43 - 0,35 K$                  |
| Fruin, 1971 (bidireccional)                             | $v = 1,36 - 0,34 K$                  |
| O'Flaherty y Parkinson, 1972 (cerca de tiendas vacías)  | $v = 1,37 - 0,36 K$                  |
| O'Flaherty y Parkinson, 1972 (cerca de paradero de bus) | $v = 1,46 - 0,49 K$                  |
| O'Flaherty y Parkinson, 1972 (cerca de cruce)           | $v = 1,53 - 0,49 K$                  |
| O'Flaherty y Parkinson, 1972 (cerca de venta de ropa)   | $v = 1,42 - 0,44 K$                  |
| Polus, 1983 ( $K < 0.6$ )                               | $v = 1,27 - 0,12 K$                  |
| Polus, 1983 ( $0.6 < K < 0.75$ )                        | $v = 1,33 - 0,27 K$                  |
| Polus, 1983 ( $K > 0.75$ )                              | $v = 1,62 - 0,73 K$                  |
| Tanaboriboon et ál., 1986                               | $v = 1,26 - 0,26 K$                  |
| Al-Masaied et ál., 1993                                 | $v = (0,32 + 2,05 v - 1,55 v^2) / K$ |
| Virkler y Elayadath, 1994 ( $K < 1.07$ )                | $v = 1,01 e^{(-0,24 K)}$             |
| Virkler y Elayadath, 1994 ( $K > 1.07$ )                | $v = 0,61 \ln(4,32 / K)$             |
| Lam et ál., 1995 (pasillos)                             | $v = 1,29 - 0,36 K$                  |
| Lam et ál., 1995 (aceras)                               | $v = e^{(0,38 - 0,57 K)}$            |
| Lam et ál., 1995 (cruce semaforizado)                   | $v = 1,42 e^{(-0,347 K^2)}$          |
| Lam et ál., 1995 (cruce semaforizado)                   | $v = 1,67 e^{(-0,5 K)}$              |
| Sarkar y Janardhan, 2001                                | $v = 1,46 - 0,35 K$                  |
| Brocklehurst et al., 2005                               | No definido matemáticamente          |

Tradicionalmente, el nivel de servicio para peatones ha sido definido cuantitativamente por la capacidad de una infraestructura en términos de la cantidad de espacio disponible por peatón, basado en la estimación de la velocidad media de caminata y las tasas de flujo peatonal [7].

Wen Ya et ál. (2007) [20] definieron un método para determinar la escala de niveles de servicio en infraestructuras peatonales, fundamentado en información capturada en las infraestructuras peatonales del metro de Shanghai.

El HCM [5] indica que la capacidad en aceras o vías exclusivas se encuentra cuando el espacio peatonal está cerca de 0,56 m<sup>2</sup>/pe, mientras que, por ejemplo,

para alcanzar el nivel de servicio A debe pasar a 5,6 m<sup>2</sup>/pe. La tabla 2 compara las indicaciones del HCM [5] con otros autores.

Tabla 2. Algunos criterios de niveles de servicio en aceras o vías exclusivas

| Fuente                    | Variable               | Nivel de servicio |            |            |            |             |             |
|---------------------------|------------------------|-------------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|
|                           |                        | A                 | B          | C          | D          | E           | F           |
| HCM 2000                  | S (m <sup>2</sup> /pe) | = 5,6             | 3,7 – 5,6  | 2,2 – 3,7  | 1,4 – 2,2  | 0,75 – 1,4  | = 0,75      |
|                           | q (pe/min/m)           | = 16              | 16 - 23    | 23 – 33    | 33 - 49    | 49 - 75     | Variable    |
| Fruin (1987)              | S (m <sup>2</sup> /pe) | = 3,2             | 2,3 – 3,2  | 1,4 – 2,3  | 0,9 – 1,4  | 0,5 – 0,9   | = 0,5       |
|                           | q (pe/min/m)           | = 23              | 23 - 33    | 33 - 49    | 49 - 66    | 66 - 82     | Variable    |
| Pushkarev – Zupan (1975)  | S (m <sup>2</sup> /pe) | = 12              | 4 - 12     | 2 - 4      | 1,5 - 2    | 1 – 1,5     | = 1         |
|                           | q (pe/min/m)           | = 7               | 7 - 20     | 20 - 33    | 33 - 46    | 46 - 59     | 0 – 82      |
| Brilon (1994)             | S (m <sup>2</sup> /pe) | = 10              | 3,3 - 10   | 2 – 3,3    | 1,4 - 2    | 0,6 – 1,4   | = 0,6       |
|                           | q (pe/min/m)           | -                 | -          | -          | -          | -           | -           |
| Guerilla et ál. (1995)    | S (m <sup>2</sup> /pe) | = 3,25            | 2,05-3,25  | 1,65-2,05  | 1,25-1,65  | 0,56-125    | =0,56       |
|                           | q (pe/min/m)           | -                 | -          | -          | -          | -           | -           |
| Polus et ál. (1983)       | S (m <sup>2</sup> /pe) | -                 | -          | = 1,67     | 0,8 – 1,66 | 0,5 – 0,8   | Desconocido |
|                           | q (pe/min/m)           | -                 | -          | = 40       | 40 – 75    | 75 - 95     | Desconocido |
| Tanaboriboon Guyano(1986) | S (m <sup>2</sup> /pe) | =2,38             | 1,6 – 2,38 | 0,98 – 1,6 | 0,65 -0,98 | 0,37 – 0,65 | = 0,37      |
|                           | q (pe/min/m)           | = 28              | 28 - 40    | 40 – 61    | 61 - 81    | 81 - 101    | Variable    |
| Wen et ál. (2007)         | S (m <sup>2</sup> /pe) | = 3,5             | 2 – 3,5    | 1,3 - 2    | 0,9 – 1,3  | < 0,9       | -           |
|                           | q (pe/min/m)           | 0 - 24            | 24 - 40    | 40 - 58    | 58 - 80    | > 80        | -           |

Es de mencionar que la mayoría de las investigaciones sobre flujos peatonales se basa o tiene en cuenta lo indagado por Fruin (1971) [7].

## II. Metodología

La caracterización de la movilidad peatonal en las ciudades de tamaño intermedio (Armenia, Barrancabermeja, Manizales, Pasto y Tunja) se realizó a partir de información secundaria, obtenida en bases de datos de estudios de movilidad, proporcionada por el Grupo de Investigación y Desarrollo en Planeación y Operación del Transporte (GIDPOT) [23], de la Escuela de Ingeniería de Transporte y Vías de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia en Tunja.

La determinación de las características y relaciones entre variables macroscópicas de flujo peatonal se desarrolló con base en observaciones de campo realizadas mediante filmaciones. La calibración de

los modelos de flujo se realizó mediante el uso de software estadístico especializado.

## III. Resultados

### A. Algunos datos de la movilidad peatonal en Tunja

Las personas viajan de un lugar a otro dentro de una ciudad para suplir sus necesidades o intereses de carácter familiar, laboral, cultural o social, es decir, con el objeto de realizar algún tipo de actividad en el destino. Para dichos viajes pueden utilizar diferentes modos de transporte; en la escogencia de estos influyen diferentes factores, unos relacionados con el costo, otros con las características socio-económicas del viajante y algunos otros con aspectos propios del viaje en sí y del espacio en el cual se lleva a cabo. En ese sentido, se dan a continuación algunos datos sobre la movilidad peatonal en Tunja, ciudad que se escogió como caso estudio en la investigación sobre “calidad del servicio ofrecido por

infraestructuras peatonales”, que se está desarrollando en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), con sede en la mencionada ciudad. Dichos datos se consideran de interés, dado que muestran algunas características de la movilidad peatonal que permiten deducir y establecer diferencias con la movilidad peatonal en ciudades norteamericanas, reforzando así la idea de promover la elaboración de un manual para determinar la calidad del servicio ofrecido por nuestras vías peatonales.

### ***Tunja, ciudad estudiantil***

Tunja es la capital del departamento de Boyacá (Colombia); está localizada en el sector centro-oriental del país, en la zona andina, a una altura de 2700 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura promedio de 14 grados, en un sector a media ladera, luego sus vías, en especial en el ámbito antiguo, son en pendiente, que en algunos casos sobrepasa el 7%. Otro aspecto que identifica la ciudad, además del clima frío y la topografía, es que en promedio llueve el 60% de los días del año (situación que incide en los viajes peatonales). La población del área urbana, para el 2009, se estima en 160.000 habitantes; las actividades principales están relacionadas con la educación y, por el hecho de ser capital de departamento, con las actividades institucionales y comerciales.

### ***Un par de datos de la movilidad urbana***

En octubre del año 2003, la UPTC determinó, con base en los resultados de encuestas domiciliarias, las características del transporte en la ciudad, que permiten, bajo algunos supuestos, establecer los estimativos de la movilidad urbana en el 2009. En ese sentido, se considera que en dicho año (2009) se presentan 340.000 viajes en un día laboral, de los cuales, el 49% son en Transporte Público Colectivo Urbano (TPCU); el 33% (112.000 viajes) son netamente a pie, es decir, el 82% de los desplazamientos urbanos (278.000 viajes) requieren en su totalidad o en parte utilizar infraestructuras peatonales. Es de mencionar que la distancia media de caminata para acceso al sistema de TPCU es de

240 metros y similar del paradero al destino, es decir, cada viaje en TPCU implica en promedio el uso de 480 metros de infraestructura peatonal. En igual sentido, se determinó que el 79% de los ciudadanos realizan viajes, considerando “viaje” el desplazamiento de cinco minutos de duración (aproximadamente 400 metros) o más, que se efectúa con un propósito determinado.

### ***Propósito de los viajes a pie***

Como es de esperar, el 48% de los viajes peatonales tienen como motivo el “regresar a casa”; el 25%, el estudio; el 16%, trabajo, y el restante 11%, compras, recreación y otros.

### ***Edad de los caminantes***

Los niños y niñas (edad entre 5 y 10 años) originan el 8,6% del total de viajes urbanos y el 13% de los viajes peatonales. Los jóvenes, el 38% del total de viajes y el 48% de los desplazamientos peatonales, es decir, los jóvenes (11–25 años) realizan diariamente 129.000 desplazamientos, de los cuales 54.000 son caminando (el 42%); se podría decir que el modo principal de desplazamiento de los jóvenes es el peatonal. Para los adultos (26–60 años) la relación es diferente, si se considera que son causantes del 49% de los viajes totales y del 36% de los peatonales. Los adultos mayores (más de 60 años) efectúan relativamente pocos viajes: el 3,8% de los totales (11.000) de los cuales 3000 son caminando (uno de cada cuatro).

### ***Nivel de ingresos de los caminantes***

Al tener en cuenta que la mayoría de los caminantes son menores de 25 años, es obvio que el 64% de los desplazamientos peatonales son realizados por personas dependientes (no tienen ingresos laborales propios); un 20% tienen ingresos iguales o inferiores a 500.000 pesos mensuales (un salario mínimo mensual, SMM); un 11% con ingresos entre 1 y 2 SMM, y el 5% de los viajes peatonales son realizados por personas que tienen ingresos mayores de 2 SMM; de esto se observa lo socialmente relevante de ofrecer una buena calidad del servicio de transporte a las

personas de menores ingresos, lo cual se logra por medio del mejoramiento de las infraestructuras.

### ***Ocupación de los peatones***

Se estima que el 55% de los desplazamientos peatonales son efectuados por estudiantes, cuyo

principal modo de transporte es este. En la tabla 3 se muestra la cantidad de viajes diarios totales según ocupación, los viajes peatonales y la relación de “uso” del modo peatonal, con respecto a los viajes totales en cada tipo de ocupación; los estudiantes se ratifican como usuarios principales del modo peatonal.

Tabla 3. *Viajes totales y peatonales según ocupación*

| <b>Ocupación</b> | <b>Todos %</b> | <b>Peatón %</b> | <b>Viaje total</b> | <b>Viaje peatón</b> | <b>Peatón/total</b> |
|------------------|----------------|-----------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| Estudiante       | 40             | 55              | 136,000            | 61,600              | 0,45                |
| Empleado         | 46             | 30              | 156,400            | 33,600              | 0,21                |
| Ama de casa      | 8              | 7               | 27,200             | 7,840               | 0,29                |
| Desempleado      | 5              | 7               | 17,000             | 7,840               | 0,46                |
| Jubilado         | 1              | 1               | 3,400              | 1,120               | 0,33                |
| <b>Total</b>     | <b>100</b>     | <b>100</b>      | <b>340,000</b>     | <b>112,000</b>      | <b>0,33</b>         |

Es significativo aclarar que no se pueden relacionar directamente los viajes efectuados por jubilados con los viajes realizados por adultos mayores, dado que solo el 26% de los adultos mayores se benefician con la jubilación.

### ***Distancia y tiempo promedio de los viajes peatonales***

El 85% de los viajes peatonales son de distancias menores a 1.800 metros; la distancia promedio de los desplazamientos peatonales es de 970 metros, que se recorren en 13 minutos.

### ***Velocidad promedio de los caminantes***

En el centro de la ciudad de Tunja se tomó una muestra de 3.087 observaciones de peatones (videgrabación), durante un periodo típico de un día laboral. De ella se obtuvieron los siguientes datos explicativos de la movilidad peatonal en dicho sector:

- El 81% de los caminantes viajan solos y sin paquetes
- En grupo van el 14%.
- Con paquetes el 5%.
- Las mujeres son el 48%.

- Adultos mayores, el 15%.
- Los peatones más rápidos son los hombres jóvenes, con una velocidad media de 1,48 m/s; le siguen los hombres adultos, con 1,43 m/s; luego las mujeres jóvenes, que transitan a una velocidad media de 1,37 m/s.
- Los caminantes más lentos son las mujeres adultas mayores (0,93 m/s).
- Otras velocidades promedio son: niños (0,97 m/s); hombres adultos mayores (1,11 m/s); niñas (1,35 m/s); mujeres adultas (1,23 m/s).

### ***Algunos ejemplos de infraestructuras peatonales en Tunja***

La figura 1 muestra un ejemplo de sección transversal típica en las calles del centro de la ciudad: calzada de 4 m, aceras angostas, ancho de la sección de 8,9 m. En esta sección transversal se contabilizó, en el año 2008, un volumen de 42340 peatones y 5061 automóviles (con una ocupación de 8100 viajeros) en un periodo de 14 horas.

Por otra parte, las vías peatonales exclusivas ofrecen condiciones de circulación peatonal mucho más cómodas, como lo ilustra la figura 2.



*Figura 1.* Sección transversal restringida para peatones



*Figura 2.* Vía exclusiva peatonal. Carrera 10 entre calles 20 y 21, Tunja

En contraste, la infraestructura peatonal en los barrios no centrales presenta altas variaciones. Por ejemplo, incluso en aquellos barrios que ostentan un estrato socioeconómico alto, es común observar

discontinuidades en la acera, obstáculos, variaciones de ancho y aun inexistencia de aceras. La figura 3 ilustra un par de ejemplos de este fenómeno.



*Figura 3.* Aceras de un barrio de estrato alto en Tunja

En cuanto a escaleras y rampas, debido a la topografía de la ciudad, es común la presencia de escalones en las aceras, y la construcción de rampas en las intersecciones y cruces es limitada, pues estas suelen tener pendientes muy altas y ser muy angostas. La presencia de obstáculos en las aceras es una constante en la infraestructura urbana de la ciudad. En la figura 4 se ilustra esta situación (Tunja, carrera 12, entre calles 17 y 18).



*Figura 4.* Obstáculos en la acera



*B. Características de las variables de flujo peatonal en Tunja*

**Volumen de tránsito**

Se realizó un aforo peatonal desde las 07:00 hasta las 19:00, y se contabilizó un volumen peatonal total de 23 929 peatones. Se encontró que el periodo de máxima demanda es entre las 11:15 y las 12:15, con un volumen de 3372 pe/h.

La máxima tasa de flujo encontrada es de 916 pe/15min, y se encuentra entre las 11:45 y las 12:00. El factor de hora pico, considerando

periodos de 15 minutos es 0,92. Al considerar periodos de un minuto se obtiene un factor de hora pico de 0,75, lo que indica una distribución homogénea del flujo.

En relación con la distribución direccional, se encontró que esta es 50/50 (salen/entran de la plaza de Bolívar). Respecto a la distribución por género, se encontró que es 49/51 (femenino/masculino). En lo correspondiente a los rangos de edad, la distribución se muestra en la figura 5.

Por otra parte, la variación temporal del volumen de tránsito se muestra en la figura 6.

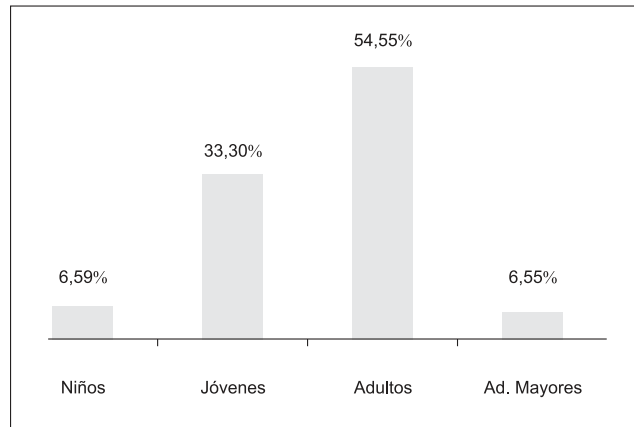


Figura 5. Rangos de edad, calle 19 entre carreras 10 y 11

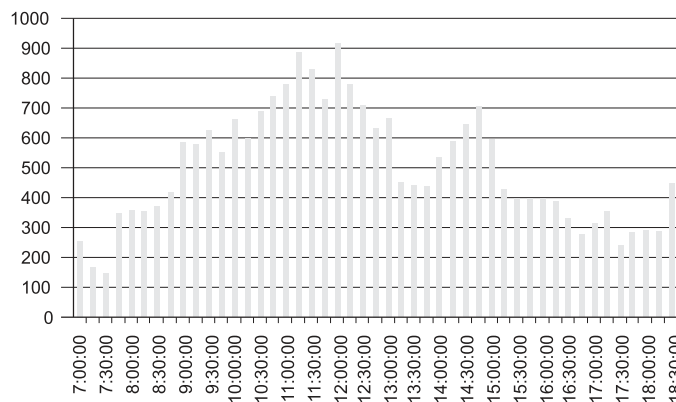


Figura 6. Volumen peatonal en la calle 19 entre carreras 10 y 11

### Velocidad de caminata

Esta variable fue caracterizada con base en mediciones manuales y sobre grabaciones en videocámara.

La distribución de la población considerada, según los rangos de edad, fue:

- Niños: menores de 10 años
- Jóvenes: entre 11 y 25 años
- Adultos: entre 26 y 60 años

- Adultos mayores: más de 60 años.

Se consideró también la discriminación del género para cada uno de los rangos de edad. Como resultado de las observaciones de campo se consideró necesario determinar la velocidad de caminata de las personas en grupos, así como de personas que cargan paquetes o maletas en las manos. Los resultados obtenidos de las observaciones de velocidad se resumen en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados de velocidad de caminata en Tunja

| POBLACIÓN          |                 | Velocidad media espacial (m/s) | Velocidad media temporal (m/s) | Desviación estándar (m/s) | Percentil 15 (m/s) | Percentil 85 (m/s) | Tamaño muestral |
|--------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|-----------------|
| General            |                 | 1,23                           | 1,33                           | 0,33                      | 1,01               | 1,66               | 3087            |
| HOMBRES            | Niños           | 1,27                           | 1,31                           | 0,24                      | 1,06               | 1,55               | 238             |
|                    | Jóvenes         | 1,48                           | 1,58                           | 0,37                      | 1,19               | 1,97               | 486             |
|                    | Adultos         | 1,43                           | 1,50                           | 0,29                      | 1,20               | 1,81               | 335             |
|                    | Adultos mayores | 1,11                           | 1,16                           | 0,21                      | 0,93               | 1,38               | 250             |
|                    | Total           | 1,27                           | 1,43                           | 0,38                      | 1,05               | 1,81               | 1309            |
| MUJERES            | Niñas           | 1,35                           | 1,39                           | 0,22                      | 1,15               | 1,61               | 200             |
|                    | Jóvenes         | 1,37                           | 1,41                           | 0,23                      | 1,18               | 1,64               | 469             |
|                    | Adultas         | 1,23                           | 1,26                           | 0,20                      | 1,05               | 1,46               | 322             |
|                    | Adultas mayores | 0,93                           | 1,00                           | 0,25                      | 0,71               | 1,26               | 208             |
|                    | Total           | 1,23                           | 1,29                           | 0,27                      | 1,02               | 1,56               | 1199            |
| Grupos             |                 | 1,12                           | 1,17                           | 0,22                      | 0,94               | 1,40               | 435             |
| Paquetes           |                 | 1,20                           | 1,25                           | 0,26                      | 1,00               | 1,49               | 144             |
| Solos sin paquetes |                 | 1,25                           | 1,36                           | 0,34                      | 1,04               | 1,71               | 2508            |

Al analizar los resultados de pruebas de hipótesis para todas las categorías de peatones, se puede afirmar, con el 95% de confianza, que las únicas categorías que estadísticamente tienen la misma velocidad de caminata son las niñas con jóvenes, y los niños con niñas. Este resultado permite considerar que en el planteamiento de una metodología pertinente para estimar la capacidad y nivel de servicio de una infraestructura peatonal es necesario considerar la distinción por género y edad de los peatones.

### C. Relaciones entre variables de flujo

Las relaciones entre variables macroscópicas de flujo peatonal (volumen, velocidad y densidad) permitieron calibrar modelos de flujo bidireccional para aceras con dos anchos efectivos distintos. Igualmente, se calibró y validó un modelo para flujo unidireccional y bidireccional en infraestructuras peatonales exclusivas. Los modelos calibrados se muestran en la tabla 5 (los valores entre paréntesis corresponden al estadístico t).

Tabla 5. Modelos de flujo teóricos y calibrados

| Modelo                          | Intersección | Pendiente      | R <sup>2</sup> |
|---------------------------------|--------------|----------------|----------------|
| Fruin (1971), unidireccional    | 1,43         | -0,35          | -              |
| Fruin (1971), bidireccional     | 1,36         | -0,34          | -              |
| Acera We = 1 m, bidireccional   | 1,14 (21,69) | -0,26 (-9,39)  | 0,66           |
| Acera We = 1.5 m, bidireccional | 1,19 (24,74) | -0,31 (-6,34)  | 0,47           |
| Vía exclusiva, unidireccional   | 1,52 (18,42) | -0,50 (-5,81)  | 0,77           |
| Vía exclusiva, bidireccional    | 1,31 (28,03) | -0,31 (-11,09) | 0,96           |

Las figuras 7 y 8 muestran gráficamente los modelos calibrados para las infraestructuras peatonales en la ciudad de Tunja.

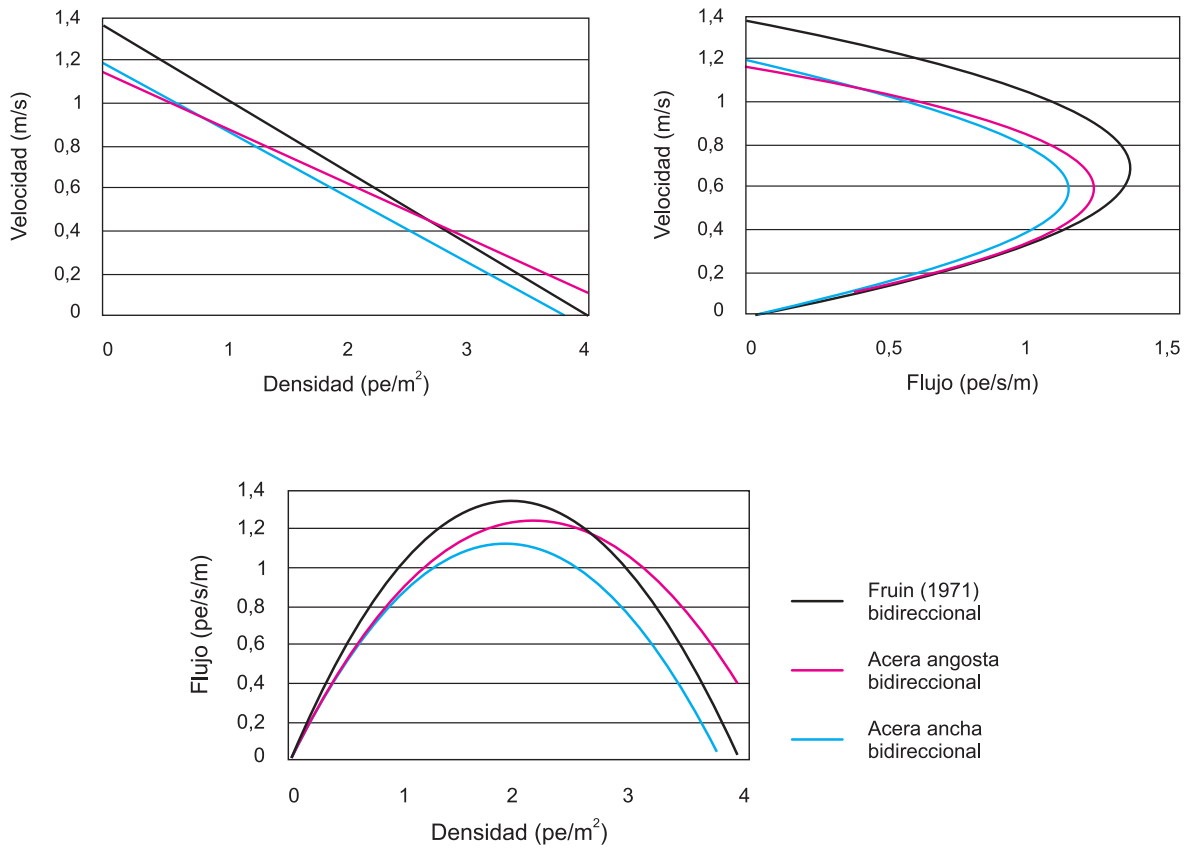


Figura 7. Modelos de flujo calibrados para aceras en Tunja

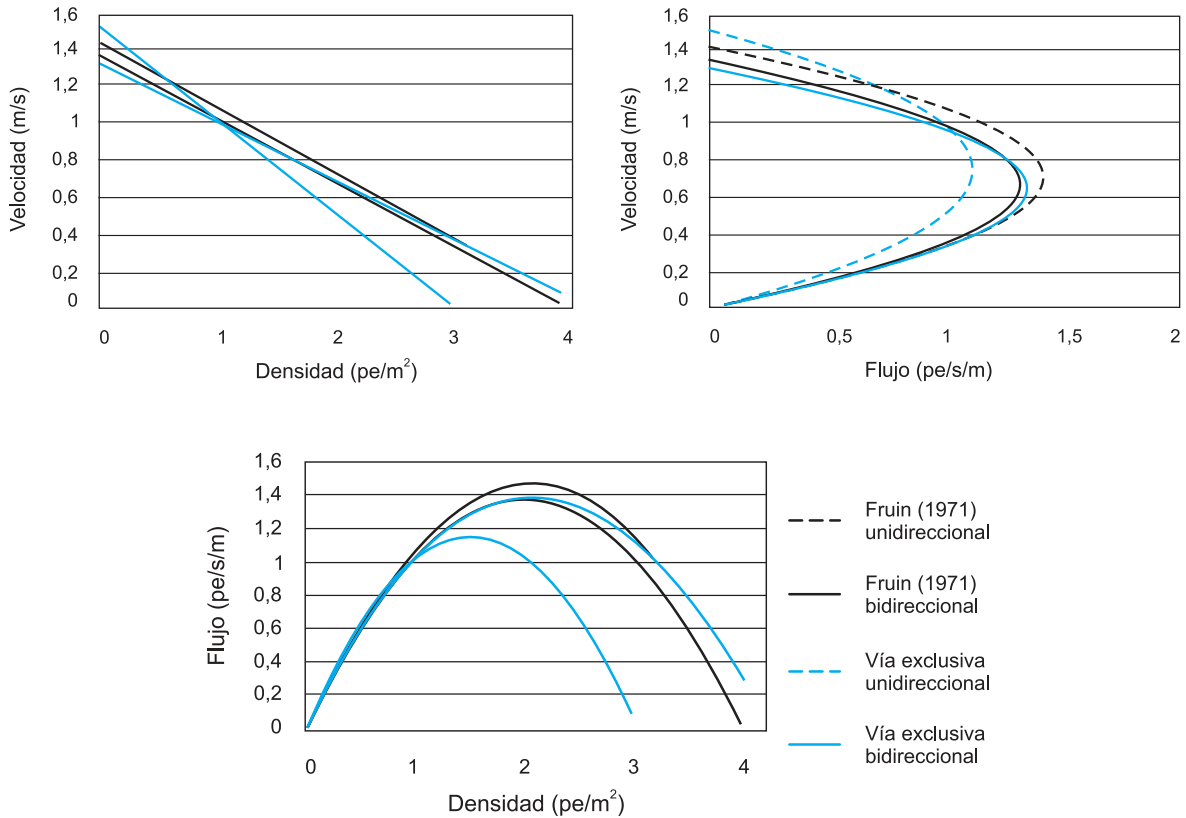


Figura 8. Modelos de flujo calibrados para vías peatonales exclusivas en Tunja

La tabla 6 presenta los cálculos de capacidad teórica para los modelos calibrados y los modelos teóricos utilizados por HCM 2000.

Tabla 6. Capacidad teórica de los modelos

| Modelo                        | Velocidad a flujo libre (m/s) | Densidad de apretamiento (pe/m <sup>2</sup> ) | Capacidad teórica (pe/h/m) |
|-------------------------------|-------------------------------|---|----------------------------|
| Fruin (1973), unidireccional  | 1,43                          | 4,09  | 5258                       |
| Fruin (1973), bidireccional   | 1,36                          | 4,00  | 4896                       |
| Acera angosta, bidireccional  | 1,14                          | 4,38  | 4499                       |
| Acera > 1.5 m, bidireccional  | 1,19                          | 3,84  | 4111                       |
| Vía exclusiva, unidireccional | 1,52                          | 3,04  | 4159                       |
| Vía exclusiva, bidireccional  | 1,31                          | 4,23  | 4982                       |

El modelo calibrado para aceras angostas muestra similitudes grandes con respecto al modelo teórico de Fruin (1971), con un grado de ajuste considerable. El modelo que se calibró para aceras anchas no tiene buen ajuste y presenta diferencias significativas con respecto al modelo teórico.

El experimento de simulación permitió calibrar los modelos para vías exclusivas que se relacionan con el modelo teórico de Fruin (1971); especialmente se encontró una buena aproximación con el modelo de flujo bidireccional, sin embargo, debe tenerse en cuenta que los modelos fueron calibrados con un bajo número de observaciones.

Las condiciones presentes de flujos peatonales en vías exclusivas de la ciudad de Tunja son representativas de flujo libre, y al considerar el valor medio de las observaciones en el modelo, se mejora la confiabilidad en que el valor de la velocidad a flujo libre (intersección) del modelo sea representativo de condiciones reales del entorno observado.

Los modelos logarítmicos mostraron un mejor ajuste en las regresiones realizadas para aceras; no obstante, se optó por utilizar el modelo lineal por su mejor comportamiento, en especial en condiciones de flujo libre.

Finalmente, se logró definir una metodología para calcular la capacidad y determinar el nivel de servicio de las infraestructuras peatonales. La metodología se basa en separar el cálculo de la capacidad del cálculo del nivel de servicio, mediante el uso de factores de ajuste que se consideran variables, como: ancho efectivo, factor de hora pico, edad, género, pendiente de la vía, estado de la vía, tipo de vía, distribución direccional y tipo de sector.

El parámetro utilizado para calificar el nivel de comodidad percibido por los usuarios en la infraestructura peatonal es la velocidad media de caminata.

#### IV. Conclusiones

- La movilidad peatonal en las ciudades intermedias consideradas en el proyecto es muy significativa, pues los viajes a pie representan alrededor de un tercio de los viajes totales; este es un aspecto importante de la movilidad en el país, porque las ciudades de tamaño medio albergan casi una tercera parte de la población colombiana que vive en cabecera municipal.
- La técnica de captura de información mediante cámara de video resultó exitosa, particularmente para la medición de densidad y velocidad de caminata.

- Se puede afirmar que las únicas categorías de peatones que estadísticamente tienen la misma velocidad de caminata son las niñas con jóvenes, y los niños con niñas. Por lo que en la metodología propuesta para el cálculo de capacidad y nivel de servicio, para uso de la velocidad en función de la edad, es necesario considerar cada categoría aparte, incluida la distinción por género.
- En cuanto a la capacidad teórica de la infraestructura peatonal, se encontró que, en términos generales, esta es inferior para las condiciones del entorno analizado con respecto al modelo teórico utilizado en la metodología del manual de capacidad HCM 2000 TRB (2000). En el caso de las aceras, la capacidad encontrada es cercana al 80%, mientras que para la infraestructura exclusiva bidireccional el valor encontrado es muy similar al del modelo de Fruin (1971); sin embargo, en el caso de vías exclusivas con flujo unidireccional se halló un valor de densidad de apretujamiento bajo, que arroja una capacidad equivalente al 80%.
- Se plantea una metodología preliminar para calcular la capacidad y el nivel de servicio en infraestructuras peatonales de flujo continuo en Colombia. La propuesta metodológica se basa en separar el cálculo de la capacidad del cálculo del nivel de servicio.

#### Agradecimientos

A Domingo Ernesto Dueñas Ruiz, doctor en ingeniería, profesor jubilado de la Escuela de Ingeniería en Transporte y Vías de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por su gran colaboración, motivación y guía en el proceso.

A Luis Alfredo Vega Báez, doctor en ingeniería, profesor de la Escuela de Ingeniería en Transporte y Vías de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, por sus pertinentes y oportunas sugerencias.

## Referencias

- [1] B. Greenshields. *A Study of Highway Capacity. Proceedings of the Highway Research Board*, Vol. 14. Transportation Research Board. National Research Council. Washington DC. 1934.
- [2] M. H. Lighthill and G. B. Whitham. "On Kinematic Waves II: a Theory of Traffic Flow on Long, Crowded Roads". *Proceedings of the Royal Society of London, series A*, 229, 317-345, 1955.
- [3] B. S. Kerner, P. Konhäuser and M. Schilke. "A New Approach to Problems of Traffic Flow Theory". In: Lesort, J.B. (ed), *Proceedings of the 13th International Symposium of Transportation and Traffic Theory*, Lyon, 119-145, 1996.
- [4] B. S. Kerner, M. Aleksic and H. Rehborn. Automatic Tracing and Forecasting of Moving Traffic Jams using Predictable Features of Congested Traffic Flow. In: Schnieder, E. and U. 2000.
- [5] TRB. *Pedestrian and Bicycle Concepts, in Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, Washington, DC. Chapter 11. 2000.
- [6] TRB. *Pedestrians, in Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, Washington, DC. Chapter 18, 2000.
- [7] J. Fruin. *Pedestrian planning and design*, Metropolitan Association of Urban Designer and Environmental Planners, Inc., New York, 1971.
- [8] B. D. Hankin and R. A. Wright. "Passenger flows in subways". *Journal of the Operational Research Society* 9(2), pp. 81-88, 1958.
- [9] P. N. Daly, F. McGrath and T. J. Annesley. "Pedestrian Speed/Flow Relationships for Underground Stations". *Traffic Engineering and Control*, Vol. 32, pp. 75-78, 1991.
- [10] Older, S. J. "Movement of pedestrians on footways in shopping streets". *Traffic Engineering and Control*, Vol. 10, pp. 160-163, 1968.
- [11] C. A. O'Flaherty and M. H. Parkinson. "Movement in a City Centre Footway". *Traffic Engineering and Control*, Vol. 13, pp. 434-438, 1972.
- [12] D. Brocklehurst, D. Bouchlaghem, D. Pitfield, G. Palmer and K. Still. "Crowd Circulation and Stadium Design: Low Flow Rate Systems". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 158, pp. 281-289, 2005.
- [13] F. P. D. Navin and R. J. Wheeler. "Pedestrian Flow Characteristics". *Traffic Engineering*, 39(4), pp.30-36, 1969.
- [14] M. R. Virkler and S. Elayadath. "Pedestrian Speed-Flow-Density Relationships". *Transportation Research Record. 1438*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 51-58, 1994.
- [15] A. Polus, J. L. Schofer and A. Ushpiz. "Pedestrian Flow and Level of Service". *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 109, pp. 46-56, 1983.
- [16] W. H. K. Lam and C. Cheung. "Pedestrian Speed Flow Relationships for Walking Facilities in Hong Kong". *J. Transp. Eng.*, 126(4): 343-349, 2000.
- [17] Tan Dandan, Wang Wei, Lu Jiang, Bian Yang. "Research on Methods of Assessing Pedestrian Level of Service for Sidewalk". *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, Vol 7, Issue 5, October 2007. WWW.ScienceDirect.com.
- [18] A. Seyfried, B. Steffen and T. Lippert. "Basics of Modelling the Pedestrian Flow". *Physica A*, 368(1), pp. 232-238, 2006.
- [19] Y. Tanaboriboon, S. S. Hwa and C. H. Chor. "Pedestrian Characteristics Study in Singapore". *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 112, pp. 229-235, 1986.
- [20] Wen Ya, Yan Kefei and Yu Chaowei. Level of Service Standards for Pedestrian Facilities in Shanghai Metro Stations. International Conference on Transportation Engineering 2007 (ICTE 2007). Copyright ASCE 2007.
- [21] B. Pushkarev and J. Zupin. *Urban Space for Pedestrians*, MIT Press, Cambridge, 1975.
- [22] W. Brilon. "Traffic Engineering and the New German Highway Capacity Manual". *Transportation Research A*, Vol. 28, pp. 469-481, 1994.
- [23] Grupo de Investigación y Desarrollo en Planeación y Operación del Transporte GIDPOT (2004). *Bases de datos de estudios de movilidad*. Escuela de Transporte y Vías, Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

Fecha de recepción: 23 de octubre de 2007

Fecha de aprobación: 30 de mayo de 2008