



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Variación del nivel de servicio de las vías urbanas en una zona con tarifa de cobro por congestión para autos particulares

Javier Jesús Solarte Portilla

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento Ingeniería Civil
Medellín, Colombia
2015



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Variación del nivel de servicio de las vías urbanas en una zona con tarifa de cobro por congestión para autos particulares

Javier Jesús Solarte Portilla

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas de Transporte

Director:

Ph.D. Iván Sarmiento Ordosgoitia

Línea de Investigación:

Planeamiento de Transporte – Capacidad y Niveles de Servicio

Grupo de Investigación:

Vías y Transporte VITRA

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Medellín, Colombia

2015

Notas de aceptación

Presidente del Jurado

Segundo Jurado

Medellín, Agosto del 2015

DEDICATORIA

A la memoria de mi padre Luis Manuel y de mi abuelita Zoila. Q.E.P.D.

A mi madre Luz María, por sus bendiciones y oraciones, que siempre son bien escuchadas por Dios.

AGRADECIMIENTOS

Especiales agradecimientos a la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín por la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos.

Infinitos agradecimientos a todos mis profesores, en especial a Iván Sarmiento por compartir sus conocimientos y sus consejos más allá de una aula de clase, muchas gracias por su amistad y colaboración.

Enormes agradecimientos a la Contraloría General de la República entidad donde trabajo, por permitir los tiempos necesarios para que pueda culminar con éxito esta etapa de aprendizaje.

Resumen

La presente tesis de maestría contiene el desarrollo de una investigación que permite determinar el grado de mejora futuro en la movilidad de una zona de alta congestión vehicular para cualquier ciudad, a través de la medición de la variación del nivel de servicio en las vías urbanas comparando al escenario base con un escenario hipotético en donde hay una implantación de un sistema de cobro por congestión para autos particulares, como medida para desestimular el uso del auto, reducir los flujos vehiculares en las vías en las horas pico y aumentar así los índices de movilidad.

La investigación aporta una metodología para determinar la variación del nivel de servicio a partir de la velocidad de circulación de los vehículos en las vías urbanas de una zona congestionada ante la implantación de una tarifa de cobro por congestión. Para ello, se utilizó como herramienta el software de macromodelación PTV Visum 14, por medio del cual se realizó simulaciones tanto para el escenario base como para el escenario hipotético de cobro, con el cual se obtiene las velocidades en cada uno de los segmentos de vías de la zona en estudio. El nivel de servicio se determinó, utilizando los procedimientos de análisis recomendados por el Manual de Capacidad Vial Americano HCM – 2000, en su referente a las vías urbanas.

La metodología de investigación, se aplicó para la zona céntrica de la ciudad de Medellín, en donde a partir del análisis e insumos de información secundaria fue posible definir un escenario hipotético de cobro por congestión que se comparó con un escenario base. Los resultados obtenidos indicaron para el escenario hipotético de cobro un 15% de aumento de la velocidad media de circulación en las vías internas y una disminución del 5% de la velocidad media para las vías del anillo circundante (libre de cobro); en cuanto al nivel de servicio de las vías, en la zona interna aproximadamente 2,5 Km (14%) de vías mejoran el nivel de servicio pasando de un nivel de servicio menos favorable a uno más favorable, pese a esta variación, el 40% de vías (7,4 Km) continúan en niveles de servicio desfavorables (D, E y F). Por otro lado, se evaluó el tiempo de viaje en la red para los dos escenarios, obteniéndose que el tiempo medio de recorrido por cada auto en las vías internas se reduce de 3,00 minutos/Km en el escenario base a 2,54 minutos/Km en el escenario con cobro; para toda la red interna y todos los autos se tiene una reducción del 41%, pasando de 5.471,23 a 3.217,87 horas de viaje, lo que en beneficios sociales representados en ahorro del tiempo para todos los usuarios viajantes significa un ahorro de aproximadamente 67,8 Millones de pesos diarios que equivale aproximadamente 16.360 Millones de pesos al año; en cambio para el anillo vial circundante se tiene que los tiempos de viaje totales del anillo se incrementan en un 6%, pasando de 6.741,40 a 7.175,19 horas. El estudio también permitió identificar que el alto grado de congestión de la zona centro de Medellín no sólo es causa del uso del auto

particular, sino de otros modos motorizados como las motos, el taxi, y los buses; además, de la invasión de vías y espacios públicos por el comercio informal, por parqueos indebidos y zonas de acopio que reducen la capacidad de las vías. Todos estos resultados permitieron concluir que el escenario de cobro por congestión en la forma como fue evaluado sería una medida que proporciona buenos resultados para mejorar la movilidad del centro de la ciudad de Medellín, pudiendo llegar a obtener mejores resultados con algunos cambios y medidas adicionales como incluir también una tarifa para restringir el uso exagerado de las motos, implementar la reorganización y modernización del transporte público colectivo, mejorar la gestión y control del tránsito mediante políticas de uso y racionalización del espacio público y aparcamientos; políticas de promoción del transporte no motorizado, entre otras.

Palabras clave: Transporte Urbano, Movilidad, Congestión Vehicular, Cobro por Congestión, Peaje Urbano, Nivel de servicio.

Abstract

This master's thesis contains the development of a research to determine the level of future improvement in the mobility of a high vehicular congestion zone for some city, by measuring the variation in the level of service in comparing urban roads the base with a hypothetical scenario where there is an implementation of a congestion charging system for private cars, as a measure to discourage car use, reduce traffic flows on roads during peak hours and increase mobility rates scenario.

The research provides a methodology to determine the variation in the level of service from the speed of vehicles on urban roads in a congested area before the implementation of a congestion charge fee. To this, it was used as tool software macro-model PTV Visum 14, whereby simulations for both the baseline and for the hypothetical scenario collection was performed, which speeds is obtained in each of the segments of roads of the study area. The service level was determined using the analysis procedures recommended by the American Highway Capacity Manual HCM - 2000, as regards urban roads.

The research methodology was applied to the central area of the city of Medellin, where from analysis of secondary information and input was possible to define a hypothetical scenario that congestion charging was compared to a baseline scenario. The results showed for the hypothetical scenario of charging 15% increase in the average velocity at the domestic level and a decrease of 5% of the average speed of the surrounding ring roads (free of charge); in the level of service roads in the inner area about 2,5 km (14%) of roads improve the level of service from a level of service less favorable to one more favorable, despite this variation, 40 % of roads (7,4 km) are still in unfavorable operating levels (D, E and F). On the other hand, was assessed travel time on the network for the

two scenarios, obtaining the average travel time for each car at the domestic level is reduced to 3,00 minutes/Km in the baseline scenario to 2,54 minutes/Km on stage with collection; for the entire internal network and all cars have a reduction of 41% from 5471,23 to 3217,87 hours of travel, which represented in social benefits in time savings for all travelers it means users save approximately 67,8 million pesos per day or approximately 16360 million pesos a year; in exchange for the surrounding ring road must be total travel time of the ring is increased by 6%, from 6741,40 to 7175,19 hours. The study also identified that the high level of congestion in the downtown area of Medellin is not only because of the use of the private car, but in other ways as motorized bikes, taxis, and buses; Furthermore, the invasion of roads and public spaces for informal trade, for improper parking and storage areas that reduce the ability of the tracks. These results concluded that the scenario of congestion charging in the form as assessed would be a measure that gives good results for improving the mobility of downtown Medellin, but could do better with some additional changes and measures as also include a fee to restrict the excessive use of motorcycles, implement the reorganization and modernization of public transport, improve traffic management and control through use policies and rationalization of public space and parking; policies to promote non-motorized transport, among others.

Keywords: Urban Transport, Congestion Charge, Urban mobility, road pricing, level of service.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	VII
Abstract	VIII
Lista de figuras	XII
Lista de tablas	XIII
Lista de gráficas.....	XIV
Lista de símbolos y abreviaturas.....	XV
1. Introducción.....	17
2. Justificación, antecedentes, hipótesis y objetivos de la investigación.....	19
2.1 Justificación.....	19
2.2 Antecedentes.....	20
2.3 Hipótesis de la investigación.....	21
2.4 Objetivos	21
2.4.1 Objetivo general	21
2.4.2 Objetivos específicos.....	22
2.5 Alcances del trabajo	22
2.6 Metodología.....	23
3. Revisión del estado del arte	25
3.1 Sistemas de cobro por congestión.....	25
3.2 Determinación del nivel de servicio.....	27
4. Marco teórico.....	29
4.1 Conceptualización, historia y funcionamiento de los sistemas de cobro por congestión	29
4.1.1 Cobros por congestión.....	29
4.1.2 Historia de los cobros por congestión (peajes urbanos).....	29
4.1.3 Razones de las tarifas de cobro a la circulación vehicular	31
4.1.4 Formas de controlar la congestión mediante la utilización de tarifas.....	32
4.1.5 Principios básicos de las tarifas de cobro por congestión	33
4.1.6 Factores favorables para implementación de tarifas por congestión.....	34
4.1.7 Efectos de los sistemas de cobro en la movilidad de las ciudades	35
4.1.7.1 Reducción tráfico entrante	35

4.1.7.2 Efectos sobre la congestión	35
4.1.7.3 Cambios en las pautas de movilidad	36
4.1.8 Sistemas de cobro por congestión fallidos	36
4.2 Capacidad vial y nivel de servicio.....	37
4.2.1 Capacidad vial	37
4.2.2 Nivel de servicio.....	38
4.2.3 Factores que afectan a los niveles de servicio	38
4.2.4 Capacidad y nivel de servicio en carreteras según el TRB.....	39
4.2.5 Nivel de servicio en vías urbanas según el TRB	42
5. Zona de estudio	47
5.1 Análisis de la movilidad en el centro de Medellín	51
5.2 Determinación de la zona de estudio	52
5.3 Diagnóstico de la zona de estudio.....	54
5.3.1 Uso de suelo y equipamiento	55
5.3.2 Vías	56
5.3.3 Sistemas de transporte	57
5.3.4 Volúmenes de tráfico vehicular	59
5.3.5 Parqueos	62
5.3.6 Zonas de cargue y descargue.....	65
5.3.7 Paraderos y acopios	65
6. Modelación del transporte en los diferentes escenarios	67
6.1 Funciones y características del software PTV- Visum	67
6.2 Creación del modelo de red en PTV Visum.....	68
6.2.1 Oferta vial	70
6.2.2 Matrices de demanda.....	73
6.3 Modelación del transporte en el escenario base	81
6.3.1 Asignación del transporte en la situación actual.....	81
6.3.2 Calibración del modelo de asignación de transporte en la situación actual	83
6.4 Modelación del transporte en el escenario base sin pico y placa	90
6.4.1 Resultados de la simulación escenario sin pico y placa	91
6.4.2 Determinación del nivel de servicio de las vías – escenario sin pico y placa.....	93
6.5 Escenario de cobro por congestión para autos particulares	109
6.5.1 Disminución de la demanda por el sistema de cobro por congestión	112
6.5.2 Restricciones en la oferta vial por el sistema de cobro por congestión.....	116
6.5.3 Simulación del escenario de cobro por congestión	120
6.5.4 Determinación nivel de servicio de las vías – escenario cobro por congestión...	121
7. Evaluación de resultados.....	130
7.1 Evaluación de la velocidad de viaje.....	130
7.2 Evaluación del tiempo total de viaje en la red.....	132
7.3 Evaluación de la variación del nivel de servicio.....	135
7.4 Evaluación mayor demanda del METRO	140
8. Conclusiones y recomendaciones	142
Glosario.....	145
Referencias bibliográficas.....	147

Lista de figuras

	Pág.
Figura 4-1. Ejemplos típicos de vías urbanas según la categoría de diseño	43
Figura 5-1. Zona del centro de Medellín definida para el estudio	54
Figura 5-2. Formato visita de campo recolección de información	55
Figura 5-3. Caracterización vías en la zona de estudio – ancho de calzada y número de carriles	57
Figura 5-4. Caracterización vías en la zona de estudio – sentidos viales	58
Figura 5-5. Influencia de rutas de TPC en la zona de estudio	59
Figura 5-6. Estaciones de aforo	62
Figura 5-7. Reducción capacidad de las vías urbanas en el centro de Medellín.....	63
Figura 5-8. Localización vías urbanas afectadas con reducción de capacidad en el centro de Medellín	64
Figura 5-9. Sitios de acopio y paraderos.....	66
Figura 6-1. Interfaz de usuario PTV Visum 14.....	70
Figura 6-2. Red en Visum de la zona de estudio.....	72
Figura 6-3. Red en Visum con carriles de vías ajustados.....	73
Figura 6-4. Zonas ZIT agregadas - vistas en el software Visum.....	79
Figura 6-5. Zona de aplicación medida pico y placa Medellín - año 2014.....	90
Figura 6-6. Velocidades en las vías – escenario sin pico y placa	92
Figura 6-7. Árbol de decisión para determinar el nivel de servicio de las vías urbanas con base a la velocidad de viaje	94
Figura 6-8. Nivel de servicio característico del corredor.....	109
Figura 6-9. Probabilidad demanda usuarios que pagan tarifa cobro por congestión – modelo general	111
Figura 6-10. Probabilidad demanda usuarios que pagan tarifa cobro por congestión – modelo estratificado.....	112
Figura 6-11. Zonas ZIT en donde se restringe la circulación de auto particular por cobro por congestión	115
Figura 6-12. Arcos acceso a la zona de cobro por congestión	118
Figura 6-13. Mapa velocidades de viaje en las vías con escenario de cobro por congestión	121
Figura 6-14. Nivel de servicio característico de las vías por corredor.....	129
Figura 7-1. Nivel de servicio característico de las vías por corredor.....	140

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 4-1. Objetivos de los principales cobros a la circulación en zonas urbanas	32
Tabla 4-2. Efectos de los sistemas de cobro sobre el tráfico entrante	35
Tabla 4-3. Efectos de los sistemas de cobro sobre la congestión.....	35
Tabla 4-4. Medidas de eficacia principales para la definición de nivel de servicio	41
Tabla 4-5. Determinación de categorías funcionales y de diseño	44
Tabla 4-6. Clasificación vías urbanas basado en la combinación de categorías funcionales y de diseño	45
Tabla 4-7. Nivel de servicio por clase de vía urbana	45
Tabla 5-1. Viajes diarios realizados en auto particular en el AMVA	49
Tabla 6-1. Identificación de sentidos viales en las principales vías de la zona de estudio	70
Tabla 6-2. Agregación de zonas de transporte para el estudio de viajes origen destino en la zona de estudio	74
Tabla 6-3. Zonas ZIT centro	79
Tabla 6-4. Autos Directos Equivalentes (ADEs) que componen la demanda de la red Visum para la asignación de transporte.....	80
Tabla 6-5. Factores para convertir ADEs.....	80
Tabla 6-6. Función volumen demora utilizadas de TPD.....	85
Tabla 6-7. Función volumen demora utilizadas de CMR.....	85
Tabla 6-8. Resultados cálculo estadístico GEH.....	87
Tabla 6-9. Comparativo velocidades del modelo Vs velocidades medidas en campo.....	88
Tabla 6-10. Determinación del nivel de servicio por cada segmento de arco.....	95
Tabla 6-11. Nivel de servicio en las vías por corredor	102
Tabla 6-12. Determinación de la impedancia equivalente al costo de la tarifa de cobro por congestión - expresada en longitud de vía	119
Tabla 6-13. Nivel de servicio de las vías bajo sistema de cobro por congestión	122
Tabla 7-1. Comparación velocidad media de viaje	130
Tabla 7-2. Comparación tiempo total de viaje en red.....	132
Tabla 7-3. Evaluación beneficio económico con ahorro de tiempo por SCC.....	135
Tabla 7-4. Variación del nivel de servicio en las vías.....	136
Tabla 7-5. Comparación del nivel de servicio por corredor	138

Lista de gráficas

	Pág.
Gráfica 5-1. Reparto modal viajes diarios en la ciudad de Medellín	47
Gráfica 5-2. Motivos de viaje en la ciudad de Medellín.....	48
Gráfica 5-3. Tiempos promedio de desplazamiento en los diferentes modos.....	48
Gráfica 5-4. Viajes en auto particular	50
Gráfica 5-5. Distribución horaria de viajes realizados en auto particular en la ciudad de Medellín	50
Gráfica 5-6. Viajes diarios con influencia en el centro de Medellín	51
Gráfica 5-7. Motivos de viaje centro de Medellín.....	52
Gráfica 5-8. Composición vehicular HMD.....	60
Gráfica 5-9. Volúmenes de vehículos por hora en el centro de la ciudad	61
Gráfica 6-1. Calibración modelo de asignación	86
Gráfica 6-2. Correlación comparativo velocidades	89
Gráfica 6-3. Nivel de servicio de las vías escenario sin pico y placa	101
Gráfica 6-4. Distribución de la demanda de viajes del auto particular con tarifa de SCC igual 4.000 pesos.....	114
Gráfica 6-5. Caracterización por grupos de estratos a los usuarios que viajan en auto a la zona de estudio.....	115
Gráfica 6-6. Nivel de servicio de las vías escenario cobro por congestión	128
Gráfica 7-1. Variación del nivel de servicio en las vías internas de la zona de cobro por congestión	137
Gráfica 7-2. Variación del nivel de servicio en las vías del anillo de la zona de cobro por congestión	138

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolos

Símbolo	Significado	Símbolo	Significado
A	Área	s	Segundos
ADEs - Km	Autos directos equivalentes por cada kilómetro de vía	s/pt	Segundos/peatón
CO₂	Dióxido de carbono.	T	Tiempo
D	Diámetro	V	Velocidad
L	Longitud	Veh	Vehículos
ΔL	Incremento de distancia o longitud	veh-h	Vehículos/hora
Km	Kilómetro	v/C	Volumen/Capacidad
Km/h	Kilómetro/hora	v/h	Volumen/hora
Km²	Kilómetro cuadrado	V_o	Velocidad a flujo libre
m²/pt	Metro cuadrado/peatón	Vr_t	Valor del tiempo

Abreviaturas

Abreviatura Término

ADE	Auto directo equivalente.
AMVA	Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
BPR	<i>Bureau of Public Roads</i> (Oficina de vías públicas)
CEPAL	Comisión Económica Para América Latina y el Caribe.
CMR	Consortio de Movilidad Regional.
Coord.	Coordinador
D.C.	Distrito Capital.
EOD	Encuesta Origen Destino.
EODH	Encuesta Origen Destino de Hogares.
etc.	Etcétera.
Fcc	Factor de restricción por sistema de cobro por congestión
FFS	<i>Free-Flow Speed</i> (velocidad a flujo libre)
HCM	<i>Highway Capacity Manual</i> (Manual de capacidad vial).
HMD	Hora de máxima demanda.
IDU	Instituto de desarrollo urbano

INVIAS	Instituto Nacional de Vías.
n.d.	No date (sin fecha).
OD	Origen - destino
p.	Página.
PND	Plan Nacional de Desarrollo.
PrT	Transporte privado.
PuT	Transporte público.
SCC	Sistema de Cobro por Congestión
SITVA	Sistema Integrado del Transporte del Valle de Aburrá.
SMM	Secretaría de Movilidad de Medellín (antes Secretaría de Transportes y Tránsito de Medellín).
STTM	Secretaría de Transportes y Tránsito de Medellín.
Tarifa cc	Tarifa de cobro por congestión
TPC	Transporte Público Colectivo.
TRB	Transportation Research Board (Consejo de Investigación del Transporte).
ZAT	Zona de Análisis de Transporte
ZER	Zonas de Estacionamiento Regulado.
ZIT	Zona Integrada de Transporte

1. Introducción

Las principales ciudades del mundo enfrentan en la congestión de tránsito uno de sus mayores problemas para su funcionamiento y desarrollo; cada vez es más difícil desplazarse de un sitio a otro para cumplir con los objetivos de trabajo, estudio, compras, recreación, diligencias, etc. (Bull, 2003). En Colombia, las grandes capitales como Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Cartagena, entre otras, sufren diariamente los problemas de la congestión, que a su vez, aumenta la contaminación, el ruido y los altos índices de accidentalidad, que se han visto agravados desde inicios del siglo XXI con el alto crecimiento del parque automotor, cuyas tasas promedio según el análisis hecho en Colombia por la revista Dinero (2014) para los años 2010 y 2020 se espera que esté alrededor del 7,9%. Si bien es cierto que se han adoptado medidas de restricción para mejorar la movilidad tales como el pico y placa que funciona en la mayoría de capitales Colombianas desde 1998 cuando inició en Bogotá, los resultados sólo han sido satisfactorios en el corto plazo (Sarmiento, Mejía González & Ospina, 2005); la medida como fue contemplada desde un principio “de carácter temporal” no es suficiente y en el largo plazo no funciona, ya que además del crecimiento del parque automotor, ya comentado, algunos hogares de alto ingreso han optado por adquirir más de un vehículo para poder circular alternando cada día con un auto. En el Área Metropolitana del Valle de Aburra por ejemplo, se ha estimado que para los años 2005 – 2015 los autos particulares crecerán anualmente alrededor del 6% (Área Metropolitana del Valle de Aburrá [AMVA], 2009). Los últimos estudios de la Encuesta Origen Destino del año 2012 muestran que aproximadamente 820.000 viajes diarios se realizan en auto particular en la región Metropolitana y de estos en la ciudad de Medellín cerca de 630.000, de los cuales 31% circulan en las horas pico de la mañana y la tarde (AMVA, 2012). La efectividad de la medida del pico y placa se diluye aún más ante la política del gobierno local de exonerar ciertos vehículos, por ejemplo, los que usan gas como combustible, llegando estos últimos a ser cerca de un 10% del parque automotor particular (Secretaría de Movilidad de Medellín [SMM], 2012). De este modo, si cada día hay una restricción del 40% de los vehículos (4 placas diarias), pero 10% están exentos, la restricción real es del 36%. Por otro lado, como el 20% del tráfico de livianos son vehículos comerciales e institucionales, tales como vehículos escolares, fúnebres, oficiales, etc., los cuales están exentos en su mayoría, la restricción real es de cerca del 30%. De modo que si la motorización crece 6% anual, este aumento absorbe en menos de 5 años el efecto benéfico de la restricción, obligando cada cuatro años a reevaluar la medida. Así por ejemplo la medida implementada inicialmente en marzo de 2005, fue aumentada al doble del número de placas por día en agosto del 2008. Entre el año 2012 y 2013 se ha tratado de moderar la medida reduciendo el área y horario de restricción.

Es por esto que se hace necesario estudiar otras medidas que permitan desestimular el uso del auto particular y que ayuden a mejorar la movilidad sin restringir demasiado las

libertades para la movilización como lo hace el pico y placa. En algunas ciudades del mundo como Singapur, Londres y Estocolmo, después de varios años de estudios e investigaciones, se implementaron sistemas de cobro por congestión para mejorar la movilidad en áreas altamente congestionadas, obteniéndose buenos resultados. Tomando como referencia estas experiencias internacionales, es posible pensar en la implementación de un sistema de cobro por congestión en ciudades Colombianas; para ello es necesario estudiar y analizar los impactos que traería consigo en el tránsito vehicular en las vías de las zonas afectadas por la medida.

De esta forma, la presente investigación busca determinar el grado de mejoramiento de la circulación vehicular en una zona congestionada donde se implemente una tarifa de cobro por congestión para autos particulares. Para ello, se puede evaluar el comportamiento de diferentes parámetros relacionados con la congestión; en este caso se desea medir y evaluar el nivel de servicio de las vías antes y después de la implementación de la medida. Para aplicación de la metodología que se pretende desarrollar, se tomará una zona altamente congestionada de la ciudad de Medellín en la cual se creará y simulará un escenario hipotético de cobro por congestión.

El presente documento describe paso a paso la investigación desarrollada; y para ello se ha estructurado de la siguiente manera: después de esta introducción, se presenta el capítulo 2, con la justificación, antecedentes, hipótesis, objetivos, alcances y explicación de la metodología de la presente investigación. En el capítulo 3 se presenta la revisión del estado del arte de los temas relacionados con el estudio. El capítulo 4 contiene el marco teórico, en donde se define conceptos sobre sistemas de cobro por congestión y nivel de servicio de las vías; además, se amplía conocimientos acerca de los sistemas de cobro por congestión. En el capítulo 5, se presenta el análisis y la determinación de la zona de estudio para la investigación. El 6° capítulo contiene todo lo referente a la definición de escenarios y la respectiva modelación del transporte; mediante las simulaciones en Visum, se calculan las velocidades de las vías y con ellas los respectivos niveles de servicio, definiendo previamente la metodología en base al HCM – 2000. En el capítulo 7, se muestra la evaluación detallada de los resultados obtenidos en la simulación de los escenarios comparados, para los parámetros de velocidad media, tiempos de recorrido y niveles de servicio. En el capítulo 8 se presentan las conclusiones y recomendaciones, y por último se termina con dos capítulos donde se muestra un Glosario y las Referencias bibliográficas utilizadas en la presente investigación.

2. Justificación, antecedentes, hipótesis y objetivos de la investigación

2.1 Justificación

Mejorar la movilidad en las ciudades genera bienestar social, el cual se ve reflejado cuando se reducen los índices de accidentalidad, las emisiones de CO₂, los altos niveles de ruido, los tiempos de viaje, en fin, cuando se obtienen beneficios que permiten el desarrollo armónico de las ciudades junto con el desarrollo particular del individuo, mejorando así su salud, sus relaciones interpersonales y la mejor distribución y optimización del recurso tiempo.

Salas (2009) Manifiesta que para disminuir los costos externos causados por la congestión de las ciudades se puede recurrir a las siguientes soluciones:

- Dejar de hacer viajes, impracticable a largo plazo.
- Incrementar el índice de ocupación de los autos.
- Realizar un traspaso a otros modos.
- Aplicar medidas restrictivas por el uso exclusivo de la infraestructura por ejemplo “pico y placa”.
- Implantar restricciones de tipo económico (cobro de una tarifa).
- Aplicar una combinación entre restricción y tarificación (p. 130)

Los cobros por congestión son una alternativa que ha sido exitosa en otras ciudades del mundo; en Singapur, por ejemplo, la reducción de autos en la zona de cobro fue de alrededor del 50%; en Londres y Estocolmo del 21% y 22%, respectivamente, y los cambios en la movilidad se manifestaron en el aumento de la velocidad media, con un 50% - 100% para Singapur; reducción del tiempo de viaje del 26% para Londres, y en Estocolmo la longitud de colas disminuyó en un 50% (Pozueta, 2008). El estudio de los sistemas de cobro por congestión debe involucrar el análisis de todos los aspectos en un contexto específico, característico del lugar donde se desea implementar. Impactos en el tráfico, estudios de demanda, zonas de restricción, horarios, tarifas, sistema de cobro, usuarios exentos, aceptación social, estado de la infraestructura vial, accesos y vías periféricas, desarrollo económico, nivel de ingresos, son sólo algunos temas que deben ser abordados para determinar la viabilidad de estos sistemas.

Uno de los principales indicadores de movilidad es el nivel de servicio de las vías e intersecciones de las ciudades. El nivel de servicio utiliza medidas cualitativas que caracterizan las condiciones operacionales dentro de un flujo de tráfico y que pueden ser percibidas por los conductores y pasajeros con su grado de satisfacción al utilizar la vía (Transportation Research Board [TRB], 2000). El nivel de servicio se puede medir cuantificando y calificando el tiempo de retraso de la circulación vehicular, o también por medio de la cuantificación y análisis de la velocidad de circulación de los vehículos. En los dos casos, las variables están relacionadas con otros parámetros como el tiempo de viaje, longitud de vía, características de la vía, seguridad vial, el tráfico y sus interrupciones, libertad de maniobra, entre otras.

Al conocer el nivel de servicio se puede determinar el grado de congestión que tiene una vía y en su conjunto calificar la movilidad de la zona y /o ciudad. Por medio de este estudio se busca establecer una metodología que permita identificar cuánto mejoraría la movilidad en una zona altamente congestionada a partir de la estimación y evaluación del nivel de servicio de las vías si se llegase a implementar un sistema de cobro por congestión.

2.2 Antecedentes

Las entidades y administraciones públicas responsables del transporte y la movilidad en las ciudades se enfrentan a uno de los mayores problemas: descongestionar las vías, facilitar los desplazamientos con tiempos de viajes acordes a las distancias y características de la zona urbana.

El gobierno nacional y territorial en su afán de encontrar mecanismos que permitan regular, gestionar y obtener un transporte más sostenible en las ciudades, en los últimos tiempos viene sentando las bases legales y jurídicas mediante actos administrativos como leyes, decretos, resoluciones, planes, etc., que permitirán en un futuro cercano implementar los cobros por congestión como medida para mejorar la movilidad de las ciudades desestimando el uso del auto particular. Es así como en el orden nacional, por ejemplo la ley 1450 de 2011 en su artículo 90 manifiesta: *“Los municipios o distritos mayores a 300.000 habitantes, podrán establecer tasas por uso de áreas de alta congestión, de alta contaminación, o de infraestructura construida para evitar congestión urbana. El Gobierno Nacional reglamentará los criterios para determinar dichas áreas”*. De la misma forma los Planes de Desarrollo Nacional 2010- 2014 y ahora el 2014 – 2018 *“Todos Por un Nuevo País”*, plasmaron artículos que definen alcances para la creación e implementación de los sistemas de cobro por congestión. En el orden local, se tiene por ejemplo que el nuevo Plan de Ordenamiento Territorial de Medellín *“Una ciudad para la gente, una ciudad para la VIDA”*, se contempla un cambio de paradigmas en cuanto a la movilidad de la ciudad, en donde el vehículo deja de estar en la cima de la pirámide pasando al peldaño más bajo y se lugar se encumbra el peatón.

A partir del año 1975 donde se implantó por primera vez un sistema de cobro por congestión en Singapur, muchas ciudades empiezan a mirar desde otro punto de vista esta medida. Después de la puesta en marcha del sistema de cobro por congestión en Londres en el año 2003, el cual permitió reducir la congestión en el centro de la ciudad en casi un 30% (Guzmán, 2008), el tema está presente en los diferentes debates sobre transporte y movilidad urbana. A pesar de esto, el tema es aún nuevo y hay poca información disponible. Por otra parte es importante tener en cuenta que el tema amerita un estudio profundo y detallado para cada zona en particular, es decir no es suficiente conocer el sistema o modelo de aplicación de una ciudad “x” para aplicarse en la ciudad objeto de estudio.

Las experiencias internacionales muestran claramente que en todas las ciudades del mundo donde hoy funciona este sistema se realizaron estudios e investigaciones previas por decenas de años. Se estudiaron y analizaron todo tipo de impactos que se podrían generar, mecanismos de funcionamiento, socialización, mejoramiento de sistemas de transporte, etc. Conocedores de esto, la presente investigación no pretende ser definitiva y suficiente para que un sistema tan complejo como este sea viabilizado en una zona congestionada de una ciudad en este caso de Medellín; pero sin lugar a dudas será una parte fundamental para que otras investigaciones complementen y partan de los resultados permitiendo profundizar en este tema tanto en esta misma ciudad como en otras del territorio nacional.

2.3 Hipótesis de la investigación

Es posible establecer una metodología que permita evaluar el grado de mejora de la movilidad en una zona altamente congestionada de una ciudad, mediante la comparación del nivel de servicio de las vías calculado a partir de la velocidad de viaje de los vehículos en un escenario base y un escenario hipotético con tarifa de cobro por congestión.

En Medellín, si se llegase a implementar un sistema de cobro por congestión para autos particulares en el centro de la ciudad como remplazo de la actual medida de restricción vehicular del pico y placa, se logrará mejorar los índices de movilidad determinados mediante la variación del nivel de servicio de las vías, en una proporción ideal que permita mejorar significativamente la movilidad de la zona congestionada.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo general

Determinar la variación del nivel de servicio de las vías urbanas en una zona altamente congestionada, ante la implantación de un sistema de cobro por congestión como alternativa para mejorar la movilidad.

2.4.2 Objetivos específicos

- Analizar distintas metodologías para estimar niveles de servicio y establecer la más adecuada para evaluar la movilidad en un área vial urbana.
- Calcular el nivel de servicio de las vías de una zona altamente congestionada.
- Evaluar los cambios en la movilidad de una zona altamente congestionada si se aplicase una medida de cobro por congestión.

2.5 Alcances del trabajo

Esta investigación se fundamentó de información secundaria obtenida de estudios realizados por la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, como la Encuesta Origen Destino para Hogares realizada en el AMVA en el año 2012 y de los resultados del estudio exploratorio en esta ciudad, y en donde el objetivo principal era la modelación de la demanda de usuarios, o el modo de transporte al que se cambiarían en los periodos pico de la mañana y de la tarde, bajo supuestas condiciones de funcionamiento de un sistema de cobro por congestión, el cual se aplicaría para autos particulares donde actualmente funciona la medida del pico y placa. Los alcances de la presente investigación son los siguientes:

- Se estableció una metodología para conocer la variación del nivel de servicio de las vías de una zona afectada por una tarifa de cobro por congestión.
- Se realizó la modelación de la oferta vial de la zona de estudio afectada por una hipotética tarifa de cobro por congestión para autos particulares. El modelo de tipo estático se calibró con aforos existentes, realizados en la zona de influencia por otros estudios; y con los resultados globales del modelo de elección discreta obtenido en el “Estudio de *viabilización para la implementación del sistema de cobro por congestión de la ciudad de Medellín Fase I*”. La tarifa de cobro por congestión con la cual se realiza las simulaciones, se estimó de tal forma que la restricción en la circulación de los vehículos particulares, no sean menor en teoría a la cantidad de vehículos que salen de circulación con la actual medida del pico y placa.
- Determinación y evaluación del nivel de servicio de las vías de la zona de congestión seleccionada. El nivel de servicio de las vías, antes y después del escenario de cobro por congestión se determinó a partir de la velocidad en el tramo de vía obtenida mediante la modelación con el software Visum, a partir de la velocidad se asignó el nivel de servicio correspondiente en cada vía de acuerdo a los parámetros establecidos por las metodologías existentes.
- A partir de la evaluación del nivel de servicio de las vías, se determinó el nivel de servicio característico para el corredor vial, de tal forma, que fácilmente se pueda especificar e identificar el comportamiento y los efectos ocasionados en el tránsito vehicular. Se realizó el análisis antes y después del escenario de cobro por

congestión en la zona de estudio. Lo anterior permite comprobar si con este tipo de medidas, es posible mejorar la movilidad de las zonas donde hoy es difícil desplazarse en las horas pico.

- Además de los anteriores, con el presente trabajo se alcanzaron otros resultados importantes como un diagnóstico de la movilidad actual de una zona en la ciudad de Medellín donde se realizó la aplicación del estudio.

2.6 Metodología

Para alcanzar los objetivos propuestos dentro de esta investigación, se planteó la metodología descrita en los siguientes pasos:

✓ **Revisión bibliográfica**

Con la ayuda de fuentes bibliográficas constituida por investigaciones, reuniones científicas, y diversos estudios monográficos dedicados al tema en revistas especializadas, fue posible identificar y analizar aspectos importantes de los efectos causados en la movilidad de las ciudades donde se ha aplicado un sistema de cobro por congestión y a su vez utilizarlos como referencia que permitan identificar aspectos y consideraciones importantes para estudiar y analizar en la presente investigación.

✓ **Determinación de la zona de estudio**

A partir de estudios de movilidad en la ciudad de Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá como: los de la Encuesta Origen Destino, investigaciones y publicaciones de entidades oficiales y privadas, se pudo analizar las condiciones actuales de la movilidad en la ciudad y determinar una zona que presente altos niveles de congestión en la cual sería factible pensar en la implementación de una tarifa de cobro por congestión.

✓ **Construcción de la red vial en el software de modelación (PTV-Visum)**

Consistió en introducir en el software la red vial con todas las características y condiciones de oferta y demanda del transporte para la zona de estudio definida en el punto anterior. Se calibró el modelo y posteriormente se realizó las simulaciones para cada uno de los escenarios propuestos.

✓ **Metodología para determinar el nivel de servicio en un área vial**

Basado en metodologías existentes para niveles de servicio en vías urbanas, se analizó y construyó una metodología para determinar el nivel de servicio de cada una de las vías de la zona de estudio.

✓ **Cálculo del nivel de servicio de las vías congestionadas en el escenario base**

Se calculó el nivel de servicio de las vías de la zona de estudio para el escenario base de comparación, para ello se utilizó los resultados de las velocidades obtenidas en la simulación en el software Visum y por medio de una hoja en Excel se obtuvo el nivel de servicio correspondiente de acuerdo a la metodología indicada por el HCM -2000

✓ **Escenario de cobro por congestión**

Consistió en crear y asignar una tarifa de cobro a la zona de congestión definida anteriormente, para ello se tomó los resultados del “Estudio de Viabilización para la implementación del sistema de cobro por congestión de la ciudad de Medellín – Fase I”, realizado por la Universidad Nacional de Colombia para el municipio de Medellín y que permitió obtener un modelo de la probabilidad de la demanda para el sistema de cobro por congestión. El modelo permite restringir la circulación de autos particulares con la variación de la tarifa (Secretaría de Movilidad de Medellín [SMM], 2013). Este escenario se simuló en el software Visum.

✓ **Cálculo del nivel de servicio futuro de las vías congestionadas**

Con los resultados de la simulación del escenario de cobro por congestión, se utilizó la información de las velocidades en cada segmento de vía y a partir de estas, utilizando la misma metodología que en el caso del escenario base de comparación, se determinó el nuevo nivel de servicio para las vías.

✓ **Evaluación de los resultados**

Por último se evaluó el nivel de servicio de las vías para los dos escenarios comparados, identificando la variación y analizando su comportamiento. Además de esto, se realizó una evaluación de otros parámetros como el tiempo de viaje y la velocidad de circulación que permitieron profundizar las conclusiones sobre el comportamiento de la movilidad ante la posible implementación de una medida de cobro por congestión en una zona congestionada.

3. Revisión del estado del arte

3.1 Sistemas de cobro por congestión

Con la revisión del estado del arte se observó que el tema viene siendo estudiado desde hace muchos años, son diversos los estudios que enmarcan los problemas de movilidad en las ciudades y que pretenden ser resueltos a partir de sistemas de cobro por congestión. Robusté y Sarmiento (1999) presentaron un estudio de la experiencia internacional hasta mediados de los años 90. Pozueta (2008) realizó un estudio sobre la experiencia internacional en peajes urbanos hasta mediados de la primera década del siglo XXI, dando a conocer los aspectos, métodos de funcionamiento y efectos que se han originado en las ciudades donde se implementaron los sistemas de cobro por congestión. Este último estudio incluye un capítulo de análisis sobre los cambios en el tráfico y la movilidad de las zonas afectadas por esta clase de medida, el resultado indica que los efectos son significativos pero muy diferentes en cada una de las ciudades analizadas.

Guzmán, De la Hoz y Pfaffenbichler (2008) hicieron un análisis de impactos que tendría la implementación de una tarifa por congestión o contaminación en la ciudad de Madrid, siendo el objetivo principal estimar a medio y largo plazo el impacto sobre la movilidad y la contaminación en la ciudad. El estudio se hizo con métodos y modelos de transporte dinámicos, utilizando como herramienta el software Vensim. En dicho estudio se estimaron parámetros con una tarifa de peaje óptima y se hicieron simulaciones para varios escenarios. Como resultado se obtuvo que la reducción de la emisiones de CO₂ y la distribución modal del uso del auto privado en el centro de Madrid serán del orden del 34% y 10%, respectivamente, y que la implementación de un peaje urbano puede llegar a disminuir en cerca de un 18% la cantidad de viajes que tengan como destino el centro de Madrid.

En Puerto Rico, Rodríguez (2008) realizó un estudio para el Área Metropolitana de San Juan de Puerto Rico. Este autor analizó los sistemas de cobro por congestión implantados en Estocolmo, Londres y Singapur, y esquemas propuestos para New York y Auckland. El estudio indicó además, algunas lecciones para una posible aplicación de una tarifa por congestión en el área Metropolitana de San Juan, y específicamente presentó como caso ilustrativo una zona de tarifación en la isleta de San Juan, mencionando los factores más importantes que deben ser considerados en la implantación de la tarifa por congestión.

En la ciudad de New York se han realizado varios estudios pero casi todos enfocados a estudiar el comportamiento de la demanda ante los sistemas de tarificación vial. Holguín-Veras, Wang, Xu, y Ozbay (2010) realizaron un estudio con el objeto de mirar el comportamiento de los usuarios de auto ante la variación del precio en la tarificación vial de New York, Nueva Jersey y lugares cercanos. En el estudio se realizaron encuestas telefónicas a los usuarios regulares y anteriores usuarios del sistema vial y después de analizarse se obtuvieron importantes resultados tales como la identificación de la poca flexibilidad para el cambio de viajes relacionados con el trabajo. También se encontró que los cambios más comunes de comportamiento de los usuarios son: cambio de modo, el uso de otras vías, cambios en el tiempo de realización de los viajes, cambios en el tipo de pago, cambio de ocupación del auto y reducción de viajes. En promedio se encontraron 3,23 diferentes cambios de comportamiento por usuario.

En Medellín, la Universidad Nacional de Colombia realizó un primer estudio para determinar el número de usuarios dispuestos a pagar un peaje urbano combinado con pico y placa, el cual funcionaría de forma simultánea con la medida del pico y placa; esta investigación se realizó mediante la técnica de preferencias declaradas aplicada a una pequeña muestra de aproximadamente 100 usuarios de auto particular. Como resultado se obtuvo un modelo que indicó que sólo el 4% estarían dispuestos a pagar la tarifa del peaje para evitar la restricción del pico y placa el día que tengan dicha medida (Álvarez, 2009). Dos años más tarde, González-Calderón, Posada y Sánchez-Díaz (2011) adelantaron un estudio en la ciudad de Medellín para mirar la necesidad de implementar un peaje por congestión desde una perspectiva económica. El estudio buscó encontrar la tasa de congestión que maximice el bienestar social bajo el sistema de un peaje urbano hipotético en la ciudad; para ello se realizó un análisis costo-beneficio con información de otras investigaciones y encuestas realizadas en las zonas de Laureles y El Poblado, posteriormente se obtuvieron curvas de demanda y oferta, y a partir de estas, se hizo la estimación del excedente social, el excedente del consumidor y el bienestar obtenido de la política hipotética. Finalmente el estudio recomienda la implementación del peaje por congestión en la ciudad, después de encontrarse que el beneficio neto de la implantación de la medida es positivo.

En el año 2012, la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín realizó el estudio *“Estudio de Viabilización para la implementación del sistema de cobro por congestión de la ciudad de Medellín – Fase I”*, para la Secretaria de Movilidad de Medellín. Dicho estudio se realizó mediante modelos de elección discreta, utilizando la técnica de encuestas de preferencias declaradas y preferencias reveladas para los usuarios de auto particular caracterizados mediante la encuesta origen – destino 2012, y en donde el objetivo principal fue determinar la posible demanda de usuarios ante un sistema de cobro por congestión en las horas pico de la mañana y de la tarde, como medida remplazante al pico y placa en las zonas de mayor congestión como el Centro, Poblado, Laureles y Belén. Como resultado del estudio, se obtuvo un modelo general y un modelo estratificado que permite conocer el comportamiento del usuario del auto particular ante la variación de la tarifa de cobro por congestión; dicho comportamiento se ve reflejado en las probabilidades de la demanda de usuarios que: pagarían la tarifa, saldrían antes o después de la hora de aplicación o emigrarían a otros modos de transporte como el taxi o Metro.

Son muchos los centros de investigación y universidades del mundo que vienen adelantando estudios e investigaciones sobre el tema de sistemas de cobro por congestión, sin embargo, en Colombia es un tema aún nuevo, no hay evidencia que se hayan realizado estudios a profundidad que permitan estimar los impactos que ocasionaría un sistema de cobro por congestión para la movilidad de una ciudad y mucho menos a partir de la evaluación del nivel de servicio de las vías; es por esto que al llevar a cabo este estudio se realizará un gran aporte al establecerse una metodología que permita evaluar previamente el grado de afectación en la movilidad en zonas donde se desee implementar tarifas de cobro por congestión.

3.2 Determinación del nivel de servicio

Existen varios métodos para determinar el nivel de servicio en carreteras; para dos carriles, multicarril y autopistas. Sin embargo, para el caso de vías urbanas los casos son más limitados a mediciones de velocidad en campo o calculadas con algún software y demoras en intersecciones calculadas o medidas directamente. A continuación se describen algunos estudios realizados en carreteras y vías urbanas.

Romana (1994), realizó un estudio en España que permitió establecer un método que consistió en toma de datos de tráfico en carreteras mediante la utilización de técnicas de video, pistolas de radar y programas de cómputo en periodos de tiempo específicos. Se analiza la intensidad del tráfico, velocidad media y distribución de velocidades, adelantamientos producidos y velocidades de recorrido de los vehículos que intervienen en los adelantamientos. A partir de estos datos y siguiendo varios criterios, se determina el valor del intervalo crítico de 4 segundos (un vehículo que circula con un intervalo menor se considera demorado), para utilizarlo en la determinación de los niveles de servicio. Finalmente los niveles de servicio se evalúan con los parámetros de porcentaje de vehículos demorados y velocidad media temporal; El método permite la caracterización del nivel de servicio en una carretera a partir de mediciones simples durante cuatro períodos del orden de 15 minutos a lo largo de dos horas.

En Guatemala Ordóñez (2009), realizó un estudio para aplicación del manual de capacidad de carreteras (HCM) versión 2000 en vías multicarril; para ello clasificó el tránsito de un tramo de vía haciendo un conteo visual (vehículos livianos, buses y camiones), teniendo en cuenta el día de mayor incidencia o flujo vehicular, se determinó el factor direccional, el tránsito estandarizado y se ajusta al tipo de terreno. Posteriormente se utiliza el factor de equivalencia para buses y camiones y se calcula la capacidad y el índice de congestión por sentido. Para la determinación de la velocidad de los vehículos se utilizó un radar. Con los anteriores parámetros se determina el nivel de servicio del tramo de vía.

Galárraga, Herz y Albreiu (2005), realizaron un estudio en Argentina para determinar la capacidad y nivel de servicio en calles urbanas mediante una mejora en la estimación de los coeficientes cálculo de tal forma que representen adecuadamente las condiciones locales. Para la toma de datos se emplearon filmaciones tomadas desde el centro de

control del tránsito de la municipalidad de Córdoba – Argentina y mediciones específicas en campo. Se emplearon modelos de simulación de tránsito con software como el NETSIM (TSIS) y SIDRA para analizar la validez de las modificaciones propuestas. El trabajo se realizó tanto para intersecciones semaforizadas como para no semaforizadas incluyendo glorietas.

Belda (2011), realizó otro estudio en España denominado “Modelización de los niveles de servicio en autopistas en tiempo presente para la gestión dinámica del tráfico”, el cual estuvo basado en la hipótesis fundamental de que los niveles de servicio definidos en el Manual de Capacidad (HCM 2000), no se consideran adecuados para la gestión dinámica del tráfico por dos razones fundamentales: a) la metodología es totalmente estática y está orientada al dimensionamiento de las redes viarias y b) que entre algunos niveles de servicio no existen variaciones significativas en las condiciones de circulación. En el desarrollo del trabajo se distinguen dos fases. La primera consiste en una fase de reducción de datos y en la segunda fase se lleva a cabo la propuesta y análisis de diferentes métodos para la obtención del cálculo de nivel de servicio tales como: 1. Obtención del nivel de servicio basado en HCM dinámico definido en el Manual de Capacidad. En este método se utiliza para el cálculo los valores de intensidad y porcentaje de vehículos pesados medidos en los equipos de obtención de datos de tráfico. 2. Metodología analítico-práctica de obtención del nivel de servicio basado en HCM dinámico. En este método se considera la definición de la velocidad libre obtenida a partir de la velocidad media geométrica para aquellos intervalos en los que los valores de intensidad por sección de medida son inferiores a 400 veh/h. 3. Metodología analítico-práctica de obtención del nivel de servicio basado en la matriz velocidad-ocupación. Esta nueva propuesta se fundamenta sobre una de las tres curvas fundamentales de Ingeniería de Tráfico, la que relaciona la velocidad media y el porcentaje de tiempo de ocupación, medidas a través de los equipos de obtención de datos de tráfico. Además, mediante un análisis, basado en la teoría de conglomerados se ha confirmado la hipótesis de trabajo del método 3. El estudio permitió obtener una caracterización más ajustada de los niveles de servicio. Esta caracterización puede contribuir al mejoramiento de la gestión del tráfico, mediante la toma de decisiones en tiempo presente para la activación de las medidas de gestión.

En Manizales Naranjo (2008), realizó un estudio de análisis de la capacidad y nivel de servicio de las vías principales y secundarias de acceso a la ciudad a partir de los lineamientos sugeridos en el “Manual de Capacidad y Niveles de Servicio para carreteras de dos carriles” segunda versión (1996) del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) de Colombia, y en el “Highway Capacity Manual 2000” (HCM 2000) del “Transportation Research Board” (TRB) de los Estados Unidos. En el estudio se utiliza información de las estaciones de conteo proporcionados por las cartillas publicadas anualmente por el INVIAS, datos recolectados por mediciones en campo. Como resultado principal del estudio se obtuvo una comparación de las dos metodologías para tener un panorama más amplio en cuanto a lo que representan las características de las vías típicas nacionales en un contexto internacional.

4. Marco teórico

4.1 Conceptualización, historia y funcionamiento de los sistemas de cobro por congestión

4.1.1 Cobros por congestión

Los sistemas de cobro por congestión están asociados con teorías económicas; funcionan aplicando una tarifa de cobro a determinados conductores por circular con su vehículo en una zona específica y en cierto periodo de tiempo con el fin de reducir altos índices de congestión vehicular que previamente se presentan en dicha zona. En situación de congestión los usuarios del auto no son conscientes del costo social que generan a otros usuarios del transporte cuando ocasionan una reducción de velocidad y por ende aumentan el tiempo de viaje, entre otros efectos; para superar esto, debe haber un mecanismo en donde cada conductor perciba este costo y a la vez pague por el hecho de imponer costos a otros usuarios (Medina, 2001). Este tipo de medidas hacen parte de una política de movilidad de una ciudad, que generalmente vienen acompañadas de forma simultánea por otras medidas, como por ejemplo, del desarrollo del transporte no motorizado y promoción del transporte público.

4.1.2 Historia de los cobros por congestión (peajes urbanos)

Se ha encontrado referencias históricas sobre estos cobros que van desde la edad media donde eran cobrados para la travesía de caminos, puentes que atravesaban o pertenecían a señoríos laicos o eclesiásticos. En los siglos XIV y XV, según lo manifestado por Molina (1999) *“los monarcas europeos empezaron a planificar las rutas y a tomar medidas para el arreglo y conservación de los caminos; para ello establecieron tributos especiales, los peajes, y encargaron la redacción de proyectos de mejora de las rutas más importantes”* (p. 113).

El concepto moderno de peaje en una zona urbana, aparece por primera vez en los Estados Unidos en el año 1920, de la mano del economista Arthur Cecil Pigou y posteriormente ampliado por Frank Knight en 1924. En los años 60 y 70 del siglo pasado, el economista William Vickrey profundiza el trabajo adelantado por Pigou y Knight, convirtiéndose en el principal defensor de la tarifa por congestión (Wachs & May, 2005).

Pero fue después de la segunda guerra mundial cuando aparece la primera propuesta concreta sobre cobro por congestión. En estos tiempos, el desarrollo económico que prosiguió una vez terminó las contiendas, elevó el crecimiento de la propiedad de los

vehículos privados y con ello la congestión de las ciudades comienza a tornarse como un problema serio. Como consecuencia de esto aparecen planteamientos contrarios a la aplicación de un sistema de cobro global y en favor de un sistema que afecte a determinadas vías y en horarios de congestión pico (Muñoz, 2012).

En los años 60, y al mismo tiempo que en estados Unidos, Europa debate sobre la posibilidad de establecer peajes urbanos, en Inglaterra el ministerio de transporte produce un informe sobre peajes urbanos y sus posibilidades técnicas y económicas. El informe contenía importantes recomendaciones, que después se convirtieron en la base de las concepciones actuales. En 1974 el Greater London Council realiza un estudio denominado Supplementary Licensing, donde se contempla el establecimiento de un cordón, dentro del Inner Ring Road, a cuya entrada se cobrarían 5 libras esterlinas (en su equivalente de 2003), el triple para camiones, entre las 7 y las 19h, y que estima los gastos de funcionamiento en un 15% de los ingresos, la reducción del tráfico entrante en un 45% y el incremento de la velocidad en un 40%. (Pozueta, 2008, p.10).

Y no fue precisamente en una ciudad de Inglaterra, ni mucho menos de Europa o Norteamérica donde se implementó por primera vez un sistema de cobro congestión. En 1975 en Singapur se pone en funcionamiento el peaje urbano de Singapur, el cual funcionaba de forma manual con la compra de los tickets en las entradas de la ciudad y la verificación y vigilancia mediante agentes.

La primer ciudad de Europa en implementar un peaje urbano fue Bergen, en Noruega en 1986. Este peaje buscó obtener fondos para financiar la construcción de una red de carreteras que evite el paso por el centro de la ciudad.

En 1989, Roma implementa una tarifa de cobro en el centro histórico de la ciudad dirigido al tráfico de no residentes.

Entre los años 1992 y 1993 se crearon tres nuevos peajes urbanos en las ciudades Noruegas de: Oslo, Trondheim y Kristiansand, los cuales tenían objetivos similares al de Bergen.

En el año 2003, en Londres, se inaugura el *Congestion Charging Scheme*¹.

En Estocolmo y después de aprobarse un referéndum en el año 2006, se implementa el peaje urbano. Este tuvo como principal objetivo reducir la congestión.

¹ *Las Tarifas de congestión de Londres, son un peaje urbano que funciona como tasa que se aplica a determinados conductores que circulan en la zona central de Londres. La capital Británica es la ciudad más grande del mundo que ha implantado este modelo. La compañía encargada de recaudar el peaje es la empresa pública Transportes de Londres. La tasa se introdujo el 17 de febrero de 2003. En un principio se estableció un peaje de 5 libras, que fue aumentado el 4 de julio de 2005 a 8 libras. La tasa diaria debe ser pagada por el dueño de un vehículo que entra, sale o se desplaza por la zona delimitada desde las 7 de la mañana a las 6 de la tarde. No pagar la tasa supone una multa de 50 libras. El 19 de febrero de 2007 se amplió la zona delimitada hacia el oeste.*

La aplicación de tarifas de cobro por congestión también se ha implantado en autopistas urbanas. Entre los años 2004 y 2005, en Santiago de Chile se implantó un sistema de cobro electrónico de peaje en la autopista Central y la autopista Costanera Norte con tecnología que permite controlar automáticamente todos los ingresos a la autopista y cobrar por la distancia recorrida.

En 2007 la ciudad de Dubái, en los Emiratos Árabes Unidos, implantó un sistema de peajes en autopistas urbanas denominado Salik.

4.1.3 Razones de las tarifas de cobro a la circulación vehicular

Diferentes estudios realizados por investigadores del tema, permiten identificar las principales razones por las cuales justifica una tarifa de cobro a la circulación vehicular en ámbitos urbanos. Muñoz (2012) relaciona las siguientes razones:

- En primer lugar, se puede considerar que la aplicación de la tarifa o peaje urbano queda justificada, siempre que la obtención de recursos financieros permita, o bien una mejora y/o ampliación de carreteras en las proximidades del entorno urbano, o bien esté orientada hacia la mejora del transporte urbano, por lo que, en este sentido, parece que dichos recursos revierten nuevamente al conjunto de la población afectada en forma de beneficios sociales.
- En segundo lugar, el peaje urbano se constituye como la tarifa que recae sobre el usuario con el objetivo de internalizar los costes externos o externalidades que genera por la utilización del vehículo privado sobre dicho ámbito urbano, lo que justifica la necesidad de imponer una tarifa, la cual, bajo la concepción del denominado impuesto pigouviano², sirva para compensar o corregir las externalidades negativas que cada individuo genera a la sociedad.
- Por último, hay que destacar que, las limitaciones que tradicionalmente ha ofrecido la utilización de políticas basadas en un crecimiento de la oferta de infraestructuras, unidas a los discretos resultados que la aplicación de los usuales instrumentos de gestión de tráfico sobre una solución aceptable al problema de la congestión en las grandes ciudades, sirven de argumento determinante para justificar la implantación de un sistema de peaje urbano, hecho que ha quedado avalado por los resultados

² Los impuestos pigouvianos son un tipo de impuesto que busca corregir una externalidad negativa. Este impuesto es llamado impuesto pigouviano, en honor del economista británico Arthur Pigou. Este impuesto no genera una pérdida en la eficiencia de los mercados, dado que internaliza los costos de la externalidad a los productores o consumidores, en vez de modificarlos. Muchos países han adoptado estos impuestos como forma de solucionar los denominados fallos de mercados, como por ejemplo la contaminación (ecotasas), o productos dañinos como el tabaco.

³ *Carpooling*: Viaje que se realiza compartiendo el coche, consiste en que las personas compartan su auto con otras que realizan viajes periódicos y en trayectos puntuales. Su objetivo es disminuir la congestión en

positivos que ofrecen las actuales experiencias que aplican estos sistemas de gestión de tráfico. (p. 201-202)

En la Tabla 4-1 se presenta un resumen de los objetivos o razones por las cuales se crearon los principales cobros existentes en zonas urbanas.

Tabla 4-1. Objetivos de los principales cobros a la circulación en zonas urbanas

Ciudad	Año implementación	Área (Km ²)	Objetivo
<i>Cobros anticongestión</i>			
Singapur	1975	7,2	Reducir la congestión
Roma	1989	8,8	Reducir el tráfico en el centro histórico para evitar su deterioro.
Durham	2002	--	Reducir el tráfico en la calle de la Catedral.
Londres	2003	22	Reducir la congestión Mejorar el transporte público en autobús Mejorar la fiabilidad para los usuarios de automóviles Hacer más eficiente la distribución de mercancías y servicios
Estocolmo	2006	50	Reducir la congestión. Mejorar la accesibilidad Mejorar el medio ambiente.
<i>Cobros para generación de recursos para la construcción de carreteras</i>			
Bergen	1986	35	Obtener fondos para completar la red de carreteras, por un periodo de 15 años.
Oslo	1990	31	Financiar la construcción de 50 proyectos de infraestructura viaria (80% de los beneficios) y de transporte público (20%), por un período de 16 años.
Trondheim	1991	18	Financiar la construcción de un cinturón viario en torno al centro. Mejorar el viario interno para peatones y ciclistas. Dar prioridad al transporte público.

Fuente: Pozueta (2008)

4.1.4 Formas de controlar la congestión mediante la utilización de tarifas

La forma de controlar la congestión mediante el uso de tarifas tiene varias formas. Las ciudades que las implementaron, las establecieron mediante alguna de las siguientes maneras:

- Cordón o anillo alrededor de una zona: Se establece un anillo o cordón alrededor de la zona congestionada. Se cobra una tarifa para entrar y/o salir de la zona, por lo general la tarifa varía de acuerdo a la hora en que se circule. La tarifa también puede variar dependiendo de la zona por donde se pretenda entrar.
- Un área de cargo: Existe un cargo por entrar y salir de la zona. Además, se cobra por transitar dentro de ella, es decir que si una persona realiza un viaje con origen y destino dentro de la misma zona, debe pagar una tarifa aunque no haya salido de la zona.
- Tarifa variable en una cierta vía: La tarificación de una vía permite incentivar a realizar viajes fuera de la hora pico por dicha vía, además, de permitir recaudar recursos importantes.
- Cargo según la distancia recorrida: En este caso se cobra la tarifa en base a la distancia recorrida dentro del área de restricción.

4.1.5 Principios básicos de las tarifas de cobro por congestión

William Vickrey, es considerado como el padre de los principios básicos sobre la formación de las tarifas por congestión. A partir de sus propuestas se consolidaron los más importantes principios para la implantación de una tarifa de cobro por congestión. Muñoz (2012) relaciona los siguientes principios:

- La tarifa debe reflejar, de la forma más razonable posible, el coste marginal del impacto que cada usuario genera en su desplazamiento sobre los demás.
- La tarifa debe variar de acuerdo a la existencia de horas punta de tráfico.
- Una tarifa eficiente, no debe ser obtenida única y exclusivamente de acuerdo al tiempo empleado en el desplazamiento individual, sino en función de los impactos que genera sobre el tráfico dicho desplazamiento desde su inicio hasta su finalización.
- La eficiencia del sistema puede ser mejorada mediante un adecuado tratamiento y recogida de datos, de forma que la tarifa se pueda aplicar sobre distintos segmentos de trayecto, en lugar de aplicarse, tan sólo y exclusivamente, por su entrada a la infraestructura.
- El establecimiento de un tarifa ex post, en términos objetivos de su impacto real sobre el tráfico, debe considerarse en función del comportamiento o balance del tráfico a lo largo del día, más que en función de los horarios establecidos de antemano.
- Todos los vehículos deben someterse al pago de la tarifa sin excepción alguna.

- Los taxis presentan problemas para el cobro de la tarifa, debido a la determinación y recurrencia del desplazamiento, por lo que debería ser cargada al cliente en función del recorrido.
- Los vehículos de reparto y similares deberían tener un tratamiento especial, en función de la distancia recorrida.
- La injerencia política y la mala gestión burocrática suponen un peligro para el funcionamiento eficiente del sistema.

4.1.6 Factores favorables para implementación de tarifas por congestión

Las experiencias internacionales muestran que en las ciudades donde se implantó esta medida, se debieron realizar diversos estudios por varias décadas. Es importante resaltar los factores más importantes que favorecieron la implementación de las tarifas por congestión y su éxito como medida para reducir la congestión. Rodríguez (2008) después de su estudio en los diferentes peajes urbanos determinó los siguientes factores:

- Antes de que se implantara la tarifa se determinó que el ingreso generado se destinaría al transporte público colectivo. Este hecho hizo más aceptable la medida y disminuyó la posibilidad de crear problemas de desigualdad social.
- No se presentó la tasa de congestión como una estrategia aislada sino como parte de un conjunto de estrategias. Paralelo al nuevo cargo se expandió el transporte público colectivo, se introdujo medidas de precios en los estacionamientos y se promovió el uso de la bicicleta.
- El descuento a los residentes aplacó la resistencia a la medida.
- Se suministró varios métodos de pago.
- Una sola entidad, estuvo encargada del desarrollo de la propuesta, la implementación y la operación.
- Uso efectivo de los medios de comunicación.
- La congestión vehicular un problema serio de la ciudad.
- Proyecciones muestran que la población de la región crecerá significativamente.
- La tecnología utilizada creó un modelo flexible de cobro.
- La designación de rutas alternas a la zona del cobro.
- Antes de la implantación del cobro se expandió el sistema de transporte público colectivo.
- Un gobierno fuerte que establece sus estrategias sin mucha oposición.
- Un esquema extremadamente flexible que puede ser modificado cada cierto tiempo.
- La selección de la zona de cargo tomó en consideración de proveer rutas de escape para los conductores que no quisieran pasar por el área (p. 59 - 60).

Además de las anteriores, fue fundamental el éxito de la medida en la ciudad de Singapur, en donde el efecto sobre la congestión urbana presentó al mundo los resultados que toda ciudad desearía obtener para mejorar la movilidad.

4.1.7 Efectos de los sistemas de cobro en la movilidad de las ciudades

La existencia de sistemas de cobro por cualquiera de los motivos antes mencionados causó grandes efectos en la movilidad de las ciudades donde se implementó. Entre Los principales efectos en la movilidad están:

4.1.7.1 Reducción tráfico entrante

Las experiencias internacionales indican los efectos que causó la implantación de un sistema de cobro por congestión en las ciudades del mundo donde se crearon y actualmente funcionan. En la Tabla 4-2, se indica los porcentajes de reducción del tráfico entrante a las zonas de congestión donde se aplicó la medida.

Tabla 4-2. Efectos de los sistemas de cobro sobre el tráfico entrante

Ciudad	Fecha de la medida	% de reducción
Singapur	1992/1975	50
Roma	2003/2000	15-20
Londres	2005/2000	21
Bergen	1987/1986	6-7
Oslo	1991/1990	3-4
Trondheim	1992/1991	10
Estocolmo	2006/20006	22

Fuente: Pozueta (2008)

4.1.7.2 Efectos sobre la congestión

En las ciudades donde funcionan cobros por congestión se midieron los efectos sobre la congestión, para ello se utilizaron los parámetros de velocidad media, tiempo de viaje y retrasos. En la Tabla 4-3, se indican los resultados de la variación de estas variables.

Tabla 4-3. Efectos de los sistemas de cobro sobre la congestión

Ciudad	Fecha de la medida	% de variación	Forma de medida
Singapur	1976/1975	+(50-100)	Velocidad media
Roma	2001/20002	+ 4	Velocidad media
Londres	2005/2002	- 26	Tiempo de viaje
Bergen	2002/1984	- (40-100)	Retrasos
Oslo	2000-1990	Sin variación	Retrasos
Estocolmo	Enero-Marzo 2006	-50	Longitud de colas

Fuente: Pozueta (2008)

4.1.7.3 Cambios en las pautas de movilidad

Los peajes urbanos causan efectos en los hábitos de movilidad. Según las experiencias internacionales, estos sistemas han ocasionado los siguientes cambios:

- Cambio de medio de transporte: paso al transporte público, a los modos no motorizados o algún sistema de compartir viaje (“carpooling”³).
- Cambio de horario para evitar el pago de tarifas.
- Cambio en el itinerario para evitar el peaje.
- Renuncia al desplazamiento y sustitución del destino por otro fuera del ámbito del peaje. (Pozueta, 2008, p. 35).

4.1.8 Sistemas de cobro por congestión fallidos

Son muchas las ciudades en el mundo que han adelantado estudios de factibilidad para la implantación de sistemas de cobro por congestión como medida para reducir los índices de congestión, contaminación o para financiar infraestructura vial de las mismas ciudades. Casi todos los estudios mostraron excelentes resultados; Sin embargo, la implantación no se llevó a cabo debido a diversos factores. A continuación se relacionan algunas de las ciudades donde no ha sido posible implantar la medida.

- En Hong Kong, en 1985 y después de más de dos años de estudios en donde se realiza una prueba piloto de tarifas de congestión cobradas electrónicamente y con muy buenos resultados, se cancela la implantación del sistema tras el rechazo de las juntas de distrito, órganos del gobierno a quien se consultó el proyecto.

³ *Carpooling: Viaje que se realiza compartiendo el coche, consiste en que las personas compartan su auto con otras que realizan viajes periódicos y en trayectos puntuales. Su objetivo es disminuir la congestión en las calles con la disminución de vehículos en las vías transportando una sola persona, además, facilita los viajes a las personas que no tienen auto y hay una notable disminución de las emisiones de CO₂.*

- En 2005, en Edimburgo capital de Escocia se somete la medida de cobro por congestión a un referéndum, su resultado fue un rechazo por el 74,4%. Los estudios para su implementación habían iniciado desde el año 2002.
- En New York se habían hecho estudios para implantar un esquema de tarifas de congestión para la zona de Manhattan, en 2007 la legislatura del Estado archiva la propuesta. En el año 2008 se vuelve abrir la posibilidad de instaurar un esquema de tarifas por congestión, la propuesta es aprobada por el consejo de la ciudad pero al ser consultada por el poder legislativo del Estado, la propuesta fue rechazada nuevamente, actualmente el plan se encuentra archivado.
- En 2007 en el condado metropolitano de Gran Manchester se propone un sistema de cobro por congestión, se somete la propuesta a un plebiscito el 12 de diciembre del 2008 y es rechazada por la amplia mayoría.
- En la ciudad de San Francisco, California, en el año 2006 se realizan estudios para evaluar la factibilidad de implantar tarifas de congestión para resolver los problemas de congestión de tránsito que sufre su centro urbano. En diciembre de 2008 los distintos escenarios considerados en el estudio movilidad y acceso de San Francisco fueron presentados a consulta ciudadana por medio de reuniones públicas, por una gran mayoría se rechazó la medida.

4.2 Capacidad vial y nivel de servicio

4.2.1 Capacidad vial

Se entiende por capacidad vial al máximo número de vehículos que puede transitar por un punto o tramo uniforme de una vía en el total de sentidos que ésta posea, en un periodo determinado de tiempo y en las condiciones imperantes de la vía y el tránsito.

El cálculo de la capacidad de una vía y del nivel de servicio, ofrece algunas diferencias dependiendo de la metodología empleada y del tipo de vía pero parten de condiciones similares. Por ejemplo: tanto el método Colombiano del INVIAS, como el método del Consejo de Investigaciones del Transporte de los Estados Unidos (TRB por su sigla en inglés *Transportation Research Board*) para una vía de dos carriles parten de una capacidad ideal de la misma (3200 automóviles por hora en ambos sentidos), la cual se ve reducida al ser multiplicada por varios factores de corrección que representan la medida aproximada en que la vía real se aleja de las condiciones ideales. El producto de multiplicar la capacidad ideal de la vía por los diferentes factores de corrección representa la capacidad para las condiciones específicas de la vía en vehículos de todas las clases por hora. Los factores de corrección son ajustados a las condiciones típicas de las características de las vías y quizá es esto lo que hacen que los métodos difieran entre sí.

Bajo condiciones ideales del tránsito y de la vía, las carreteras multicarriles tienen una capacidad de 2000 automóviles o vehículos livianos por carril por hora. En carreteras de dos carriles, por otra parte, se alcanzan capacidades de 2800 automóviles por hora en

ambos sentidos de la circulación. Las condiciones ideales se alcanzan con flujos ininterrumpidos, sin interferencia lateral de vehículos o peatones, sin mezcla de vehículos pesados en la corriente del tránsito, con carriles normales de 3,6 metros de anchos, bermas con ancho apropiado, altas velocidades de diseño y carencia de restricciones en la distancia de visibilidad de adelantamiento o rebase.

4.2.2 Nivel de servicio

El nivel de servicio es una medida cualitativa que describe las condiciones de operación de un flujo vehicular. Estas condiciones se describen en términos de factores tales como la velocidad y el tiempo recorrido, la libertad de realizar maniobras, la comodidad, la conveniencia y la seguridad vial (Gigena, 2008).

Según Valencia (2000), el nivel de servicio de una vía indica la calidad del servicio que ésta presta a los usuarios; el grado de satisfacción o contrariedad que experimenta el conductor al pasar por la vía. El nivel de servicio mide el grado de movilidad con su parámetro principal la velocidad media de recorrido y mide la proximidad a la congestión determinado con el factor de utilización de la capacidad (volumen de demanda dividido entre la capacidad de la vía).

El concepto de nivel de servicio se utiliza para evaluar la calidad del flujo. Es “una medida cualitativa que descubre las condiciones de operación de un flujo de vehículos y/o personas, y de su percepción por los conductores o pasajeros”. Estas condiciones se describen en términos de factores como la velocidad y el tiempo de recorrido, la libertad de maniobra, las interrupciones a la circulación, la comodidad, las conveniencias y la seguridad vial.

4.2.3 Factores que afectan a los niveles de servicio

Condiciones No ideales

Existen condiciones ideales o estándar como buen clima, buen estado de pavimento de la vía, usuarios “racionales” y la inexistencia de incidentes que dificulten el flujo normal; las cuales cuando no se dan afectan los niveles de servicio.

Cerquera (2007), relaciona las siguientes condiciones ideales para infraestructuras de flujo ininterrumpido y que pueden afectar los niveles de servicio en las vías.

- Repartición del tránsito por igual en ambos sentidos
- Carriles de no menos de 3,65 m
- Una distancia (bermas) de 1,8 m entre el borde de la calzada exterior y los obstáculos u objetos adyacentes a la vía o separador.

- Velocidad de proyecto de 100 Km/h para vías de 2 carriles y de 110 Km/h para vías multicarril y autopista.
- Flujo constituido únicamente por vehículos ligeros. Ausencia de vehículos pesados.
- Superficie de rodadura en condiciones óptimas
- Visibilidad adecuada para adelantar
- Señalización horizontal y vertical óptima.
- Terreno llano y rasante horizontal

Cuando el análisis de las condiciones existentes difiere de las condiciones ideales (la mayoría de los casos), se debe incluir correcciones para que reflejen las condiciones prevalecientes.

Condiciones de la infraestructura

Los siguientes parámetros influyen en las características de la vía y pueden afectar los niveles de servicio:

- El tipo de vía y el medio urbanístico en que está inmersa.
- La anchura de carril.
- El ancho de las bermas y los despejes laterales.
- La velocidad de proyecto.
- El alineamiento horizontal y el alineamiento vertical.
- La disponibilidad de espacio para esperar en cola en las intersecciones.

Condiciones del tránsito

El tipo de vehículo y las distribuciones de los vehículos entre carriles influyen en los niveles de servicio. En el primer caso, tiene que ver con la distribución vehicular que circula sobre la vía y están clasificados en vehículos livianos (automóviles) y vehículos pesados (camiones y buses); en el segundo caso, se tiene en cuenta el reparto por sentidos de circulación, fundamental en las vías de dos carriles y en donde la condición ideal se produce cuando la distribución es 50/50 (50% en cada sentido).

Condiciones de control

En vías para circulación continuas el control y normas que afectan significativamente los niveles de servicio, como la justificación de estacionar las restricciones para el rebase, la prohibición de giros, los sentidos de circulación permitidos, entre otras.

4.2.4 Capacidad y nivel de servicio en carreteras según el TRB

Para cada tipo de infraestructura El HCM - 2000 determinó 6 niveles de servicio clasificándolos con las letras de la “A” a la “F”; donde el nivel de servicio “A” representa las mejores condiciones operativas y el nivel de servicio “F” las peores.

Para un flujo vehicular en condiciones ininterrumpidas, las condiciones de operación de los 6 niveles de servicio mencionadas son las siguientes:

Nivel de Servicio A

Representa una circulación a flujo libre. Los usuarios, considerados en forma individual, están virtualmente exentos de los efectos de la presencia de otros en la circulación. Poseen una altísima libertad para seleccionar sus velocidades deseadas y maniobrar dentro del tránsito. El nivel general de comodidad y conveniencia proporcionado por la circulación al motorista, pasajero o peatón, es excelente.

Nivel de Servicio B

Está dentro del rango del flujo estable, aunque se empiezan a observar otros vehículos integrantes de la circulación. La libertad de selección de las velocidades deseadas, sigue relativamente inafectada, aunque disminuye un poco la libertad de maniobra en relación con la del nivel de servicio A. El nivel de comodidad y conveniencia es algo inferior a los del nivel de servicio A, porque la presencia de otros comienza a influir en el comportamiento individual de cada uno.

Nivel de Servicio C

Pertenece al rango del flujo estable, pero marca el comienzo del dominio en el que la operación de los usuarios individuales se ve afectada de forma significativa por las interacciones con los otros usuarios. La selección de velocidad se ve afectada por la presencia de otros, y la libertad de maniobra comienza a ser restringida. El nivel de comodidad y conveniencia desciende notablemente.

Nivel de Servicio D

Representa una circulación de densidad elevada, aunque estable. La velocidad y libertad de maniobra quedan seriamente restringidas, y el conductor o peatón experimenta un nivel general de comodidad y conveniencia bajo. Los pequeños incrementos del flujo generalmente ocasionan problemas de funcionamiento.

Nivel de Servicio E

El funcionamiento está dentro o cerca del límite de su capacidad. La velocidad de todos se ve reducida a un valor bajo. La libertad de maniobra para circular es extremadamente difícil, y se consigue forzando a un vehículo o peatón a “ceder el paso”. Los niveles de comodidad y conveniencia son enormemente bajos, siendo muy elevada la frustración de los conductores o peatones. La circulación es normalmente inestable, debido a que los pequeños aumentos del flujo o ligeras perturbaciones del tránsito producen colapsos.

Nivel de Servicio F

Representa condiciones de flujo forzado. Esta situación se produce cuando la cantidad de tránsito que se acerca a un punto o calzada, excede la cantidad que puede pasar por él. En estos lugares se forman colas, donde la operación se caracteriza por la existencia de ondas de parada y arranque, extremadamente inestables.

El volumen de tránsito al que se puede dar servicio en las condiciones de parada y arranque del nivel de servicio F son inferiores que en las condiciones del nivel de servicio E; en consecuencia según los estudios, el flujo de servicio E es el valor que normalmente corresponde a la capacidad de la infraestructura.

Para cada tipo de infraestructura los niveles de servicio están definidos en base a uno o más parámetros operativos denominados como indicadores de eficacia. En la Tabla 4-4, se indican las medidas de eficacia primarias utilizadas en cada tipo de infraestructura.

Tabla 4-4. Medidas de eficacia principales para la definición de nivel de servicio

Tipo de estructura	Medida de eficacia
Autopistas	Densidad (v/C) Demora en veh-h Velocidad (Km/h) Tiempo de viaje (s)
Segmentos básicos de autopista	Densidad (v/C) Velocidad (Km/h) Relación (v/C)
Áreas de trazado ó entrecruzamiento	Densidad (v/C) Velocidad de no entrecruzamiento (Km/h) Velocidad de entrecruzamiento (Km/h)
Intersecciones con un ramal	Flujos (veh/h)
Carreteras multicarril	Densidad (v/h) Velocidad media de recorrido (Km/h) Relación (v/C)
Carreteras de dos carriles (HCM – 2000)	Demora en tiempo de seguimiento (porcentaje) Velocidad media de recorrido (Km/h)
Carreteras de dos carriles (MÉTODO COLOMBIANO)	Velocidad media de recorrido (Km/h)
Intersecciones reguladas con semáforos	Demora total media por control (s/v) Relación v/C
Intersecciones sin semáforos	Demora total media por control (s/v) Longitud de cola (No. Veh.) Relación v/C
Arterias	Velocidad de viaje (Km/h) Tiempos de recorrido (s)

Tipo de estructura	Medida de eficacia
	Demora por control en intersecciones (s)
Peatones	Espaciamiento (m ² /pt) Demora peatón (s/pt) Velocidad media (Km) Relación (v/C)

Fuente: Capacidad y niveles de servicio de la infraestructura vial (Cerquera, 2007)

4.2.5 Nivel de servicio en vías urbanas según el TRB

La determinación del nivel de servicio en vías urbanas conlleva una metodología especial, desarrollada y expresada en los capítulos 10 y 15 del HCM - 2000. De acuerdo a lo expresado en estos dos capítulos, el nivel de servicio en una vía urbana puede determinarse mediante dos métodos diferentes; el primero con la medición y análisis de la velocidad media de operación de los vehículos en el segmento de vía, y el segundo a través de las demoras de tiempo que sufre un vehículo y determinadas en las intersecciones de la vía.

En la presente investigación se trabajó con el primer caso, por cuanto desde su inicio la investigación se planteó realizar utilizando información de demanda del transporte recolectada en la Encuesta Origen Destino que se realizó en el año 2011 – 2012. A partir de los resultados de la encuesta, realizar la asignación de viajes por el software de macromodelación Visum, el cual permite conocer las velocidades en los segmentos de vías configurados en la red, y a partir de ellas de forma directa y con la metodología propuesta, calcular el nivel de servicio. La metodología para determinar el nivel de servicio por el método de las demoras de tiempo, indicada por el HCM – 2000 requiere contar con dichas demoras en cada una de las intersecciones y no en los segmentos de vía como los resultados entregados por el Software Visum, por tanto la información no es suficiente y se requiere de un proceso adicional de micromodelación con otro tipo de software. Esto último hace que la metodología para determinar la variación del nivel de servicio deje de ser abreviada, entendible y sencilla, tal y como se buscó desde un principio y se puede conseguir con la metodología de la medición de la velocidad media de los segmentos de vía.

Para determinar el nivel de servicio por medio de la velocidad media de operación del vehículo se requiere además conocer la velocidad a flujo libre (V_o), o también conocida como FFS por las palabras en inglés *Free-Flow Speed*. Tanto la velocidad de operación como la velocidad a flujo libre pueden ser determinadas mediante mediciones en campo o mediante la modelación de la oferta y la demanda del transporte con un software especializado.

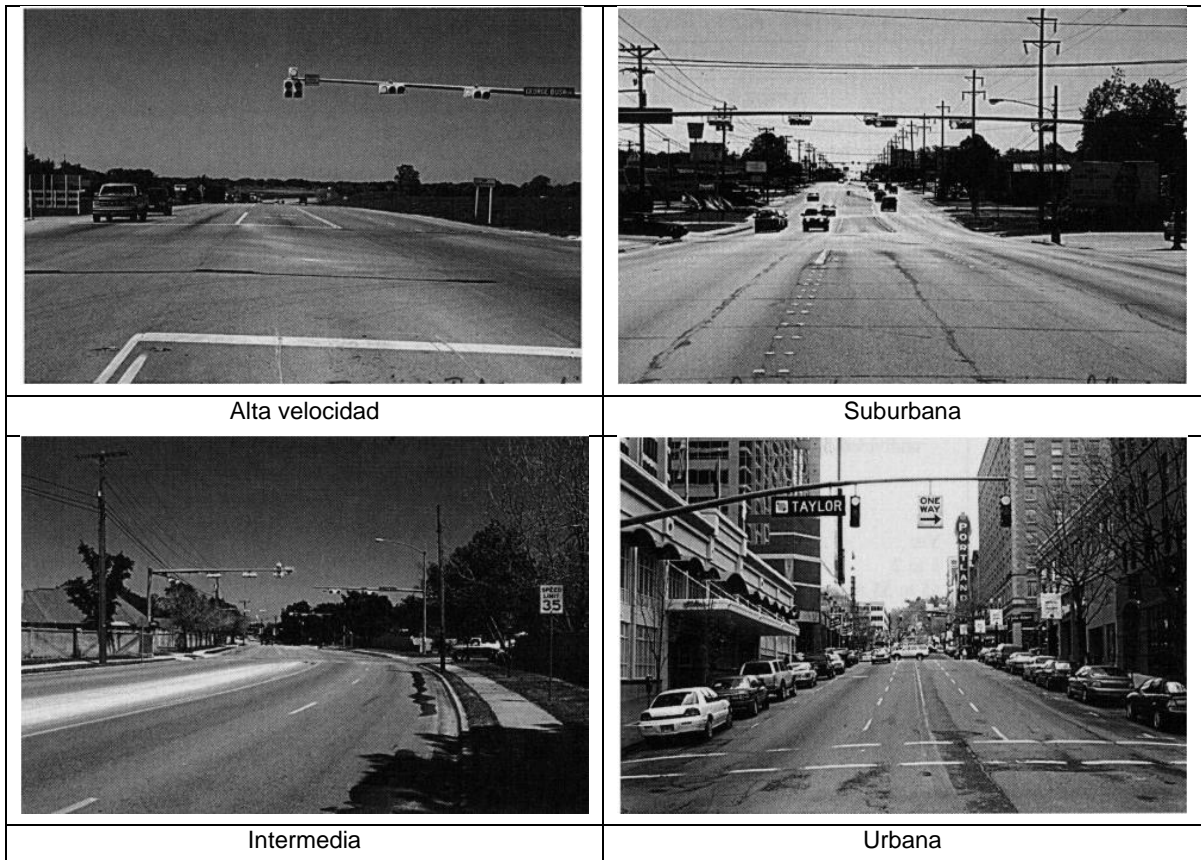
Los niveles de servicio en las calles urbanas se ve afectado por diferentes factores como las características geométricas de las vías, tipo de vía (arteria principal, colectoras o autopista), accesos o conexiones con otras vías, presencia de aparcamientos, señalización, actividad peatonal, andenes o bermas, giros, etc.

De acuerdo a lo anterior, el HCM – 2000 ha definido unas categorías de diseño y otras categorías funcionales para clasificar las vías urbanas.

Categorías de diseño: En cuanto al diseño, se cuenta con cuatro categorías: Alta – Velocidad, Suburbana, Intermedia y Urbana. Los criterios para clasificar en una de estas categorías tienen que ver con la cantidad de accesos, el tipo de arteria, aparcamientos, giros a la izquierda autorizados, señalización, límites de velocidad establecidos en la vía, desarrollo de la berma y presencia de peatones. En la Figura 4-1, se indica ejemplos típicos de vías urbanas para estas categorías.

Categorías funcionales: En cuanto a su funcionalidad, el HCM – 2000 clasifica las vías urbanas en: arterias principales y arterias menores o secundarias. Son criterios importantes para su definición: la movilidad, los accesos, puntos conectados y los viajes de servicio predominantes.

Figura 4-1. Ejemplos típicos de vías urbanas según la categoría de diseño



Fuente: HCM - 2000

Las arterias principales sirven de conexión entre los centros importantes de un área metropolitana y se pueden conectar con las autopistas principales generadoras de tráfico. En ciudades más pequeñas (Población menor de 50.000 habitantes), su importancia se deriva del servicio prestado al tráfico que pasa a través de la zona urbana.

Las arterias menores conectan y alimentan el sistema arterial principal. Aunque su función principal es la movilidad del tráfico, se realiza esta función a un nivel más bajo y con más énfasis en el acceso al entorno. Un sistema arterial menor, sirve y distribuye los viajes a las zonas geográficas más pequeñas que las atendidas por el sistema arterial principal.

En la Tabla 4-5, se indican los criterios para definir y clasificar las vías urbanas de acuerdo a las categorías funcionales y de diseño.

Tabla 4-5. Determinación de categorías funcionales y de diseño

CRITERIO	CATEGORIA FUNCIONAL			
	Arteria principal		Arteria menor	
Función de la movilidad	Muy importante		Importante	
Función de acceso	Muy pocos		Sustancial	
Puntos conectados	Autopistas, centros de actividades importantes, principales generadores de tráfico		Arterias principales	
Viajes de servicio predominantes	Viajes relativamente largos entre los principales puntos y a través de viajes de entrada, salida, y pasando por la ciudad		Viajes de longitud moderada dentro de áreas geográficas relativamente pequeñas	
CRITERIO	CATEGORIA DE DISEÑO			
	Alta - Velocidad	Suburbana	Intermedia	Urbana
Vía de entrada / densidad acceso	Muy baja densidad	Densidad baja	Densidad moderada	Alta densidad
Tipo de arteria	Varios carriles divididos; No divididos o de dos carriles con berma	Varios carriles divididos; No divididos o de dos carriles con berma	Varios carriles divididos; No divididos o de dos carriles, un solo sentido	Dos o más carriles, un solo sentido
Aparcamiento	No	No	Algunos	Significante
Giro a la izquierda separado	Si	Si	Usualmente	Algunos
Señalización/Km	1 - 3	2 - 8	6 - 16	10 - 19
Límite de velocidad Km/h	72 - 89	64 - 72	48 - 64	40 - 56
Actividad peatonal	Muy poco	Poco	Algunos	Usualmente
Desarrollo de la berma	Densidad baja	Baja a media densidad	Densidad moderada	Alta densidad

Fuente: HCM - 2000

En base a la combinación de las dos categorías anteriores, las vías urbanas se pueden clasificar en otras 4 clases como se indica en la siguiente tabla:

Tabla 4-6. Clasificación vías urbanas basado en la combinación de categorías funcionales y de diseño

CATEGORIA DE DISEÑO	CATEGORIA FUNCIONAL	
	Arteria principal	Arteria menor
Alta - Velocidad	I	N/A
Suburbana	II	II
Intermedia	II	III o IV
Urbana	III o IV	IV

Fuente: HCM - 2000

En la práctica, a veces hay ambigüedades en la determinación de las categorías apropiadas. La medición o estimación de la velocidad de flujo libre es una gran ayuda en esta determinación, ya que cada clase urbana de la calle tiene un rango característico de velocidades a flujo libre.

Una vez realizada la clasificación de las vías urbanas, se puede entrar a definir el nivel de servicio respectivo con base a la Tabla 4-7.

Tabla 4-7. Nivel de servicio por clase de vía urbana

Clase calle urbana	I	II	III	IV
Rango de velocidad a flujo libre (FFS)	89 a 72 Km/h	72 a 56 Km/h	56 a 48 Km/h	48 a 40 Km/h
FFS Típico	80 Km/h	64 Km/h	56 Km/h	48 Km/h
NIVEL DE SERVICIO	Velocidad de viaje (Km/h)			
A	> 68	> 56	> 48	> 40
B	> 55 - 68	> 45 - 56	> 39 - 48	> 31 - 40
C	> 43 - 55	> 35 - 45	> 29 - 39	> 21 - 31
D	> 34 - 43	> 27 - 35	> 23 - 29	> 14 - 21
E	> 26 - 34	> 21 - 27	> 16 - 23	> 11 - 14
F	≤ 26	≤ 21	≤ 16	≤ 11

Fuente: HCM – 2000

El HCM – 2000, describe los niveles de servicio de calles urbanas de la siguiente forma:

El nivel de servicio A, describe las operaciones de velocidad a velocidades promedio de viaje por lo general alrededor del 90 por ciento de la FFS. Los vehículos viajan totalmente sin obstáculos para maniobrar dentro de la corriente de tráfico. No hay retraso de control en las intersecciones. El nivel de comodidad y conveniencia que percibe el viajero es excelente.

El nivel de servicio B, describe las operaciones de viaje razonablemente sin obstáculos y a una velocidad promedio de viaje por lo general alrededor del 70 por ciento de la FFS.

La capacidad de maniobra dentro de la corriente de tráfico sólo se restringe ligeramente, y los retrasos de control en las intersecciones no son significativos. El viajero percibe una buena comodidad pero con un grado menor que en el nivel de servicio A, porque hay mayor presencia de tráfico.

El nivel de servicio C, se refiere a operaciones de tráfico estables; sin embargo, la capacidad de maniobrar y cambiar de carril en ubicaciones de carriles medios puede ser más restringida que en el nivel de servicio B, en este nivel ya hay formación de pequeñas colas, las velocidades medias de viaje son de aproximadamente 50 por ciento de los FFS. El nivel de comodidad y conveniencia desciende notablemente.

El nivel de servicio D, se comporta como una frontera, en el que pequeños aumentos en el flujo pueden causar aumentos sustanciales en la demora y la disminución de la velocidad de desplazamiento. Las velocidades promedio de viaje son aproximadamente el 40 por ciento de la FFS. En este nivel el viajero experimenta un grado de comodidad y conveniencia bajo.

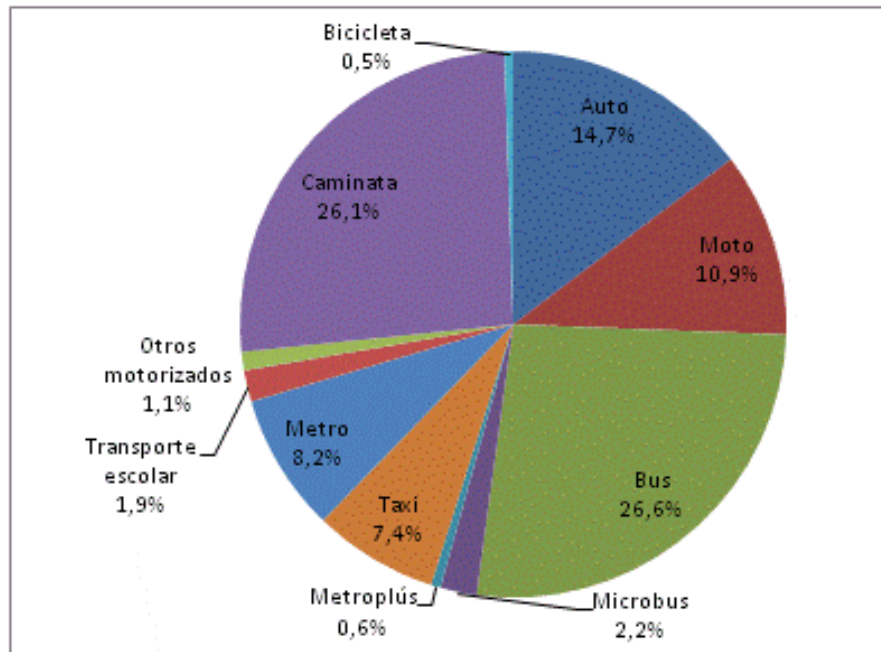
El nivel de servicio E, se caracteriza por retrasos significativos y velocidades promedio de viaje de 33 por ciento FFS o menos. Se presentan altos volúmenes vehiculares y grandes retrasos en las intersecciones más críticas. La libertad de maniobra es extremadamente difícil, el grado de comodidad y conveniencia que experimenta el viajero, es extremadamente bajo, produciendo frustración y estrés.

El nivel de servicio F, se caracteriza por el flujo vehicular en la calle urbana a velocidades muy bajas, por lo general un cuarto de la FFS y hasta menos. Las condiciones de flujo son forzadas, se presenta congestión en las intersecciones, con altos retrasos, altos volúmenes y extensa puesta en cola a lo largo de las vías. En este nivel de servicio, el grado de comodidad y conveniencia que experimenta el viajero son exageradamente malos, produciendo altos niveles de estrés, frustración y otros efectos negativos para la salud y calidad de vida.

5. Zona de estudio

La ciudad de Medellín tiene una población, cercana a los 2,5 millones de habitantes. Cada día las personas deben desplazarse de un sitio a otro para satisfacer sus diferentes necesidades, cumplir con obligaciones y otros motivos; para ello deben utilizar uno o varios modos de transporte disponibles en la ciudad. Según la última Encuesta Origen Destino realizada en el año 2012 por la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, en la ciudad, el promedio de viajes por habitante es de 1,7 viajes/día. Diariamente en Medellín se realizan alrededor de 4,1 millones de viajes, las personas que más viajes realizan son las de estrato 2 y 3 con un 34% y 31%, respectivamente, y las que menos viajan son las pertenecientes al estrato 6 con un 5%. (AMVA, 2012). En Gráfica 5-1, se indica el reparto modal de estos viajes.

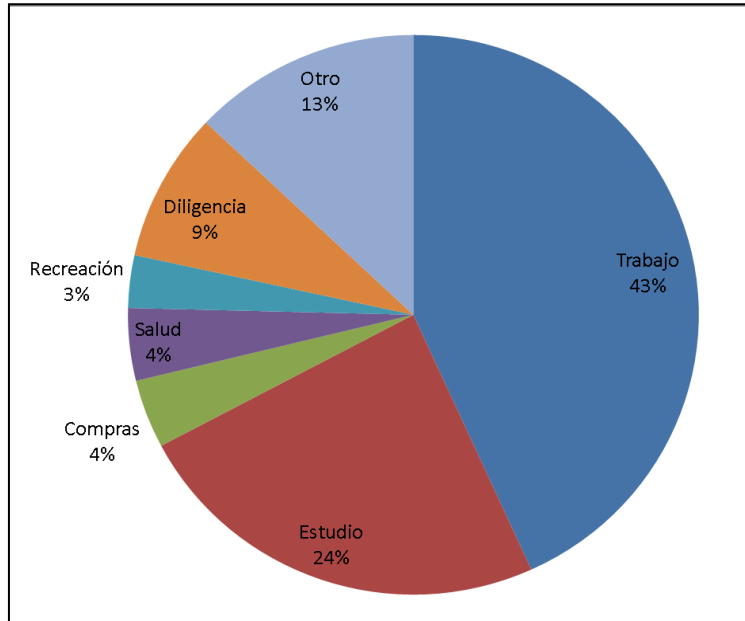
Gráfica 5-1. Reparto modal viajes diarios en la ciudad de Medellín



Fuente: AMVA (2012)

El mismo estudio indica que del total de viajes realizados en un día, el 43% son realizados por motivo de trabajo, 24% por estudio, 13% por otros motivos, 9% para hacer algún tipo de diligencia, para salud 4%, compras 4% y un 3% para recreación (AMVA, 2012). En la Gráfica 5-2, se indican los motivos de viaje característicos en la ciudad.

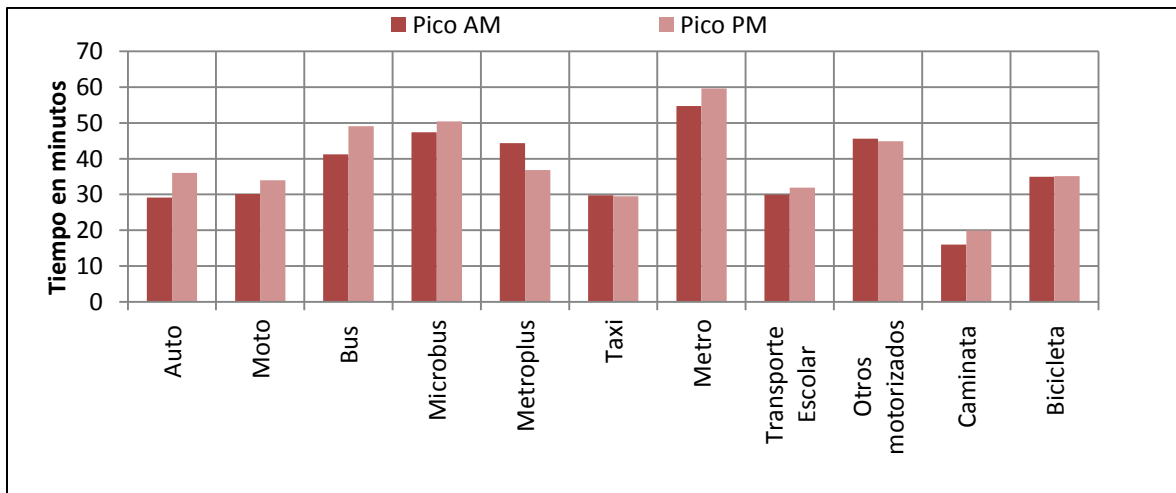
Gráfica 5-2. Motivos de viaje en la ciudad de Medellín



Fuente: AMVA (2012)

Los tiempos de desplazamiento en el año 2012 en la ciudad, estaban en un promedio diario de 34 minutos. En la hora pico de la mañana de 32 minutos, mientras que en la hora pico de la tarde de 38 minutos. El modo de transporte que menos tiempo de viaje utiliza es la caminata (debido a desplazamientos muy cortos), y en el otro extremo está el desplazamiento en Metro debido a su largo recorrido. El tiempo promedio de viaje para la zona del centro de la ciudad para los viajes realizados en auto particular es de 30 minutos aproximadamente (AMVA, 2012). En la Gráfica 5-3, se indican los tiempos promedio de cada modo de transporte en los períodos pico de la mañana y de la tarde.

Gráfica 5-3. Tiempos promedio de desplazamiento en los diferentes modos



Fuente: AMVA (2012)

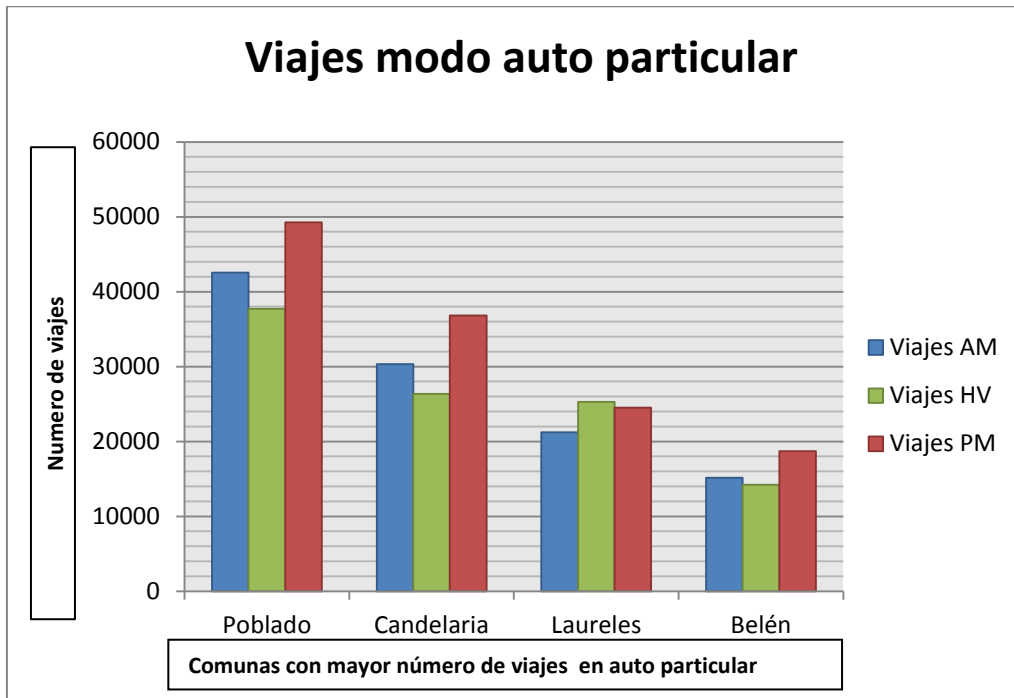
En cuanto a los viajes en auto particular, según los resultados de la Encuesta Origen Destino del 2012, en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, diariamente se realizan 820.795 viajes, 77% de estos con influencia en la ciudad de Medellín. Lo sitios donde más viajes se realizan en modo auto particular son: las comunas de El Poblado, El centro, Laureles y Belén (AMVA, 2012). En la Tabla 5-1, se indica la distribución de viajes diarios realizados en modo auto particular en el AMVA; y en la Gráfica 5-4, se indica el total de viajes que se realizan en las comunas mencionadas anteriormente (se tiene en cuenta los viajes que salen, que se realizan internamente y que llegan de otras comunas).

Tabla 5-1. Viajes diarios realizados en auto particular en el AMVA

PERIODO	HORARIO	AUTO PARTICULAR	
		VIAJES	%
00:00 - 06:00	00:00 - 06:00	21.281	2,59%
PICO AM	06:00 - 08:00	115.917	14,12%
VALLE 1	08:00 - 11:00	132.436	16,14%
VALLE 2	11:00 - 14:00	154.090	18,77%
VALLE 3	14:00 - 17:00	170.489	20,77%
VALLE 4	19:00 - 20:00	53.757	6,55%
PICO PM	17:00 - 19:00	140.864	17,16%
20:00 - 24:00	20:00 - 24:00	31.962	3,89%
TOTAL		820.795	100%

Fuente: AMVA (2012)

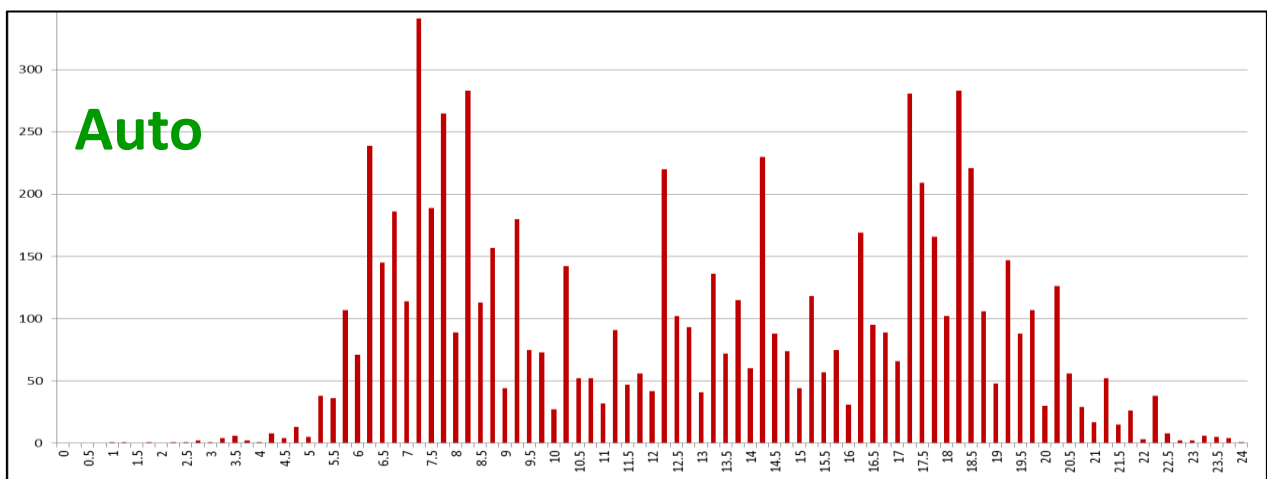
Gráfica 5-4. Viajes en auto particular



Fuente: AMVA (2012)

En la Gráfica 5-5, se indica la distribución horaria de viajes realizados en auto particular en la ciudad de Medellín, según los resultados del estudio Encuesta Origen Destino del año 2012.

Gráfica 5-5. Distribución horaria de viajes realizados en auto particular en la ciudad de Medellín



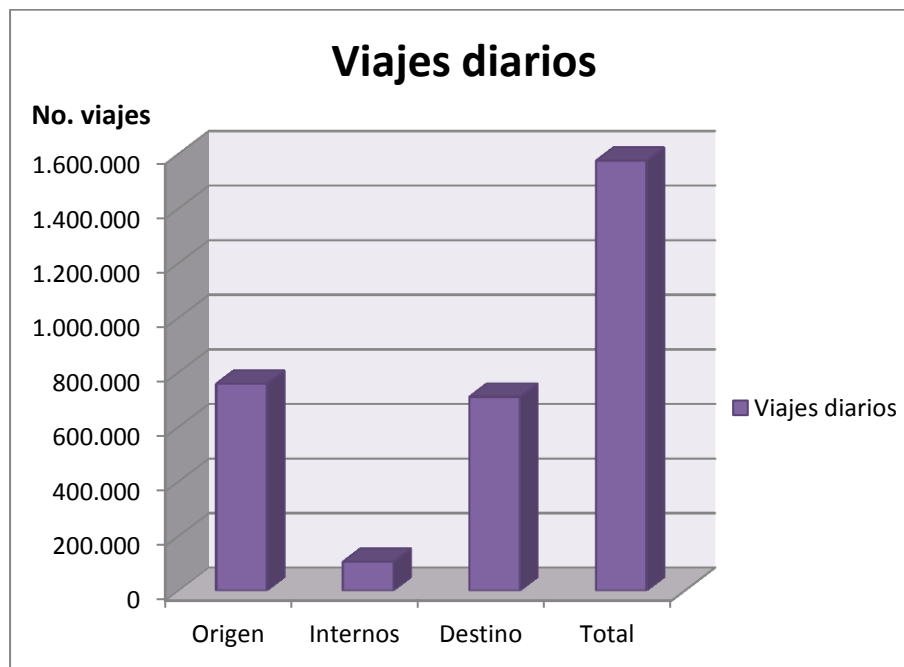
Fuente: AMVA (2012)

5.1 Análisis de la movilidad en el centro de Medellín

De acuerdo a los resultados de la encuesta origen destino del 2012, en un día típico en la zona central de Medellín (comuna la Candelaria) se realizan un total de 1.575.582 viajes, que representan el 27,5% del total de viajes realizados en un día típico en el área Metropolitana del Valle de Aburrá y el 37% del total de viajes realizados en las mismas condiciones en la ciudad de Medellín. Del total de viajes con influencia en el centro de la ciudad, el 48%, se originan en esta zona y salen a otras comunas o sectores; el 45%, llegan, es decir tienen como destino el centro de la ciudad y el 7% restante son viajes que se realizan dentro de la misma zona (AMVA, 2012). En la Gráfica 5-6, se indica los viajes diarios con influencia en el centro de la ciudad según la Encuesta Origen Destino del 2012.

Según el mismo estudio, es importante anotar que del total de viajes que se realizan con influencia en algún sector del centro de la ciudad, el 89% se realizan en modos motorizados, de los cuales al auto particular le corresponde el 16%. De igual forma, se tiene que el 90%, del total de los viajes, son realizados por personas no residentes en la zona.

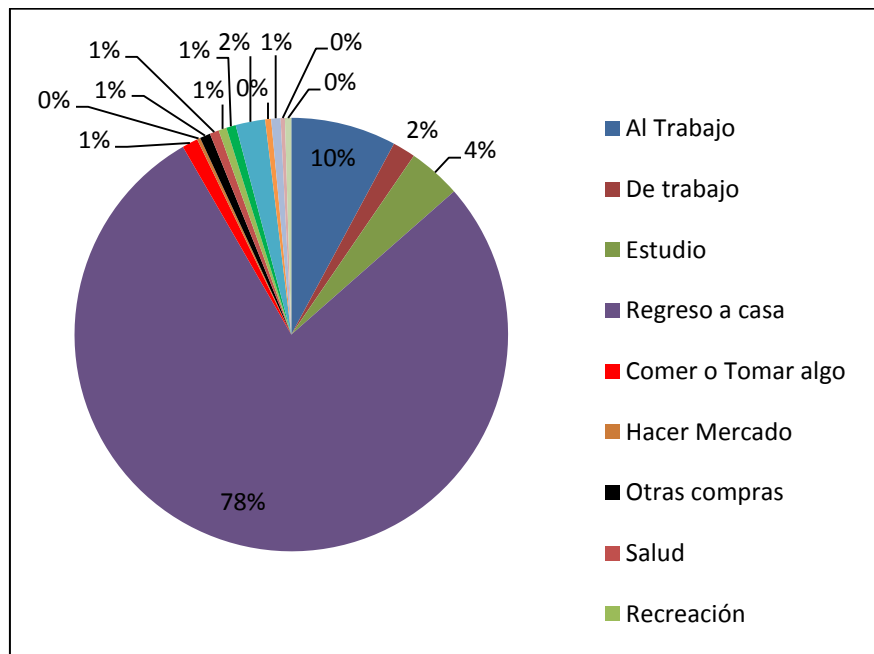
Gráfica 5-6. Viajes diarios con influencia en el centro de Medellín



Fuente: AMVA (2012)

En cuanto al motivo del viaje se tiene que los tres primeros motivos que más generan viajes en el centro de la ciudad son: regreso a casa el 78%, trabajo 10%, y por estudio el 4%. En la Gráfica 5-7, se indican los motivos de viaje característicos en el centro de Medellín.

Gráfica 5-7. Motivos de viaje centro de Medellín



Fuente: AMVA (2012)

El tiempo promedio de viaje para los viajeros que tienen influencia en el centro de la ciudad de Medellín es de aproximadamente 30 minutos, el mismo tiempo promedio de los viajes que se realizan en auto particular (AMVA, 2012).

5.2 Determinación de la zona de estudio

Para la presente investigación fue necesario definir una zona de estudio la cual debe cumplir con algunas características como son:

- Ser una zona altamente congestionada.
- Tener alta participación de vehículos privados en la composición vehicular circundante.
- Formar un anillo con vías importantes.
- Tener una infraestructura vial en buenas condiciones.
- Estar dentro de una zona de restricción como por ejemplo, la medida de pico y placa.
- Ser un área comercial, con pocos residentes.
- No ser demasiado extensa el área, los sistemas de cobro por congestión que funcionan en el mundo tienen áreas relativamente pequeñas como es el caso de Londres, Singapur y Roma, donde se tiene que el área de cobro por congestión está entre el 0,7% y 1,4% del área urbana (Pozueta, 2008)

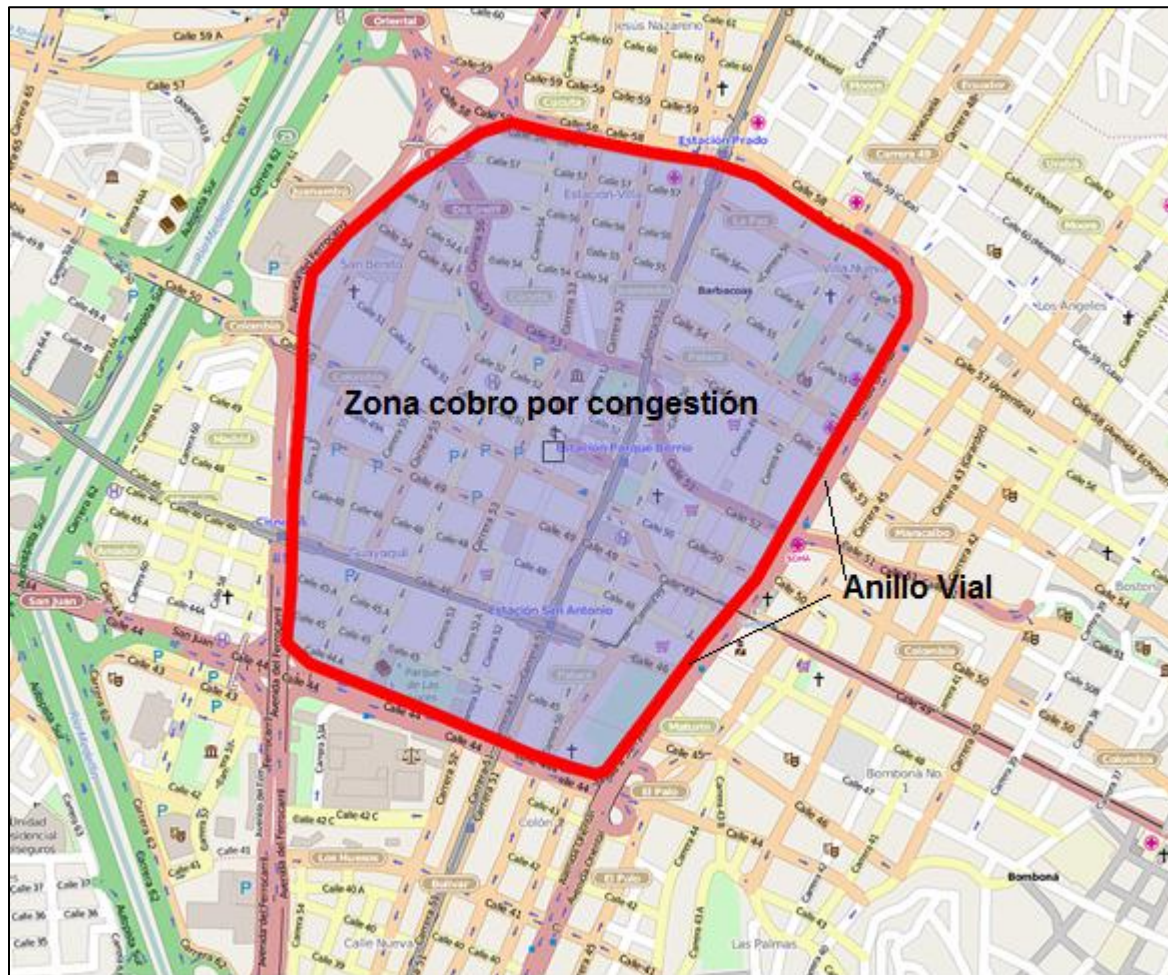
Por las anteriores características, se define como área de estudio un sector de la llamada “zona amarilla”⁴; delimitada de la siguiente forma: En el sentido Este- Oeste, desde la Avenida Oriental hasta la Avenida Ferrocarril; y en el sentido Norte – Sur, desde la Avenida Oriental o Echeverry (calle 58) avanzando hacia al sur hasta la calle 44 (San Juan); esta zona tiene un área aproximada de 2 Km².

En la Figura 5-1, se indica la zona del centro de la ciudad de Medellín, la cual será objeto para la aplicación del presente estudio.

Las vías que conforman el anillo son la Avenida Oriental, Avenida Echeverry (calle 58), Avenida Ferrocarril y Calle San Juan; estas vías presentan buenas características geométricas, están en buen estado, poseen varios carriles en las dos direcciones de flujo facilitando la movilidad. El cobro por congestión estaría exento en estas vías y su aplicación se realizaría para los viajes en auto que entran y salen por cualquiera de sus accesos.

⁴ Zona amarilla: Zona del centro de la ciudad de Medellín, creada por la alcaldía de Medellín mediante decreto 1200 de 1997. Regulada en la actualidad por el decreto 1790 de 2012 de la Alcaldía de Medellín, por medio del cual se restringe, se fija y controla horarios de estacionamiento, circulación, cargue y descargue de mercancías con el fin de disminuir los altos índices de saturación de las vías.

Figura 5-1. Zona del centro de Medellín definida para el estudio



Fuente: Presente estudio

5.3 Diagnóstico de la zona de estudio

Conocer la situación actual de la zona de estudio comprende la recolección de información de la infraestructura vial, identificando sentidos viales, tipos de vías, número de carriles, modos de transporte que circulan por las vías, entre otras. Esta actividad se realizó mediante visitas de campo, herramientas ofimáticas como el Street View del Google Maps, Google Earth; con el estudio de información de bases de datos de la Secretaria de Movilidad de Medellín, Área Metropolitana del Valle de Aburrá y del análisis de información secundaria del *“Estudio de preinversión de movilidad para determinar la viabilidad de peatonalización total o parcial de algunos tramos viales del centro de la ciudad de Medellín bajo el concepto de tráfico lento y de supermanzanas”*, realizado por la firma consultora TPD Ingeniería S.A. dentro del contrato de consultoría 4600053985 en el año 2014.

En la Figura 5-2, se indica el formato de visita de campo utilizado en los recorridos realizados.

El uso de suelo predominante es el comercial, en especial en los sectores: occidental, sur, centro y norte; la actividad comercial se da por lo general en los primeros pisos de los edificios, con mezcla de usos de servicios en los pisos superiores. En el sur se tiene mezcla de uso comercial con uso industrial y la mezcla de uso comercial con residencial se tiene al oriente, nororiente.

En cuanto al equipamiento se tiene una concentración al sur sobre la calle San Juan y la Carrera 51 con instituciones gubernamentales en el centro Administrativo la Alpujarra, culturales, institucionales, sociales y de servicio; en la parte central se tiene equipamientos de tipo cultural como el parque Berrio, Plaza Botero, palacio de la Cultura, entre otros. A lo largo de la Avenida Bolívar se encuentra la infraestructura de equipamiento de transporte masivo perteneciente a la línea A del Metro; la cual cruza la zona de estudio de Sur-Norte; de igual forma se tiene la línea B en la calle 46 (Maturín) desde la Avenida Bolívar hacia el Oeste. En estos dos tramos del metro están las estaciones: San Antonio, Parque Berrio en la línea A y Cisneros en la línea B.

5.3.2 Vías

En la zona de estudio se encuentran vías con diferentes características; existen paseos peatonales con secciones restringidas hasta avenidas de doble calzada de 5 carriles por cada sentido. En cuanto al número de carriles, predominan los dos carriles, por lo general en un solo sentido de flujo, con ancho de calzada que oscila entre los 5,0m y 7,0m, y con andenes dispuestos en cada lado.

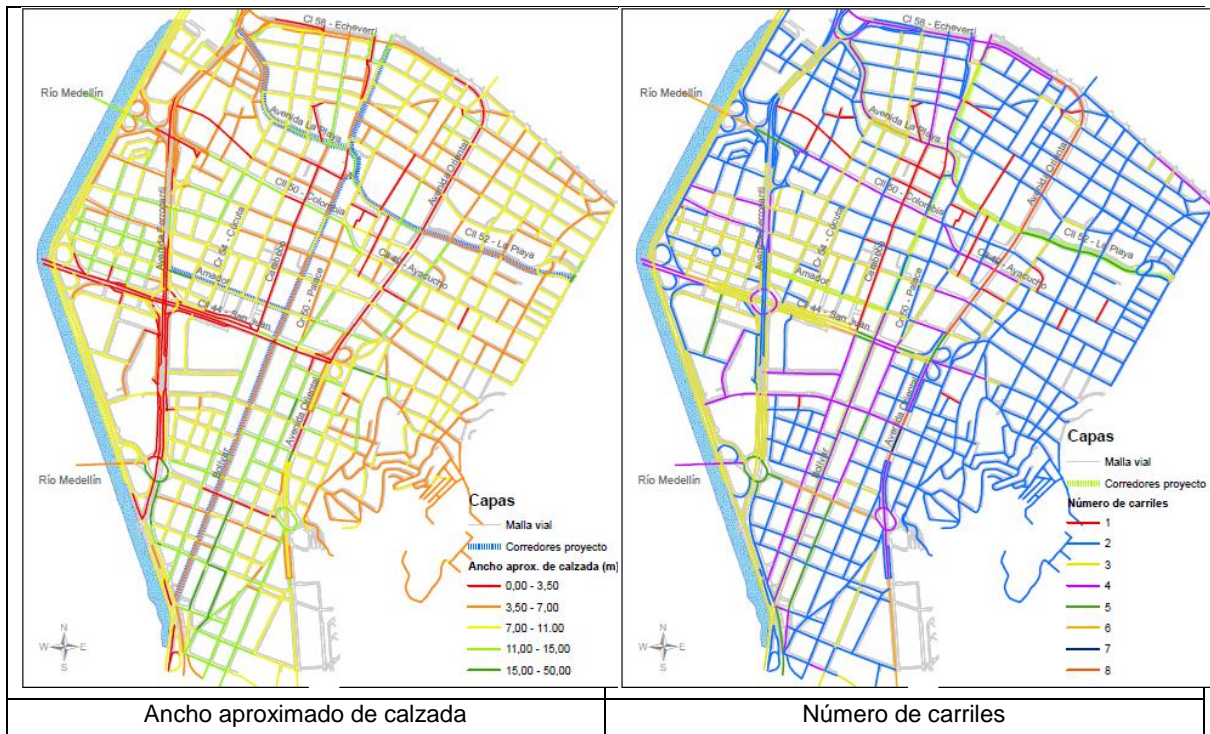
En la Figura 5-3, se indica la caracterización de las vías en la zona de estudio, tomadas del *“Estudio de preinversión de movilidad para determinar la viabilidad de peatonalización total o parcial de algunos tramos viales del centro de la ciudad de Medellín bajo el concepto de tráfico lento y de supermanzanas”*.

En el centro de Medellín en la actualidad existen aproximadamente 1,74 Km de segmento de vías peatonales. El tramo peatonal más largo se encuentra sobre la Carrera 52-Carabobo, con una extensión aproximada de 0,75 Km. Luego está el Paseo Junín, ubicado sobre la Carrera 49-Junin, con una extensión aproximada de 0,28 Km y el tramo de la calle Boyacá con una extensión aproximada de 0,4 Km.

La infraestructura de ciclorrutas en el centro de la ciudad es muy limitada, tan solo se cuenta con 1,64 Km, localizados en Carabobo entre las calle 52 y 58; y otro tramo en la calle San Juan desde Palace hacia la Avenida Regional.

Con respecto al sentido de las vías, en su mayoría las vías tienen un sentido único que conforman pares permitiendo la circulación vehicular del centro de la ciudad. En la Figura 5-4, se indica la caracterización del sentido vial en la zona de estudio.

Figura 5-3. Caracterización vías en la zona de estudio – ancho de calzada y número de carriles



Fuente: TPD Ingeniería (2014)

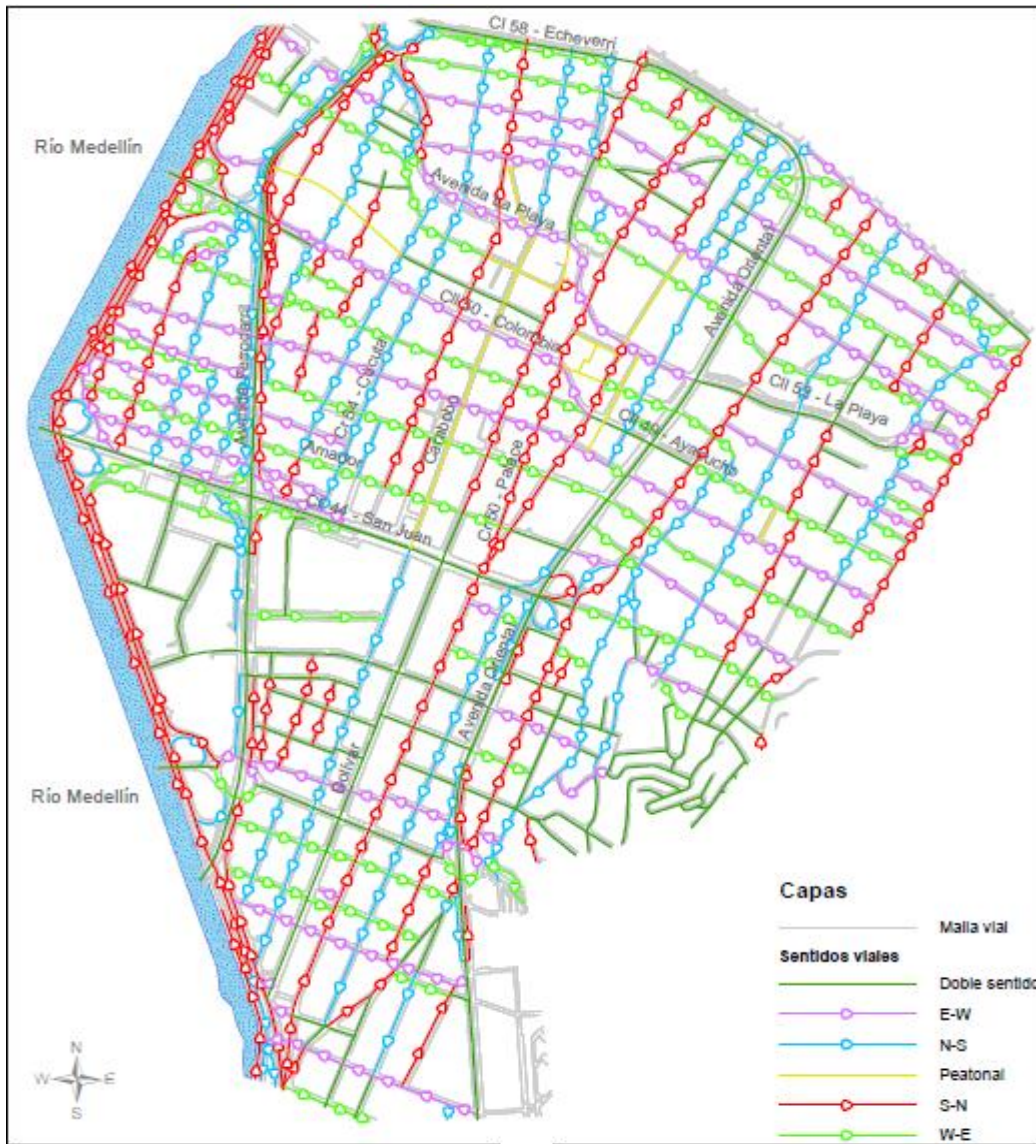
Tanto la información de número de carriles como los sentidos de las vías, servirán más adelante para construcción de la red vial en el software Visum.

5.3.3 Sistemas de transporte

En el centro de la ciudad, se tiene diferentes sistemas de transporte que utilizan la infraestructura vial y de transporte existente. Se cuenta con servicio público de transporte masivo de pasajeros prestado a través del Sistema Integrado del Transporte del Valle de Aburrá – SITVA-, conformado por el Metro como eje estructurante con las líneas de Metrocable, Metrolús y por las rutas alimentadoras.

Existe un sistema de transporte público colectivo, que comunica el centro de la ciudad con las diferentes zonas de la ciudad. Por las vías del centro circulan cerca de 230 rutas de transporte público colectivo, lo que supone cerca del 80% del total de las rutas de transporte público del AMVA. En la Figura 5-5, se indica la influencia del Transporte Público Colectivo (TPC) en las vías del centro de la ciudad.

Figura 5-4. Caracterización vías en la zona de estudio – sentidos viales

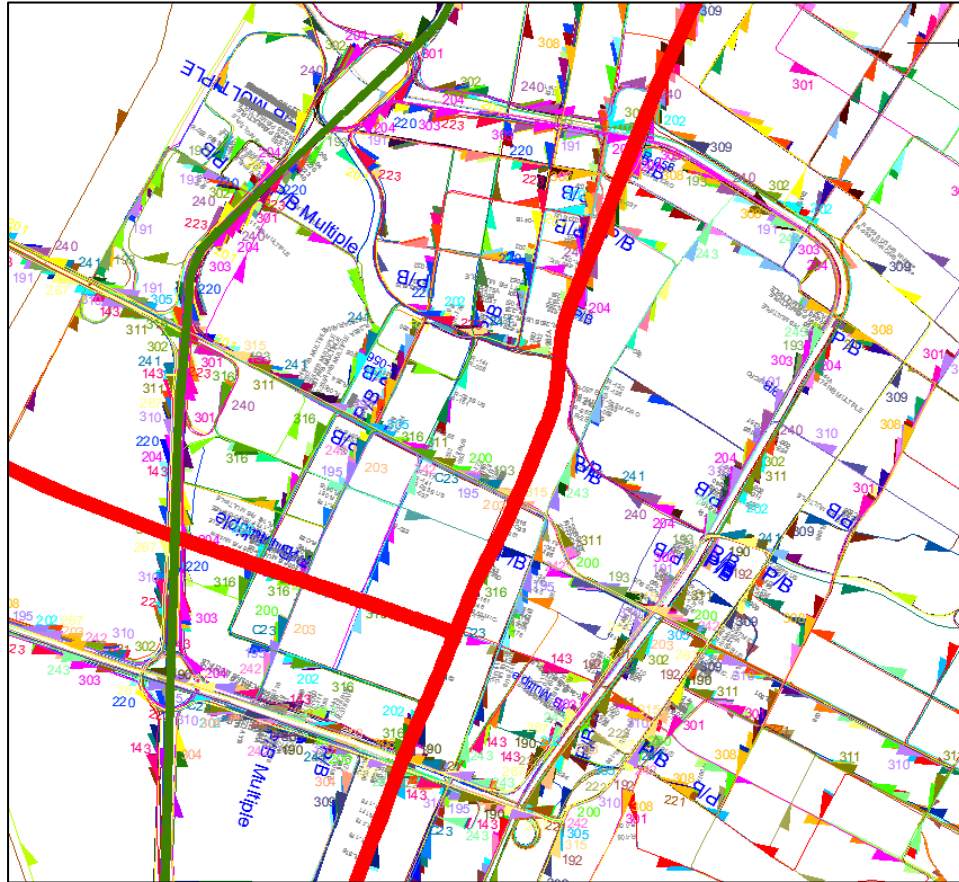


Fuente: TPD Ingeniería (2014)

Los modos de transporte que funcionan en el centro de la ciudad son: Metro, Bus, Taxi, Moto, Bicicleta (con baja presencia), automóvil, peatón; los viajeros que entran y salen del centro de la ciudad tienen la opción de moverse por intermedio de alguno de ellos o la combinación de varios para cumplir con el objetivo del viaje.

Por otro lado se tiene el volumen de vehículos de carga que para abastecer de productos e insumos el centro de la ciudad, circulan en horarios restringidos de acuerdo a las características del vehículo y peso de la carga según el decreto 1790 de 2012 expedido por la alcaldía de Medellín.

Figura 5-5. Influencia de rutas de TPC en la zona de estudio



Fuente: SMM (2014)

5.3.4 Volúmenes de tráfico vehicular

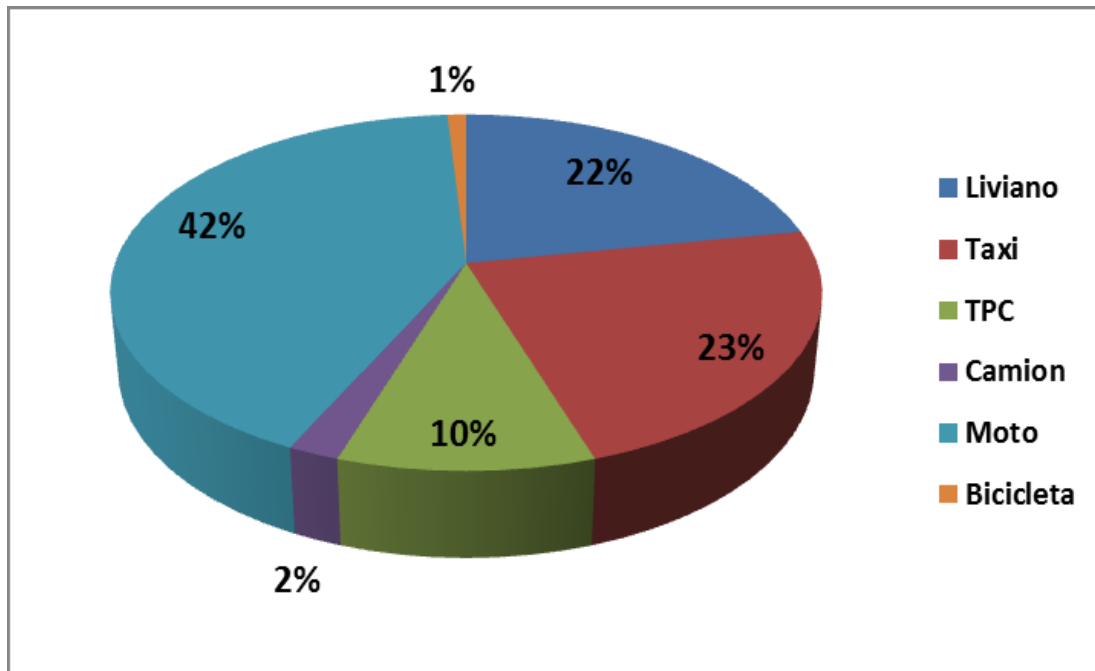
Gracias al estudio realizado por la firma TPD ingeniería S.A en el año 2014, dentro del contrato de consultoría 4600053985, se cuenta con unos aforos recientes que permiten conocer los volúmenes de tráfico en el centro de la ciudad y la composición de éste.

Los aforos vehiculares fueron realizados durante el periodo de las 06:30 a las 09:30 horas y de las 16:00 a las 19:00 horas durante dos días típicos de la semana y dos fines de semana (días atípicos); en este estudio sólo utilizaremos los aforos de los días típicos. Como resultado para los días típicos se obtuvo volúmenes vehiculares similares, con un ligero aumento en el periodo de la tarde. Se encontró que la Hora de Máxima Demanda (HMD) para la red vial del centro de la ciudad se encuentra entre las 17:15 y las 18:15 horas. El estudio de aforos también mostró la composición vehicular; para la hora de máxima demanda se tiene que las motos son los vehículos con mayor circulación (42%), seguido de las tipologías taxi y livianos, con un 23% y 22% respectivamente; en el cuarto lugar están los vehículos del Transporte Público Colectivo (TPC) con el 10%, y de

últimos los camiones y la bicicleta con el 2% y 1% respectivamente (TPD Ingeniería, 2014).

En la Gráfica 5-8, se indica la composición vehicular para la hora de máxima demanda.

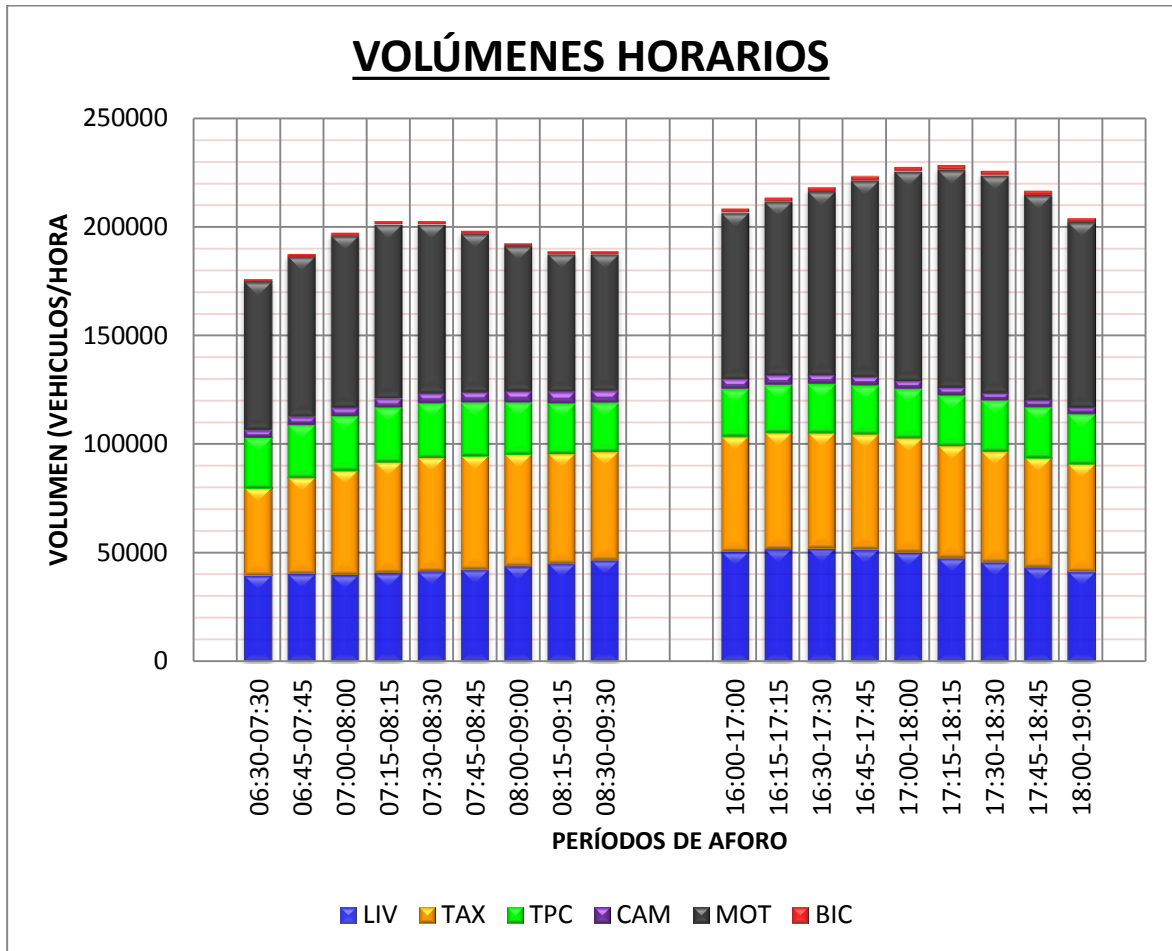
Gráfica 5-8. Composición vehicular HMD



Fuente: TPD Ingeniería (2014)

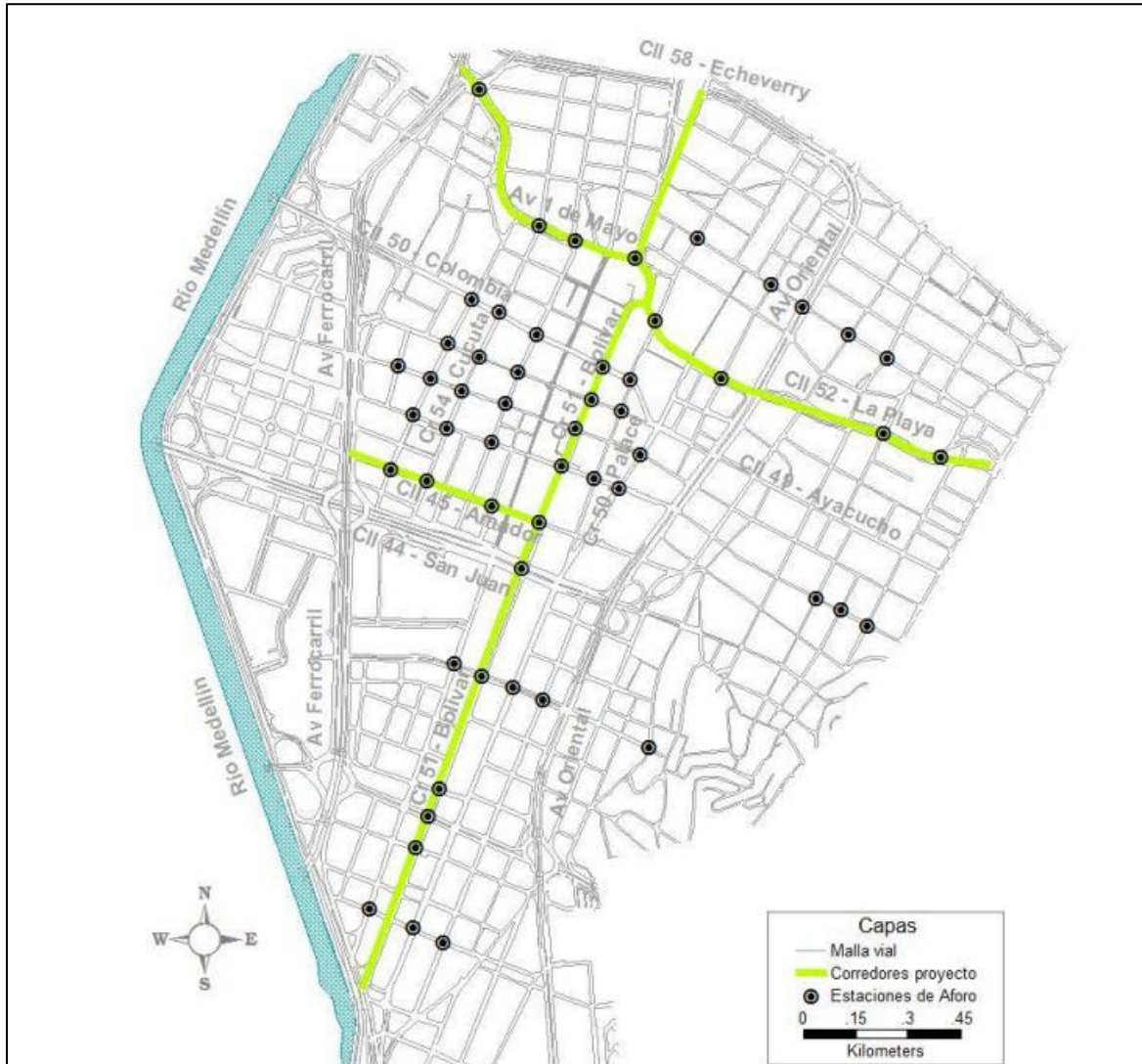
La cantidad del volumen vehicular, expresados por cada tipo de vehículo en cada hora del periodo aforado (AM y PM) se indica en la Gráfica 5-9. Se puede observar que la mayor cantidad de tráfico está en el periodo pico de la tarde, y en este periodo la HMD corresponde a las 17:15 a 18:15 horas, como se mencionó anteriormente.

Gráfica 5-9. Volúmenes de vehículos por hora en el centro de la ciudad



En la Figura 5-6, se indican las estaciones de aforo realizadas por el estudio en mención.

Figura 5-6. Estaciones de aforo



Fuente: TPD Ingeniería (2014)

Los volúmenes horarios servirán de insumo para calibrar el modelo de red en el software Visum en el periodo de modelación.

5.3.5 Parqueos

De acuerdo al estudio de TPD Ingeniería (2014), en el centro de la ciudad se identificó que además de los parqueaderos reglamentados, existen 6 Zonas de Estacionamiento Regulado (ZER) (Bolívar, Bombona, Boston, Maturín, Perpetuo Socorro y San Benito). En dichas zonas, se permite el parqueo temporal de vehículos privados previo pago de una tarifa establecida por la entidad reguladora según el tipo de zonas. Dichas zonas se

encuentran reguladas por el decreto 1111 del 2009 de la Secretaría de movilidad de Medellín. Existen otras zonas conocidas con el nombre de “Zonas Blancas” que permiten el parqueo temporal gratuito, por un periodo de tiempo máximo establecido por la Secretaría de Movilidad.

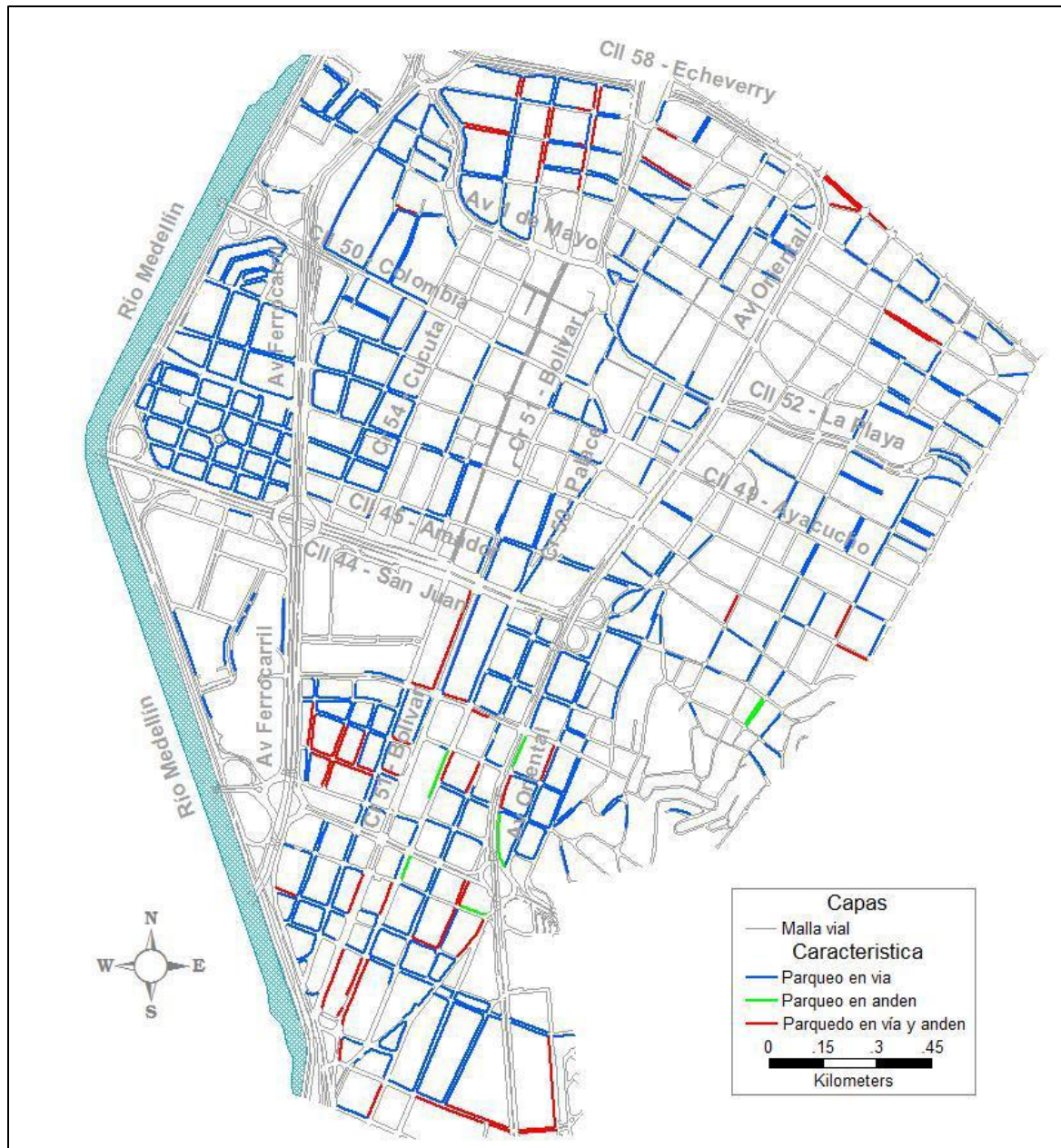
En el recorrido de vista de campo para la presente investigación se identificó un problema generalizado de parqueo indebido en vía con invasión del espacio público por parte de vehículos automotores y en otros sitios, invasión de carril de vías por vendedores informales. En los dos casos se afecta la capacidad de las vías bien sea por la ocupación directa de otro vehículo estacionado o por la reducción de espacio por los vendedores ambulantes; que además de ocupar los andenes, se toman parte de los carriles; esto último también influye en la velocidad de circulación de los vehículos debido a que la presencia de peatones en las vías desplazados de los andenes, hace que al maniobrar en estas vías se requiera menor velocidad y mayor sutileza. En la Figura 5-7, se muestra imágenes y en la Figura 5-8, la localización de las vías que presentan reducciones de capacidad en el centro de la ciudad.

Figura 5-7. Reducción capacidad de las vías urbanas en el centro de Medellín



Fuente: Google Maps

Figura 5-8. Localización vías urbanas afectadas con reducción de capacidad en el centro de Medellín



Fuente: TPD Ingeniería (2014)

5.3.6 Zonas de cargue y descargue

La actividad de carga y descarga dentro de la “Zona amarilla” está prohibida por el decreto 1790 de 2012 de la Alcaldía de Medellín en el periodo entre las 06:30 y las 19:30 horas para vehículos de más de 8,5 Ton. Y entre las 11:00 y las 19:30 horas, para vehículos de capacidad menor a 8,5 Ton o altura menor a 4,40 m. Adicionalmente, se dictan algunas medidas especiales sobre segmentos de vía específicos en la zona de estudio.

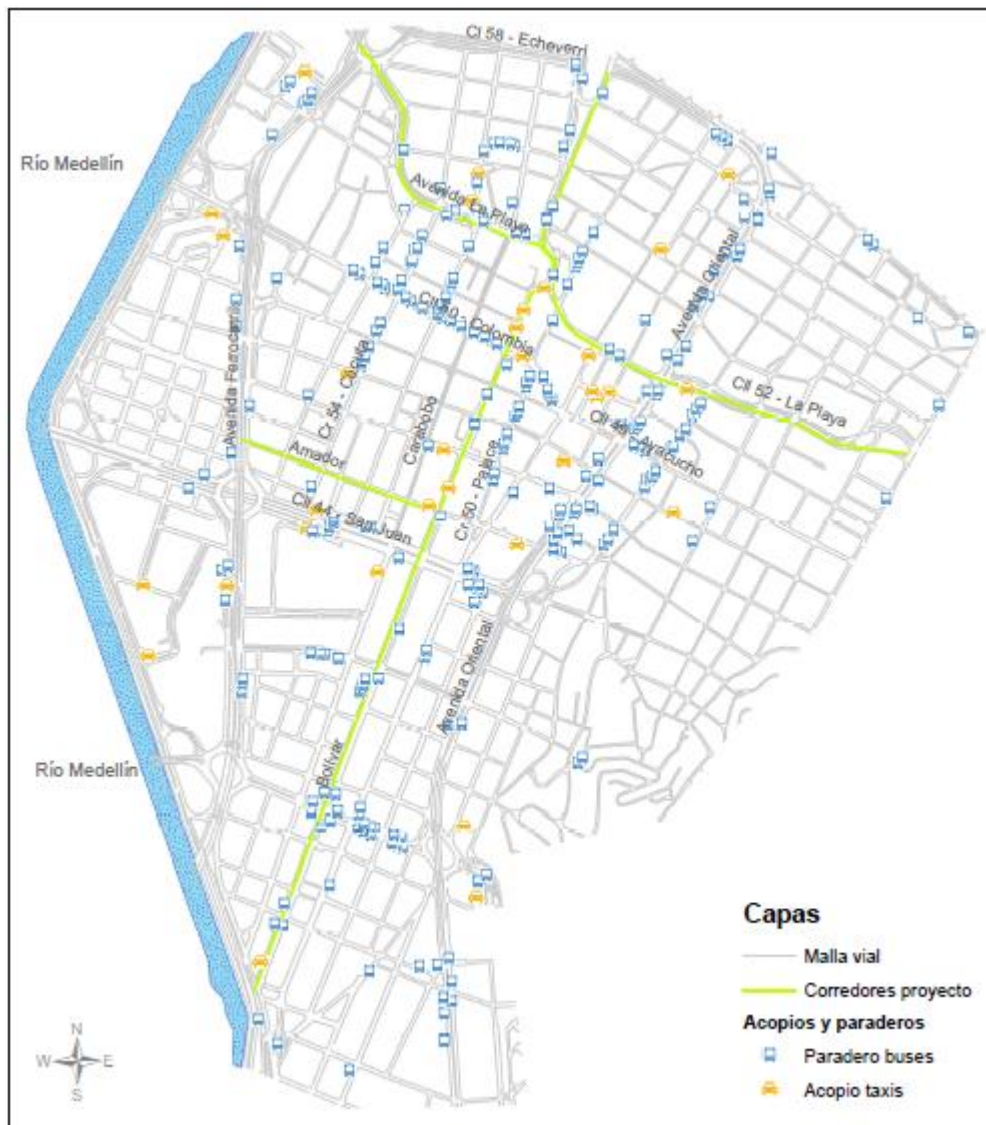
En el estudio realizado por TPD Ingeniería (2014), se evidenciaron diferentes sitios de regulación para tramos puntuales dentro de la red vial, estos se encuentran señalizados con el respectivo horario en el cual se permite la actividad de carga y descarga. Caso puntual es por ejemplo, las bahías de ZER-C sobre el corredor de la Calle 46 - Maturín.

5.3.7 Paraderos y acopios

En la zona de estudio existe una gran cantidad de paraderos de las rutas de buses que convergen en el centro de la ciudad, de igual forma existen algunos sitios de las vías que funcionan como acopios para el servicio de transporte público individual taxi. La localización de los acopios de taxis se encuentra reglamentada actualmente por el decreto 0756 de 2010 de la Secretaría de movilidad de Medellín (TPD Ingeniería, 2014).

En la Figura 5-9, se indica los sitios de acopio y paraderos identificados por el estudio realizado por TPD Ingeniería (2014).

Figura 5-9. Sitios de acopio y paraderos



Fuente: TPD Ingeniería (2014)

6. Modelación del transporte en los diferentes escenarios

El software utilizado como herramienta de modelación es el PTV Visum 14, de la casa Alemana PTV Group, es un software líder en el mundo para el análisis de tránsito, planificación y gestión de datos de transporte bien sea privado (PrT), público (PuT) o multimodal. Modela de manera consistente a todos los usuarios de las vías públicas y sus interacciones; se ha convertido en un estándar reconocido en el campo de la planificación de transporte para modelar redes de transporte y demanda de viajes, analizar los cambios del tránsito previstos, planificar servicios de transporte público y desarrollar avanzadas estrategias y soluciones de transporte.

6.1 Funciones y características del software PTV- Visum

Se trata de un software de macro modelación que permite trabajar y obtener resultados en:

Modelación de redes

- Modelización de la oferta para transporte privado (PrT) y público (PuT) en una red integrada.
- Modelización de numerosos sistemas de transporte, modos de transporte y clases de usuarios.
- Tipos y atributos de objetos definidos por el usuario, para una adaptación flexible del modelo de datos.
- Generación de subredes.
- Manejo de escenarios con procedimientos distribuidos en varias computadoras.

Cálculos de demanda

- Modelo de 4 pasos.
- Modelo de demanda basado en rutas.
- Modelo de demanda con distribución simultánea y cálculo de elección de modo (EVA).
- Modelo de demanda anidado.

Métodos de asignación de Transporte Privado (PrT)

- Métodos de alta convergencia y rápida asignación para obtener resultados realistas.
- Asignación simultánea de varias clases de usuarios y modelo de conector flexible (por ejemplo asignación multipunto).
- Elección de varios métodos de asignación estáticos, (por ejemplo incluyendo modelos de peajes y modelos detallados de impedancia de nodo).
- Métodos de asignación dinámica, equilibrio dinámico de usuario (DUE) y asignación dinámica estocástica.

Métodos y operaciones de asignación de Transporte Público (PuT)

- Asignación basada en tablas de horarios.
- Asignación basada en despachos.
- Bloqueo de línea.
- Modelos de tarifas estándar, hasta sistemas complejos de precios en un modelo
- Cálculo de costes de línea.

Ingeniería de tránsito

- Cálculo detallado de impedancia en el editor de nodos.
- Distintos editores de programación semafórica.
- Optimización de señales para tiempo de verde, tiempo de ciclo y tiempo de desfase.
- Interfaz con microsimulación PTV Vissim.

Crear análisis e informes

Con PTV Visum puede crear fácilmente análisis convincentes, estadísticas e informes. Puede obtener la representación en detalle de los siguientes análisis:

- Comparación de escenarios.
- Histograma de análisis de matrices.
- Cálculo de haz de flujo.
- Búsqueda interactiva de la ruta más corta.
- Isócronas.
- Análisis de impacto ambiental.
- Análisis de incidencia de accidentes.

6.2 Creación del modelo de red en PTV Visum

Un modelo de red debe representar el sistema de transporte integral describiendo la estructura espacial y temporal de la oferta de transporte. Por esta razón, el modelo de

red se compone de varios objetos que contienen datos relevantes acerca de la red como las rutas, los horarios y zonas de tráfico, entre otros. Según el manual de Visum 14, desarrollado por PTV Group (n.d), los tipos de objetos de red más importantes son:

Nodos: son objetos que definen la posición de las intersecciones en la red de arcos y de conmutadores de la red ferroviaria. Pueden ser representados por medio de puntos, símbolos, imágenes, letras o números y son el punto de unión entre arcos; por lo tanto existe un nodo inicial y un nodo final en cada arco.

Arcos o enlaces: conectan los nodos; por medio de los arcos se describe la infraestructura vial (calles, caminos, vías férreas, puentes, etc.) Un arco tiene una dirección particular, de manera que el enlace opuesto representa un objeto de red separada.

Giros: indican los movimientos que se permiten en un nodo determinado.

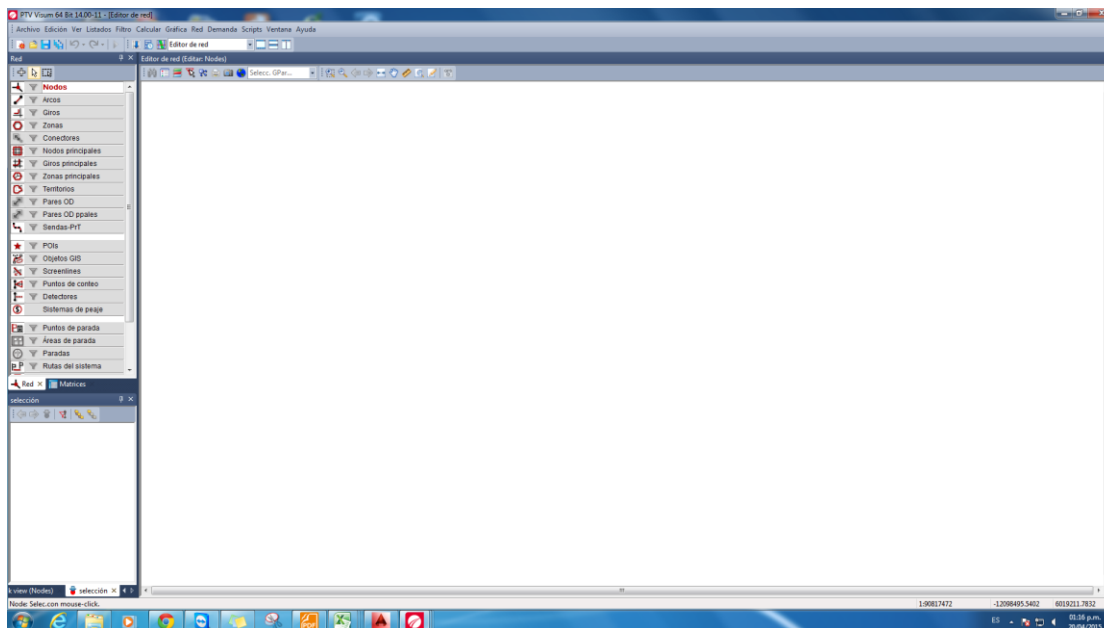
Zonas: (también llamadas células de tráfico) describen áreas con un uso particular del suelo y su ubicación en la red (por ejemplo, zonas residenciales, zonas comerciales, centros comerciales, escuelas). Son el origen y destino de los viajes dentro de la red de transporte, lo que significa que las zonas y la red de transporte se conectan a través de conectores.

Conectores: conectan zonas de la red de arcos. Representan el acceso, salida y distancias a recorrer entre el centro de una zona y los nodos. Cada zona tiene que ser conectada al menos con un conector para poder conformar los pares origen – destino en el proceso de asignación. Una zona puede estar conectada a la red con cualquier número de nodos de conexión. Un conector corresponde a un acceso o ruta de salida entre el centroide de la zona y el nodo de conexión. Por consiguiente, un conector tiene dos direcciones.

Territorios: son objetos de la red, que se pueden utilizar, por ejemplo, para modelar los distritos o condados. Son indicadores basados en un polígono que define la frontera territorial.

En la Figura 6-1, se indica el interfaz del software PTV Visum 14, con el cual se realizó la modelación.

Figura 6-1. Interfaz de usuario PTV Visum 14



Fuente: Presente estudio – Visum 14

6.2.1 Oferta vial

Para la construcción de la red en Visum, es necesario tener claro las características de las vías: números de carriles, sentidos del flujo vehicular, movimientos en las intersecciones, entre otras.

De acuerdo a las visitas realizadas a la zona de estudio, ayudas digitales de Google Maps y la información secundaria obtenida del estudio realizado por TPD Ingeniería, se definen los sentidos de flujo de las principales vías de la zona de estudio, como se indica a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 6-1. Identificación de sentidos viales en las principales vías de la zona de estudio

Corredor	ID	Tramo	Sentido Vial
San Juan	CI 44	Av. Oriental – Av. Ferrocarril	Doble sentido Este –Oeste, Oeste – Este
Amador	CI 45	Av. Oriental – Av. Ferrocarril	Un solo sentido Oeste - Este
Maturín	CI 46	Av. Oriental – Av. Ferrocarril	Un solo sentido Oeste - Este
Pichincha	CI 48	Av. Oriental – Cr 51	Un solo sentido Este - Oeste
		Cr 53 - Av. Ferrocarril	Un solo sentido Este - Oeste
Ayacucho	CI 49	Av. Ferrocarril – Cr49	Un solo sentido Oeste - Este
		Cr 49 – Av. Oriental	Doble sentido Este –Oeste, Oeste

Corredor	ID	Tramo	Sentido Vial
			- Este
Colombia	CI 50	Cr 49 – Av. Oriental	Un sentido Oeste - Este
		Cr 51 – 56B	Un sentido Este - Oeste
		Cr 56B – hacia el Oeste	Doble sentido Este – Oeste y Oeste - Este
La Playa	CI 52	Cr 40 – Av. Oriental	Doble sentido Este – Oeste y Oeste - Este
		Av. Oriental – Cr 50	Un solo sentido Este - Oeste
De Greiff	CI 53	Cr 50 – Av. Ferrocarril	Un solo sentido Este - Oeste
Maracaibo	CI 53	Cr 51 – Av. Oriental – Cr 40	Un solo sentido Oeste – Este
Caracas	CI 54	Cr 42 – Av. Oriental – Cr 51	Un solo sentido Este - Oeste
Juanambú	CI 54	Cr 51 – Av. De Greiff	Un solo sentido Este – Oeste
La Paz	CI 57	Av. Ferrocarril – Cr 51 – Av. Oriental – Cr 43	Un solo sentido Oeste – Este
Av. Oriental - Echeverry	CI 58	Cr 46 – Av. Ferrocarril	Doble sentido Este – Oeste y Oeste - Este
Av. Oriental	Cr 46	CI 58 – CI 44 – CI 29	Doble sentido Sur - Norte y Norte - Sur
Sucre	Cr 47	Av. Oriental – CI 48	Un solo sentido Norte – Sur
Junín	Cr 49	CI 44 – CI 52	Un solo sentido Sur – Norte
Palacé	Cr 50	CI 44 – CI 58	Un solo sentido Sur – Norte
Bolívar	Cr 51	CI 37 – CI 45	Doble sentido Sur - Norte y Norte - Sur
		CI 45 – CI 53	Un solo sentido Sur - Norte
		CI 53 – CI 67	Doble sentido Sur - Norte y Norte - Sur
Cundinamarca	Cr 53	CI 45 – CI 58 – CI 67	Un solo sentido Sur - Norte
Cúcuta	Cr 54	CI 60 – CI 44	Un solo sentido Norte - Sur
Tenerife	Cr 55	CI 53 – CI 44	Un solo sentido Norte - Sur
Av. Ferrocarril	Cr 57	CI 37 – CI 44 – CI 50 – CI 58 – CI 67	Doble sentido Sur - Norte y Norte - Sur

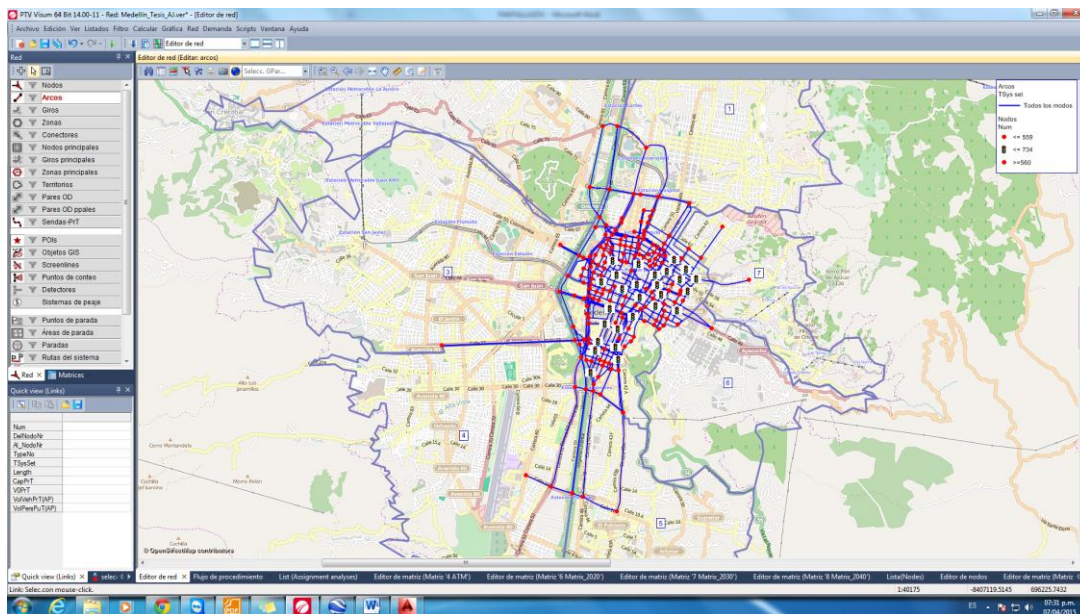
Fuente: Presente estudio

Se realiza la construcción de la red tomando como base y guía la red construida por TPD Ingeniería. Esta red está construida en detalle representando todas las intersecciones y los segmentos de vías de la parte céntrica de la ciudad (comuna La Candelaria) donde se definió realizar el presente estudio, para el resto de la ciudad y el Área Metropolitana del Valle del Aburra sólo se construyeron los arcos que representan a las principales vías conectoras con el centro, de tal forma que todos los puntos del AMVA queden comunicados con el centro de Medellín y a la vez entre ellos mismos y las demás zonas externas.

Los arcos en Visum representan las vías, con la información característica del tipo de vía; es así como la red está conformada por arcos de 5 tipos diferentes que representan las vías de 1, 2, 3, 4 y 5 carriles respectivamente. Cada tipo de arco está definido con parámetros de capacidad, velocidad a flujo libre, tipos de sistemas de transporte permitidos, modos de transporte con velocidades máximas establecidas legalmente por ejemplo para el auto y taxi velocidad máxima legalmente establecida en Colombia para las ciudades igual a 80 Km/h.

En la Figura 6-2, se indica la red de la zona de estudio elaborada en Visum.

Figura 6-2. Red en Visum de la zona de estudio



Fuente: Presente estudio – con base al estudio TPD

La oferta vial, representada en el modelo de red en Visum se construye para el escenario base actual del año 2014; es decir que las características y condiciones de movilidad representadas en la red corresponden a las sucedidas en el año 2014. De esta forma, no se tiene en cuenta los cambios ocurridos en la movilidad y el tránsito por las obras de construcción del Tranvía de Ayacucho y las del Parque del Rio; lo anterior con el fin de contar con la información secundaria y los aforos del estudio realizado por TPD Ingeniería, insumo necesario para calibrar y validar el modelo.

Debido a las condiciones de invasión de carriles y la obstrucción al derecho de circulación que actualmente se presenta en varias de las vías del centro de la ciudad, ocasionado por parqueos indebidos, vendedores informales, acopios y parqueos permitidos, es necesario reducir el número real de carriles de las vías afectadas (por lo general en estos puntos se reduce en un carril), de tal forma que el modelo de red represente las condiciones reales con las cuales circula el tráfico en el centro de la ciudad de Medellín.

En la Figura 6-3, se puede ver la red de Visum caracterizada por los diferentes tipos de arcos de acuerdo al número de carriles de las vías definidos según las condiciones de funcionamiento al año 2014.

Figura 6-3. Red en Visum con carriles de vías ajustados



Fuente: Presente estudio

6.2.2 Matrices de demanda

Por medio de conectores, los segmentos de vías de la red se comunican con las Zonas Integradas de Transporte (ZIT) para generar los viajes Origen Destino (OD); de esta forma se tiene una matriz de demanda con la información de viajes que se realizan para los diferentes modos de transporte.

Para alimentar el modelo se dispone de los resultados de la Encuesta Origen Destino de Hogares EODH – 2012, que originó matrices de viajes cuadradas de un tamaño igual al número de zonas ZIT estudiadas (477 x 477 zonas), para los diferentes modos de transporte en un día típico del AMVA. Por otro lado se tiene que el estudio realizado por TPD Ingeniería actualizó las matrices OD al año 2014 para la zona del centro de la ciudad; proceso realizado mediante aforos realizados en el 2014 en varios puntos del centro de la ciudad y posteriormente con dicha información, el ajuste de matrices OD fue

realizado con la función TFLOWFUZY⁵ del software Visum. De esta forma se tiene unas matrices actualizadas al año 2014.

Como el tamaño de las matrices es considerablemente grande, y la zona de estudio se ha definido en la comuna la Candelaria, se debe agregar las zonas ZIT externas en Zonas de Análisis de Transporte (ZAT), de la misma forma como se realizó en el estudio de viabilidad de peatonalización total o parcial de algunos tramos viales del centro de la ciudad de Medellín. Las zonas ZIT de la comuna La Candelaria (zona de estudio) no se agregan con el fin de obtener una representación óptima del comportamiento de los viajes entrantes y salientes de la zona.

En la siguiente Tabla se indica las zonas ZIT agregadas.

Tabla 6-2. Agregación de zonas de transporte para el estudio de viajes origen destino en la zona de estudio

Nueva zona principal	Municipios y comunas que incluye	Zonas ZIT que se agregan		
4501	Popular Santacruz Manrique Aranjuez	193 PLAYÓN DE LOS COMUNEROS - LA FRONTERA - PABLO VI	334 ANDALUCIA	346 SANTO DOMINGO SAVIO # 1
		194 LA ISLA	335 LA FRANCIA	347 SANTO DOMINGO SAVIO # 1
		197 VILLA NIZA	336 VILLA DEL SOCORRO	348 SANTO DOMINGO SAVIO # 1
		198 VILLA DEL SOCORRO	337 VILLA DEL SOCORRO	349 SANTO DOMINGO SAVIO # 1
		200 MOSCÚ # 1	338 GRANIZAL	350 SANTO DOMINGO SAVIO # 1
		203 BERLIN	339 GRANIZAL	351 SANTO DOMINGO SAVIO # 1
		204 LA PINUELA	340 POPULAR	352 SANTO DOMINGO SAVIO # 2
		205 ARANJUEZ	341 POPULAR	353 LA ESPERANZA # 2
		206 BERMEJAL LOS ÁLAMOS	342 POPULAR	354 LA AVANZADA
		207 MORAVIA	343 POPULAR	355 CARPINELO
		209 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA	344 POPULAR	356 EL COMPROMISO - ALDEA PABLO VI
		210 SEVILLA	222 LAS ESMERALDAS	358 ORIENTE
		211 SAN PEDRO	223 LAS GRANJAS	400 LA CRÚZ
		212 MANRIQUE CENTRAL # 1	224 LAS GRANJAS	2011 LA ROSA
		213 MANRIQUE CENTRAL # 2	225 LA SALLE	2012 SANTA CRÚZ
		214 MANRIQUE ORIENTAL	226 LA SALLE	2021 SAN ISIDRO
		215 VERSALLES # 1 - VERSALLES # 2	227 VILLA GUADALUPE	2022 PALERMO
		216 EL RAIZAL	228 MOSCÚ # 2	2081 JARDÍN BOTÁNICO

⁵ TFLOWFUZY es un procedimiento que hace parte del software Visum, permite ajustar matrices de demanda desactualizadas con la información de aforos levantada en campo sobre la red de estudio por medio de un proceso iterativo de comparación entre los datos de la matriz OD y los datos de aforos en ciertos puntos, hasta obtener una convergencia aceptable que se puede medir con el coeficiente de correlación cercano a 1, y o el indicador estadístico GEH.

Nueva zona principal	Municipios y comunas que incluye	Zonas ZIT que se agregan			
		217 EL POMAR 218 SANTA INÉS 219 CAMPO VALDÉS # 2 220 CAMPO VALDÉS # 1 333 LA FRANCIA 332 LA FRANCIA	229 SAN PABLO 230 GRANIZAL 330 ANDALUCIA 331 ANDALUCIA 345 POPULAR	2082 PARQUE J. EMILIO VALDERRAMA 2211 BRASILIA 2212 MIRANDA 3571 SAN JOSÉ DE LA CIMA # 1 3572 MARIA CANO CARAMBOLAS	
4502	Castilla 12 de Octubre Robledo	150 SANTA MARGARITA 152 CUCARACHO - PAJARITO 154 PALENQUE 155 FACULTAD DE MINAS 156 FACULDA DE VETERINARIA Y ZOOTECNIA DE LA UDEA 157 SAN GERMÁN 158 ECOPARQUE CERRO EL VOLADOR - CERRO EL VOLADOR 159 UNIVERSIDAD NACIONAL 160 PROGRESO 161 PROGRESO 162 LA PILARICA 163 ALTAMIRA - BOSQUES DE SAN PABLO 164 EL DIAMANTE 165 BELLO HORIZONTE - VILLA FLORA 166 AURES # 1 167 AURES # 2 168 PICACHO - PICACHITO	169 PROGRESO # 2 - EL TRIUNFO - MIRADOR DEL 12 170 12 DE OCTUBRE # 1 171 12 DE OCTUBRE # 1 172 SANTANDER 173 PEDREGAL 174 12 DE OCTUBRE # 2 175 SAN MARTÍN DE PORRES 176 LA ESPERANZA 177 KENEDY 178 LÓPEZ DE MESA - CÓRDOBA 179 CEMENTERIO UNIVERSAL 181 TERMINAL DE TRANSPORTE 182 OLEODUCTO 183 ALFONSO LÓPEZ 184 FRANCISCO ANTONIO ZEA 185 CASTILLA 186 TRICENTENARIO BELALCAZAR 187 GIRARDOT	189 BOYACA 190 PLAZA DE FERIAS - HECTOR ABAD GÓMEZ 191 LAS BRISAS 192 TOSCANA 239 CORREGIMIENTO DE SAN CRISTOBAL 242 CORREGIMEINTO DE PALMITAS 315 LA LOMA 1482 OLAYA HERRERA 1501 AURORA 1511 ROBLEDO 1512 FUENTE CLARA 1531 PALENQUE 1532 MONTE CLARO 1801 CARIBE 1802 CARIBE 1881 TEJELO 1882 FLORENCIA	
4503	Laureles Estadio La américa San Javier Otras zonas del noreste	104 LA CATELLANA 105 SANTA TERESITA 109 UPB 111 SAN JUAQUIN 112 BOLIVARIANA 113 LAURELES 114 LORENA 115 SIMÓN BOLIVAR 116 BARRIO CRISTOBAL 117 SANTA MÓNICA - DANUBIO 118 CAMPO ALEGRE	135 EL VELÓDROMO 136 FLORIDA NUEVA 137 NARANJAL 138 SURAMERICANA 139 SURAMERICANA 140 CARLOS E RESTREPO 141 CUARTA BRIGADA - BATALLÓN CUARTA BRIGADA 142 UNIDAD DEPORTIVA ATANASIO GIRARDOT 125 SAN JAVIER 126 ANTONIO NARIÑO - EL SOCORRO 127 JUAN XXIII - LA QUIEBRA	143 ESTADIO 144 LOS COLORES 145 FERRINI 146 CALASANZ 147 SANTA ROSA DE LIMA 149 PLAN PARCIAL ALTOS DE CALAZANS 316 LA IGUANÀ 1061 LAS ACACIAS 1062 LA CATELLANA 1081 LAURELES 1101 LOS CONQUISTADORES	

Nueva zona principal	Municipios y comunas que incluye	Zonas ZIT que se agregan		
		119 BELENCITO	128 LA PRADERA	1102 LOS CONQUISTADORES
		120 EL CORAZÓN - BETANIA	129 SAN JAVIER # 2	1311 LOS ALCAZARES
		121 NUEVOS CONQUISTADORES	130 CAMPO ALEGRE - EL DANUBIO	1312 SANTA LUCIA
		122 EL SALADO - EDUARDO SANTOS	132 LA FLORESTA	1481 CALASANIA - BLANQUIZAL - EL PESEBRE
		123 LAS INDEPENDENCIAS	133 LA AMÉRICA	134 LOS PINOS - EL VELÓDROMO
		124 20 DE JULIO		MUNICIPIOS DEL NOROESTE
4504	Guayabal Belén	078 GUAYABAL	374 FÁTIMA	384 BELÉN
		080 CAMPO AMOR	375 ROSALES	385 GRANADA
		081 CAMPO AMOR	376 ROSALES	386 GRANADA
		083 CAMPO AMOR - SANTA FÉ	377 ROSALES	387 SAN BERNARDO
		084 SANTA FÉ	378 BELÉN - LA PALMA	388 SAN BERNARDO
		092 LAS PLAYAS	379 LA PALMA	389 SAN BERNARDO
		094 EL RODEO	380 LA PALMA	390 LAS VIOLETAS
		096 EL RINCÓN	381 LA PALMA	391 LAS VIOLETAS
		097 LOMA DE LOS BERNAL	382 BELÉN	392 LAS VIOLETAS
		098 LA GLORIA	383 BELÉN	393 LAS VIOLETAS
		099 LA GLORIA - ALTAVISTA	364 TRINIDAD	0791 CRISTO REY
		100 ALTAVISTA	365 TRINIDAD	0792 CRISTO REY
		101 LOS ALPES	366 TRINIDAD	0821 JUAN PABLO SEGUNDO
		103 LAS MERCEDES	367 SANTA FÉ	0822 JUAN PABLO SEGUNDO
		107 NUEVA VILLA DE ABURRÁ - MIRAVALLE	368 TENCHE	0931 DIEGO ECHAVARRIA
		314 SECTOR AGUAS FRIAS	369 CERRO NUTIBARA	0932 DIEGO ECHAVARRIA
		360 TRINIDAD	370 Cerro Nutibara	0951 LA COLINA
		361 TRINIDAD	371 FÁTIMA	0952 LA HONDONADA
		362 TRINIDAD	372 FÁTIMA	1082 NOGAL LOS ALMENDROS
		363 TRINIDAD	373 FÁTIMA	CORREGIMIENTO ALTAVISTA DE
4505	El Poblado	053 BARRIO COLOMBIA	0621 EL TESORO	0691 LA AGUACATALA
		054 VILLA CARLOTA	0622 EL TESORO	0692 LA AGUACATALA
		055 VILLA CARLOTA	0641 LA FLORIDA	0701 LOS BALSOS # 2
		056 CASTROPOL	0642 LA FLORIDA	0702 EL CASTILLO
		057 LALINDE	0681 PATIO BONITO	0703 LOS BALSOS # 2
		058 LAS LOMAS # 1	067 ASTORGA	0704 EL CASTILLO
		059 LAS LOMAS # 2	071 ALEJANDRÍA	0721 LOS NARANJOS
		060 ALTOS DEL POBLADO	073 LOS BALSOS # 1	0722 LOS NARANJOS
		061 ALTOS DEL POBLADO	074 LOS BALSOS # 1	0751 SAN LUCAS
		063 ALEJANDRÍA	076 EL DIAMANTE # 2	0752 SAN LUCAS
		065 EL POBLADO	077 SANTA MARÍA DE LOS ÁNGELES	MUNICIPIOS DEL SURESTE
		066 MANILA	0682 PATIO BONITO	

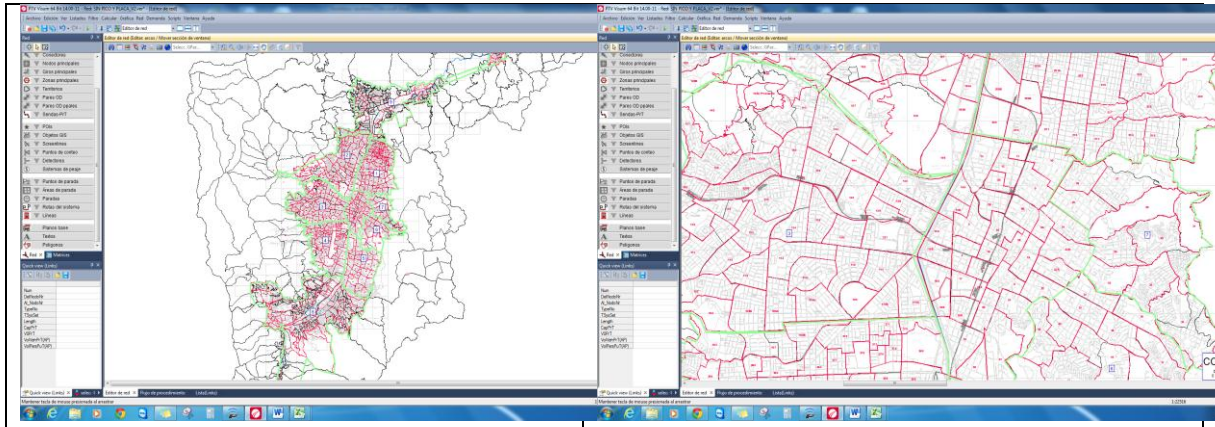
Nueva zona principal	Municipios y comunas que incluye	Zonas ZIT que se agregan		
4506	Buenos Aires	034 BARRIO CAYCEDO 035 BUENOS AIRES 036 MIRAFLORES 037 LOS CERROS EL VERGEL 038 ALEJANDO ECHAVARRIA	044 CATALUÑA - LA MILAGROSA 045 GERONA 046 EL SALVADOR 042 BARRIO DE JESÚS - JUAN PABLO SEGUNDO - 8 DE MARZO 043 BOMBONA # 2	047 LORETO 048 ASOMADERA # 3 049 ASOMADERA # 2 050 ASOMADERA # 1
4507	Villahermosa	025 SAN MIGUEL 026 LA MANSIÓN 027 VILLA HERMOSA 028 LA LADERA 029 ENCISO	032 EL PINAL 033 SUCRE 030 LOS MANGOS - 13 DE NOVIEMBRE 031 LLANADITAS	039 LA LIBERTAD - VILLATINA- SAN ANTONIO 040 VILLA LILINA 041 VILLA TUYBAY - LA SIERRA 243 CORREGIMIENTO DE SANTA ELENA
4508	Envigado Itagüí La Estrella Caldas Sabaneta Otras ZIT del sur	276 EL COLOMBIANO_2760 277 LOMA DEL BARRO_2770 278 SAN MARCOS_2780 279 BOSQUE DE ZUÑIGA_2790 280 Las Flores-La Pradera-El Guaima-Urbe Ángel-Zúñiga, La esmeralda, Gascaña_2800 281 MESA_2810 282 ENVIGADO CENTRO_2820 283 LA PAZ_2830 284 LA MINA_2840 285 SAN JOSÉ _2850 286 LAS ANTILLAS_2860 287 TORRES DE MARÍA_2870 288 BOMCEROS SABANETA_2880 290 CAMILO TORRES_4290 291 AVES MARIAS_2910 292 ZONA INDUSTRIAL ACIC_2920 293 UNIDAD DEPORTIVA SABANETA_2930 295 SAMARIA ROBLES DEL SUR_2950 296 LAS PALMAS_2960 297 SAN JOSE_2970 298 ZONA INDUSTRIAL No 1_2980 299 DOÑA MARIA DEL SUR_2990 300 LA ESMERALDA_3000 301 CENTRAL MAYORISTA_3010	432 HORIZONTES 433 LA CHINCA 434 EL PREDRERO 435 CHILE 436 CAQUETA 439 EL DORADO 441 INCOLMOTOS 445 PAN DE AZÚCAR 446 MARIA AUXILIADORA 447 LAS LOMITAS 450 CARMELITAS MISIONERAS 2771 SOFASA 2772 CENTRO INTEGRAL DE LAS VEGAS 2773 ALCALA 305 FÁTIMA_3050 306 SATEXCO_3060 307 PILSEN_3070 308 PORTAL DE LAS FLORES_3080 311 SANTA MARIA # 1_3110 312 ZONA RURAL # 2_3120 326 CORREGIMIENTO DE SAN ANTONIO DE PRADO_3260 421 CORREGIMIENTO DE SAN ANTONIO DE PRADO_4210 422 CORREGIMIENTO DE SAN ANTONIO DE PRADO_4220 423 CORREGIMIENTO DE SAN ANTONIO DE PRADO_4230	2791 BOSQUE DE ZUÑIGA 2792 EL ESMERALDAL 2793 LOMA EL ATRAVESAO 2794 LOMA DEL CHOCHO 2795 CAMBRAY 2801 LOMA LAS BRUJAS 2881 2881 2900 SIERRA MORENA 2981 ESPUMAS MEDELLÍN 3111 PARQUE SANTANDER 3112 SIUBESTACIÓN DE ENERGÍA 3113 TERCER MILENIO 3114 RODRIGO ARENAS BETANCUR 3115 TALLER INDUSTRIAL ALPO 3116 LOS LAGOS 4461 LA FELISA 4462 EL LUCERO 426 LA OSPINA 427 EL TANQUE 428 FERROCARRILES NACIONALES 424 LA FERREIRA 304 ZONA RURAL_3040 DEPARTAMENTOS OCCIDENTE DEPARTAMENTOS SUR

Nueva zona principal	Municipios y comunas que incluye	Zonas ZIT que se agregan		
		302 SAN FERNANDO_3020	303 SANTA MARIA # 2_3030	CORREGIMIENTO DE SAN ANTONIO DE PRADO_2410
4509	Bello Girardota Copacabana Barbosa Otras ZIT del norte	244 BELLO	2701 GIRARDOTA	2713 BARBOSA
		245 BELLO	2702 GIRARDOTA	2714 BARBOSA
		246 BELLO	2703 GIRARDOTA	2715 BARBOSA
		247 BELLO	2704 GIRARDOTA	2716 BARBOSA
		248 BELLO	2705 GIRARDOTA	2717 BARBOSA
		249 BELLO	2706 GIRARDOTA	2718 BARBOSA
		250 BELLO	2707 GIRARDOTA	2719 BARBOSA
		251 BELLO	2708 GIRARDOTA	2673 COPACABANA
		252 BELLO	2711 BARBOSA	2674 COPACABANA
		253 BELLO	2712 BARBOSA	2675 COPACABANA
		254 BELLO	264 BELLO	2676 COPACABANA
		255 BELLO	265 BELLO	DEPARTAMENTOS NORTE
		256 BELLO	266 BELLO	DEPARTAMENTOS ORIENTE
		257 BELLO	2492 INDUSTRIAL No 2	MUNICIPIOS DEL NORESTE
		258 BELLO	2671 COPACABANA	MUNICIPIOS DEL CENTRO
		259 BELLO	2672 COPACABANA	MUNICIPIOS DEL METRO
		260 BELLO	2721	2728
		261 BELLO	2722	2729
		262 BELLO	2723	2730
		263 BELLO	2724	2731
2726	2725	2732		
2727	2734	2733		

Fuente: Presente estudio

En la Figura 6-4, se puede observar las zonas ZIT agregadas dentro de las macrozonas ZAT en el software Visum.

Figura 6-4. Zonas ZIT agregadas - vistas en el software Visum



Fuente: Presente estudio – Visum 14

Como resultado se tiene una matriz origen destino cuadrada de 44x44, en donde están agrupados todos los viajes de las macrozonas que tienen influencia con las diferentes zonas ZIT del centro de la ciudad. Los números y nombres de las zonas ZIT que conforman el centro de la ciudad en la comuna la Candelaria y que no se agregan se indican en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3. Zonas ZIT centro

No.	Nombre ZIT	No.	Nombre ZIT
1A	La Candelaria	14B	San Benito
1B	La Candelaria	15A	Corazón de Jesús
2A	Jesús Nazareno	15B	Corazón de Jesús
2B	Estación Villa	16A	La Alpujarra
3	San Benito	16B	La Alpujarra
4	Guayaquil	17	Centro Administrativo
5	Guayaquil	18A	Calle nueva
6	Colón	18B	Calle nueva
7A	La Candelaria	19	Perpetuo Socorro
7B	La Candelaria	20	Colón
8A	Villa Nueva	21	Las Palmas
8B	Villa Nueva	22	Bombona # 1
9	Prado	23A	Boston
10	Prado	23B	Boston
11A	Hospital San Vicente de Paul	24	Los ángeles
12	Jesús nazareno	51	San Diego
13	El chagualo	52	Perpetuo Socorro
14A	San Benito		

Fuente: Presente estudio

Para la modelación se utilizaron las matrices actualizadas por TPD para los modos de transporte: auto, taxi y moto que corresponden a la hora de máxima demanda (17:15 a 18:15 horas) según la información de aforos realizada por TPD. De esta forma queda definida la hora de modelación.

La matriz camión se calcula a partir de la información de la encuesta origen destino de carga externa e interna realizada en los peajes de la ciudad y establecimientos comerciales del AMVA en el año 2012. Los resultados de cada matriz se agregan al mismo tamaño 44x44 pares OD, luego se convierten en Autos Directos Equivalentes (ADEs) y se suman para formar una sola matriz; cómo la matriz total corresponde a un día típico, se toma el 15% de ella para simular los viajes en el periodo de modelación que corresponde al hora de máxima demanda.

Para el caso de los vehículos de Transporte Público Colectivo (TPC), como los buses no tienen un origen destino, sino que su funcionamiento está en base a unas rutas, frecuencias y horarios preestablecidos, la cantidad de ellos medidos en los aforos son convertidos en ADEs y se precargan como un volumen básico en los arcos que conforman la red Visum.

En la Tabla 6-4, se indican los totales de vehículos equivalentes en cada una de las matrices que alimentan la red para la hora de máxima demanda modelada, que tienen origen o destino en la comuna la Candelaria y que serán asignados por el software.

Tabla 6-4. Autos Directos Equivalentes (ADEs) que componen la demanda de la red Visum para la asignación de transporte

Matriz - Vehículo	Autos Directos Equivalentes (ADEs)
Auto	16.917
Taxi	9.415
Moto	5.175
Camión	2.690
TPC	Precarga en los arcos

Fuente: Presente estudio

Los anteriores valores de las matrices corresponden al número de autos directos equivalentes (ADEs), utilizándose las siguientes equivalencias indicadas en la Tabla 6-5.

Tabla 6-5. Factores para convertir ADEs

Tipo de Vehículo	ADE
Auto	1,0
Taxi	1,0
Camión	2,5
TPC	2,0

Tipo de Vehículo	ADE
Moto	0,5
Bicicleta	0,3

Fuente: HCM - 2000

6.3 Modelación del transporte en el escenario base

El escenario base corresponde la asignación de los vehículos a la red de acuerdo a las matrices origen destino determinadas y con la característica especial que la matriz modo auto represente un escenario sin pico y placa (escenario base para comparación y análisis de resultados); es decir que esta matriz deberá incrementarse en un porcentaje igual a la restricción de pico y placa llevada a cabo en el año base 2014, en aquellas zonas donde aplica la medida.

Para modelar el escenario base, es necesario primero asignar los vehículos a la red en la situación actual, que corresponde a la realidad en que se recogieron los datos de la demanda y oferta mediante las encuestas origen destino y aforos.

6.3.1 Asignación del transporte en la situación actual

Tanto en el año 2012, como en el 2014 que se levantó los estudios, en Medellín y en especial en la zona de estudio, aplicaba la medida de restricción vehicular de pico y placa con 4 números diferentes por cada día para las placas de los vehículos particulares, y en los horarios de hora pico de mañana y hora pico de la tarde. De esta forma la situación actual del modelo corresponde al de pico y placa que regía en la ciudad de Medellín en el año 2014, que por cierto en el 2015 sigue siendo la misma restricción.

Obtenida la red y la información de la demanda, se procede a correr el modelo, para ello se debe definir antes parámetros, condiciones y variables de asignación:

- Tipo de modelo según la asignación

Se realizó una modelación estática basada en el modelo estándar de 4 etapas, con modelo de asignación de equilibrio fundamentado en los *principios de Wardrop*⁶, los cuales en resumen tienen los siguientes supuestos:

⁶ John Glen Wardrop (1886–1969), analista de transporte quien en 1952 reveló en su artículo "Some theoretical aspects of road traffic research" dos principios básicos para la asignación de tráfico en redes, que son mundialmente conocidos como los Principios de Wardrop. Estos principios son utilizados en los modelos de equilibrio de red para la predicción de los patrones de tráfico en las redes de transporte que estén sujetos a la congestión.

- Los viajeros conocen todos los caminos que llevan a su destino.
 - Los viajeros conocen los costos de cada camino.
 - Si existe un camino más corto, con seguridad será utilizado por los viajeros.
 - Se llega al equilibrio cuando los tiempos de los usuarios de cada par origen destino no puede disminuir más.
-
- Funciones Volumen – Demora:

También conocidas como funciones de congestión porque consideran y especifican el efecto de la capacidad de la infraestructura sobre los tiempos de viaje, relacionando el tiempo de viaje de cada arco con el flujo. Habitualmente las funciones volumen – demora multiplican el tiempo a flujo libre por una función en la que el volumen es normalizado al ser dividido entre la capacidad (Márquez, García y Guarín, 2014).

$$t = t_0 * f(v/c) \quad (1)$$

Donde;

- t: Tiempo de viaje del arco.
- t₀: Tiempo de viaje a flujo libre.
- v: Volumen sobre arco.
- c: Capacidad del arco.

En la ecuación (1), se debe considerar el costo marginal en el tiempo por la adición de un vehículo al flujo, el cual se representa en la siguiente ecuación:

$$C_{mg} = t + v \frac{\partial t}{\partial v} \quad (2)$$

En la ecuación (2), C_{mg} = costo marginal, el primer término corresponde al tiempo medio del arco (t) y el segundo término hace referencia a la adición de la contribución marginal del tiempo como efecto externo, y corresponde a los tiempos adicionales impuestos a los demás usuarios del arco cuando un nuevo vehículo ingresa al sistema.

Funciones más comunes.

- Función BPR: por su sigla en inglés (*Bureau of Public Roads*), desarrollada en 1964, tiene la notación de la ecuación (1) y se expresa de la siguiente manera:

$$t = t_0 * \left[1 + \alpha \left(\frac{v}{c} \right)^\beta \right] \quad (3)$$

Donde, α y β son los parámetros a calibrar de la función. La primera derivada de la ecuación (3) representa la función de costo marginal de la BPR, indicada en la ecuación (4).

$$C_{mg} = t_0 * \left[1 + \alpha \left(\frac{v}{c} \right)^\beta (1 + \beta) \right] \quad (4)$$

- Función cónica: Las funciones de volumen demora tipo cónico tienen algunas ventajas sobre las BPR tradicionales; las primeras tienen un gradiente más alto para los valores bajos de la relación v/c , es decir son más sensibles y tienen una variación más suave para las relaciones v/c superiores a 1. Esto permite que los tiempos de viaje de los arcos cuyos volúmenes sean cercanos a su capacidad, sean más coherentes que en el caso de las BPR (Instituto de desarrollo Urbano [IDU], n.d). La función cónica se expresa de la siguiente forma, teniendo en cuenta la notación utilizada anteriormente:

$$t = t_0 * \left[2 + \sqrt{\alpha^2 \left(1 - \frac{v}{c} \right)^2 + \beta^2} - \alpha \left(1 - \frac{v}{c} \right) - \beta \right] \quad (5)$$

Donde, α y β son los parámetros a calibrar de la función, siendo α cualquier número mayor que 1 y β depende de α , según la ecuación (6) (Márquez et al., 2014).

$$\beta = \frac{2\alpha - 1}{2\alpha - 2} \quad (6)$$

Existen otras funciones como la de Akcelik, Cuadrática, Exponencial, Logística, entre otras, las cuales en nuestro medio son poco conocidas y utilizadas en trabajos de modelación.

Las funciones volumen demora utilizadas y los valores de los parámetros α y β , se explica más adelante en la calibración del modelo.

6.3.2 Calibración del modelo de asignación de transporte en la situación actual

El proceso de calibración se realiza mediante procesos iterativos de asignación, cambiando el grupo de funciones volumen demora o ligeramente los valores de un grupo predefinido. Posteriormente se realiza variaciones pequeñas de las velocidades a flujo libre de los arcos en los puntos críticos; combinando estos dos pasos se realizan simulaciones y se observa el comportamiento de la asignación mediante la comparación de los volúmenes.

La calibración del modelo de asignación del transporte se realizó mediante la comparación de los volúmenes de vehículos asignados en los arcos Vs lo volúmenes de vehículos observados y cuantificados en los aforos para la hora de modelación. La información de aforos se toma de los realizados por TPD Ingeniería en el año 2014.

Como medida de chequeo se utiliza el indicador estadístico GEH y el coeficiente de correlación (R^2) de las regresiones lineales de los volúmenes observados Vs los volúmenes asignados por el software.

El indicador estadístico GEH, recibe su nombre en honor al investigador Geoffrey E. Havers, que lo inventó en la década de 1970 mientras trabajaba como planificador de transporte en Londres. Esta fórmula empírica permite obtener un índice de la relación de los volúmenes observados en campo contra los volúmenes asignados en el modelo (Dowling, Skabardonis y Alexiadis, 2004). La forma de cálculo se indica en la ecuación (7).

$$GEH = \sqrt{\frac{2*(q_{obs} - q_{sim})^2}{(q_{obs} + q_{sim})}} \quad (7)$$

Donde:

q_{obs} = flujo vehicular observado en el periodo considerado

q_{sim} = flujo vehicular simulado en el periodo considerado

Los planteamientos teóricos del estadístico sugieren que un GEH menor de 5,0, considera una buena correspondencia entre lo observado y lo modelado en el periodo de análisis (valor considerado en microsimulación). GEH mayores de 5,0 y menores de 10,0, pueden justificar una investigación (valores aceptables en macrosimulación). Si el GEH es superior a 10,0, existe una probabilidad de que existe un problema con el modelo relacionado con alguna de las diferentes variables que lo conforman.

En modelos de asignación macroscópicos se suele considerar que del total de GEH evaluados, el mayor número de ellos (más del 60%) este entre el rango 5,0 y 10,0.

En el proceso de calibración, se utilizó dos grupos de funciones volumen - demora y se seleccionó las que mejor comportamiento presentaron en la asignación. Estas funciones son:

- *Grupo de funciones volumen demora utilizadas en el modelo de asignación por TPD Ingeniería:* Las funciones utilizadas son la BPR y la cónica con los parámetros indicados en la Tabla 6-6.

Tabla 6-6. Función volumen demora utilizadas de TPD

Tipo de arco	Función Volumen demora	Valor de los parámetros	
		α	β
1 Carril	BPR	0,5323	1,9477
2 Carriles	BPR	1,026	2,822
3 Carriles	Cónica	1,49	2,0
4 Carriles	Cónica	1,10	6,0
5 Carriles	Cónica	1,201	3,5

Fuente: TPD Ingeniería (2014)

- *Grupo de funciones volumen demora obtenidas en el estudio de “Formulación del plan maestro de movilidad para la región de Metropolitana del Valle de Aburra”, Este estudio fue realizado con la información de la encuesta origen destino 2005 por el Consorcio de Movilidad Regional de Chile, CMR (2007). La función volumen demora utilizada fue la BPR; la calibración del modelo para toda el AMVA arrojó como resultado 10 tipos de arco con diferentes valores de los parámetros α y β , de acuerdo a las condiciones de las vías (Jerarquía de la vía, número de carriles y porcentaje de pendiente). Para el modelo de asignación de la zona de estudio se utilizaron los parámetros indicados en la Tabla 6-7.*

Tabla 6-7. Función volumen demora utilizadas de CMR

Tipo de arco	Función Volumen demora	Valor de los parámetros	
		α	β
1 Carril	BPR	1,73	1,20
2 Carriles	BPR	2,87	1,40
3 Carriles	BPR	1,73	1,35
4 Carriles	BPR	2,77	1,96
5 Carriles	BPR	2,44	2,38

Fuente: Informe final estudio CMR (2007)

Se tomaron 50 arcos localizados en diferentes puntos por donde hay mayor flujo de tráfico y en sitios que representen la totalidad de la red, en especial dentro de la zona de estudio. Los resultados de las asignaciones al máximo punto de calibración evaluado en vehículos equivalentes para los dos grupos de funciones volumen – demora fueron los siguientes:

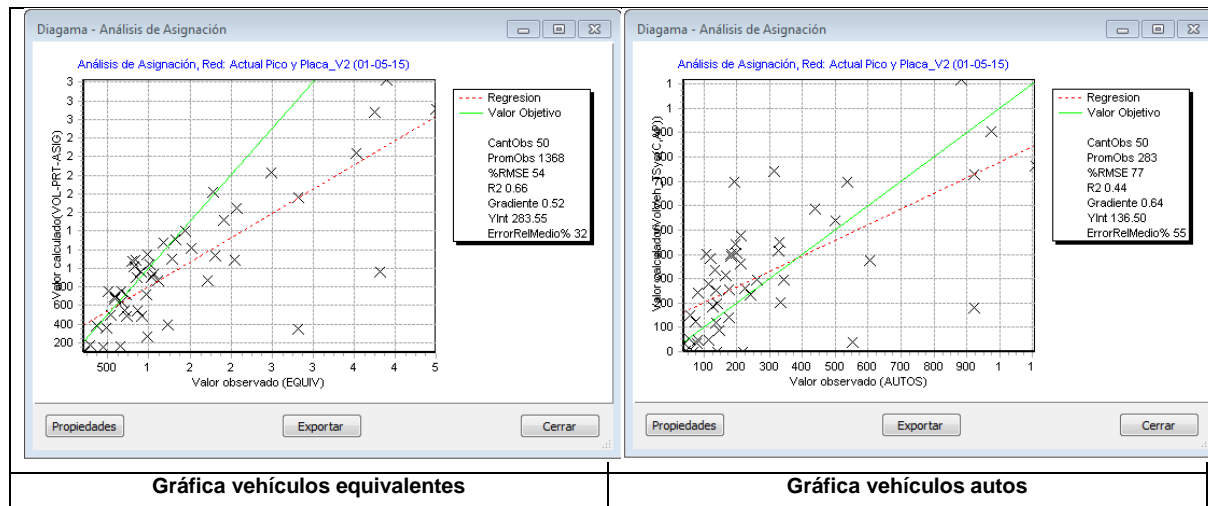
Para las funciones volumen – demora del plan maestro de movilidad realizado en el 2009 se obtuvo una correlación lineal con un $R^2 = 0,75$, y un 50% (de 50 segmentos evaluados) de indicadores GEH con valores entre 0 y 10. (Lo que significa que en el 50% de los puntos evaluados, las variaciones entre el volumen de vehículos equivalentes aforados y el volumen de vehículos equivalentes asignados son menores al 10%.

Para las funciones volumen – demora utilizadas por TPD Ingeniería (2014), se obtuvo una correlación lineal con un $R^2 = 0,66$ (ver Gráfica 6-1), y un 68% (de 50 segmentos evaluados) de indicadores GEH con valores entre 0 y 10; entendiéndose que en el 68% de los puntos evaluados, las variaciones entre el volumen de vehículos equivalentes aforados y el volumen de vehículos equivalentes asignados son menores al 10%.

Se considera que el parámetro que permite obtener una mejor comparación es el GEH, por tanto, de los dos grupos de funciones volumen – demora evaluadas, las utilizadas por TPD permite obtener mejores resultados; por tanto se calibra el modelo con estas funciones.

Adicionalmente, se revisa la calibración para los vehículos auto, obteniéndose un $R^2 = 0,44$ y GEH de 62% lo que significa para éste último, que del total de los puntos evaluados, el 62% de las variaciones comparadas entre el volumen de vehículos tipos auto aforados y el volumen de vehículos tipo auto asignados son menores al 10%. En la Gráfica 6-1, se indica los resultados de calibración referentes a la correlación lineal para vehículos equivalentes y autos; y en la Tabla 6-8, los resultados de los cálculos de los valores del estadístico GEH.

Gráfica 6-1. Calibración modelo de asignación



Fuente: Presente estudio

Tabla 6-8. Resultados cálculo estadístico GEH

No.	Intersección	Corredor	ID	Tramo	Sentido	Autos Visum	Equiv. Visum	HEG _{Autos}	HEG _{Equiv.}	Chequeo _{Autos}	Chequeo _{Equiv.}
1	AV_BOLIVAR_X_CL_44	Bolívar	Cr 51	Cl 44 - Cl 41	N - S	587	1307	6,5	0,3	OK	OK
2			Cr 51	Cl 41 - Cl 44	S - N	383	910	16,4	2,0	Malo	OK
3			Cr 51	Cl 44 - Cl 45	S - N	404	960	18,4	1,9	Malo	OK
4		San Juan	Cl 44	Cr 50 - Cr 51	E - W	1119	3029	7,4	14,7	OK	Malo
5			Cl 44	Cr 52 - Cr 51	W - E	767	2676	11,2	19,0	Malo	Malo
6	AV_BOLIVAR_X_CL_45	Amador	Cl 45	Cr 51 - Cr 50	W - E	53	104	0,27	9,37	OK	OK
7	AV_BOLIVAR_X_CL_46	Bolívar	Cr 51	Cl 46 - Cl 48	S - N	337	937	13,23	3,92	Malo	OK
8		Maturín	Cl 46	Cr 51 - Cr 50	W - E		161	11,75	24,35	Malo	Malo
9	AV_BOLIVAR_X_CL_49	Bolívar	Cr 51	Cl 49 - Cl 50	S - N	744	1401	18,7	1,1	Malo	OK
10		Ayacucho	Cl 49	Cr 51 - Cr 50	W - E	452	1147	6,1	5,1	OK	OK
11	AV_BOLIVAR_X_CL_50	Colombia	Cl 50	Cr 50 - Cr 51	E - W	258	1276	5,57	2,89	OK	OK
12	CL_45_X_KR_54	Amador	Cl 45	Cr 55 - Cr 54	W - E	140	486	2,94	9,86	OK	OK
13			Cl 45	Cr 54 - Cl 53	W - E	140	548	3,01	11,83	OK	Malo
14	CL_46_X_KR_54	Maturín	Cl 46	Cr 54 - Cr 53	W - E		269	16,85	28,48	Malo	Malo
15	CL_48_X_KR_54	Pichincha	Cl 48	Cr 53 - Cr 54	E - W	34	152	0,83	4,04	OK	OK
16			Cl 48	Cr 54 - Cr 55	E - W	34	94	5,88	21,46	OK	Malo
17	CL_49_X_KR_54	Cúcuta	Cr 54	Cl 50 - Cl 49	N - S	441	1144	13,79	17,17	Malo	Malo
18		Ayacucho	Cl 49	Cr 55 - Cr 54	W - E	541	1651	1,84	9,71	OK	OK
19	CL_50_X_KR_54	Cúcuta	Cr 54	Cl 51 - Cl 50	N - S	700	1828	23,99	1,04	Malo	OK
20		Colombia	Cl 50	Cr 54 - Cr 55	E - W	700	2034	6,64	9,65	OK	OK
21	CL_52_X_KR_47	Sucre	Cr 47	Cl 53 - Cl 52	N - S	395	1050	12,47	1,18	Malo	OK
22	CL_52_X_KR_50	Sucre	Cr 50	Cl 50 - Cl 52	S - N	297	1082	2,03	9,19	OK	OK
23		Av. La Playa	Cl 52	Cr 49 - Cr 50	E - W	262	1097	2,30	23,83	OK	Malo
24			Cl 52	Cr 50 - Cr 51	E - W	314	1521	9,63	9,44	OK	OK
25	CL_52_X_AV_BOLIVAR	Bolívar	Cr 51	Cl 53 - Cl 52	N - S	125	506	4,89	1,44	OK	OK
26			Cr 51	Cl 52 - Cl 53	S - N	73	722	1,99	8,46	OK	OK
27	CL_53_X_KR_54	Cúcuta	Cr 54	Cl 54 - Cl 53	N - S	89	490	5,34	15,97	OK	Malo
28			Cr 54	Cl 53 - Cl 52	N - S	400	1103	12,71	5,29	Malo	OK
29	CL_54_X_KR_43	Caracas	Cl 54	Cr 42 - Cr 43	E - W	48	366	4,11	5,41	OK	OK
30	CL_54_X_KR_46	Oriental	Cr 46	Cl 53 - Cl 54	S - N	40	354	29,79	61,87	Malo	Malo
31		Caracas	Cl 54	Cr 45 - Cr 46	E - W	296	902	2,63	4,27	OK	OK
32			Cl 54	Cr 46 - Cr 47	E - W	188	701	4,86	4,29	OK	OK
33	CL_54_X_KR_50	Palace	Cr 50	Cl 53 - Cl 54	S - N	254	725	8,29	0,19	OK	OK
34		Caracas	Cl 54	Cr 49 - Cr 50	E - W	278	759	11,63	3,64	Malo	OK
35	AV_BOLIVAR_X_CL_41	Los Huesos	Cl 41	Cr 51 - Cr 52	E - W	407	753	11,88	9,58	Malo	OK
36			Cl 41	Cr 51 - Cr 50	W - E	235	869	0,52	7,57	OK	OK
37	AV_BOLIVAR_X_CL_37	Bolívar	Cr 51	Cl 38 - Cl 37	N - S	120	549	1,41	6,30	OK	OK
38			Cr 51	Cl 36 - Cl 37	S - N	361	674	8,74	3,71	OK	OK
39	KR_46_X_CL_47	Oriental	Cr 46	Cl 48 - Cl 47	N - S	905	2246	2,28	23,88	OK	Malo
40			Cr 46	Cl 45 - Cl 47	S - N	181	969	31,61	58,25	Malo	Malo
41		Maturín	Cl 47	Cr 49 - Cr 47	W - E		393	20,93	29,23	Malo	Malo
42	CL_46_X_KR_53	Cundinamarca	Cr 53	Cl 45 - Cl 46	S - N	149	383	9,07	0,98	OK	OK
43	KR_50_X_CL_49	Palace	Cr 50	Cl 48 - Cl 49	S - N	244	1018	12,59	6,50	Malo	OK
44	CL_50_X_KR_55	Tenerife	Cr 55	Cl 51 - Cl 50	N - S	416	1222	4,67	7,97	OK	OK
45	CL_41_X_KR_44	Los Huesos	Cl 41	Cr 44 - Cr 45	E - W	200	642	4,52	1,05	OK	OK
46			Cr 44	Cl 44 - Cl 41	N - S	477	1089	14,15	8,19	Malo	OK
47	CL_45_X_KR_55	Tenerife	CR 55	CL 46 - Cr 45	N - S	6	179	7,72	7,19	OK	OK
48	KR_56_AVE_EI RIO_GLORIETA	De Greiff	Cr 56	Cl 55 - Cl 57	S - N	377	1770	10,25	21,84	Malo	Malo
49			Cr 56	Cl 57 - Cl 58	S - N	728	2714	6,82	29,75	OK	Malo
50		Glorieta	Cl 57	Cl 54 - Cl 57	E - W	205	877	7,75	23,39	OK	Malo
Suma Ok										31	34
% Buenos										62%	68%

Fuente: Presente estudio

De igual forma, en algunos puntos se realiza una revisión de las velocidades de operación de los vehículos en hora pico simulada en el software Visum, comparadas con las velocidades de viaje medidas en campo por TPD Ingeniería en el año 2014, para el mismo periodo de análisis. En la Tabla 6-9, se indica el comparativo de velocidades en 12 tramos de vías. Al comparar estos datos se obtiene una correlación con un R^2 igual a 0,778; como se puede observar en la Gráfica 6-2. Este valor se considera aceptable para la calibración del modelo de macrosimulación.

Tabla 6-9. Comparativo velocidades del modelo Vs velocidades medidas en campo

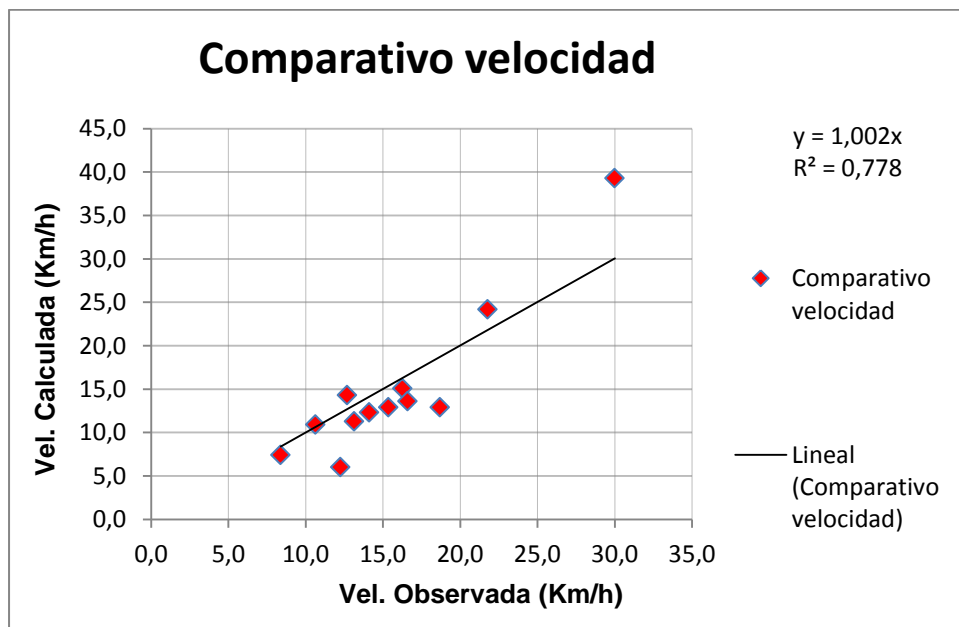
Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen en ADEs/h	ADEs-Km	Velocidad en arco (Km/h)	Velocidad media en tramo (Km/h)	Velocidad aforo (Km/h)
Bolívar	Cr 51	CI 45 - CI 46	S - N	0,173	843	145,839	19,0	13,14	11,30
	Cr 51	CI 46 - CI 48	S - N	0,11	937	103,070	14,0		
	Cr 51	CI 48 - CI 49	S - N	0,099	1258	124,542	9,0		
	Cr 51	CI 49 - CI 50	S - N	0,097	1401	135,897	10,0		
	Cr 51	CI 50 - CI 51	S - N	0,241	40	9,640	20,0	16,26	15,10
	Cr 52	CI 51 - CI 52	S - N	0,111	1251	138,861	16,0		
Tenerife	Cr 55	CI 53 - CI 52A	N - S	0,071	271	19,241	17,0	14,10	12,30
	Cr 55	CI 52A - CI 51	N - S	0,106	1206	127,836	13,0		
	Cr 55	CI 51 - CI 50	N - S	0,078	1222	95,316	15,0		
Amador	CI 45	A.Ferrocarril - Cr 55	W - E	0,105	344	36,120	21,0	18,68	12,90
	CI 45	Cr 55 - Cr 54	W - E	0,109	486	52,974	22,0		
	CI 45	Cr 54 - Cr 53	W - E	0,135	548	73,980	16,0		
	CI 45	Cr 53 - Cr 52A	W - E	0,068	109	7,412	13,0		
	CI 45	Cr 52A - Cr 51	W - E	0,145	99	14,355	13,0		
	CI 45	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,098	104	10,192	24,0		
	CI 45	Cr 50 - Cr 49	W - E	0,031	118	3,658	21,0		
Maturín	CI 46	Cr 55 - Cr 54	W - E	0,107	172	18,404	16,0	15,36	12,90
	CI 46	Cr 54 - Cr 53	W - E	0,123	269	33,087	16,0		
	CI 46	Cr 53 - Cr 52A	W - E	0,062	185	11,470	16,0		
	CI 46	Cr 52A - Cr 51	W - E	0,147	201	29,547	14,0		
Colombia	CI 50	Cr 51 - Cr 53	E - W	0,216	1798	388,368	8,0	8,38	7,4
	CI 50	Cr 53 - Cr 54	E - W	0,177	1348	238,596	9,0		
Av. La Playa - De Greiff	CI 52	Oriental - Cr 47	E - W	0,097	328	31,816	22,0	16,59	13,60
	CI 52	Cr 47 - Cr 49	E - W	0,101	539	54,439	19,0		
	CI 52	Cr 49 - Cr 50	E - W	0,158	1097	173,326	16,0		
	CI 52	Cr 50 - Cr 51	E - W	0,052	1481	77,012	14,0		
	CI 53	Cr 51 - Cr 52	E - W	0,068	1409	95,812	15,0		
	CI 53	Cr 52 - Cr 53	E - W	0,105	1252	131,460	11,0	12,69	14,30

Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen en ADEs/h	ADEs-Km	Velocidad en arco (Km/h)	Velocidad media en tramo (Km/h)	Velocidad aforo (Km/h)
Av. Oriental	Cr 46	Cl 44 - Cl 45	S - N	0,086	969	83,334	11,0	12,24	6,00
	Cr 46	Cl 45 - Cl 47	S - N	0,168	969	162,792	11,0		
	Cr 46	Cl 47 - Cl 49	S - N	0,186	297	55,242	13,0		
	Cr 46	Cl 49 - Cl 50	S - N	0,198	484	95,832	15,0		
	Cr 46	Cl 50 - Cl 49	N - S	0,083	1157	96,031	17,0	10,63	10,90
	Cr 46	Cl 49 - Cl 48	N - S	0,102	1312	133,824	14,0		
	Cr 46	Cl 48 - Cl 46	N - S	0,079	2246	177,434	11,0		
	Cr 46	Cl 46 - Cl 45	N - S	0,103	2548	262,444	10,0		
	Cr 46	Cl 45 - Cl 44	N - S	0,228	1602	365,256	8,0		
Av. Los Huesos	Cl 41	Av. Oriental - Cr 48	E - W	0,064	398	25,472	24,0	21,78	24,20
	Cl 41	Cr 48 - Cr 50	E - W	0,089	129	11,481	24,0		
	Cl 41	Cr 50 - Cr 51	E - W	0,088	202	17,776	23,0		
	Cl 41	Cr 51 - Cr 52	E - W	0,077	753	57,981	20,0		
San Juan	Cl 44	A. Ferrocarril - Cr 52	W - E	0,651	1958	1274,658	30,0	30,00	39,30

Fuente: Presente estudio

En la anterior tabla, el valor de la velocidad media se obtiene del promedio ponderado de velocidades de los tramos con el flujo vehicular en ADEs y la longitud del segmento de vía.

Gráfica 6-2. Correlación comparativo velocidades

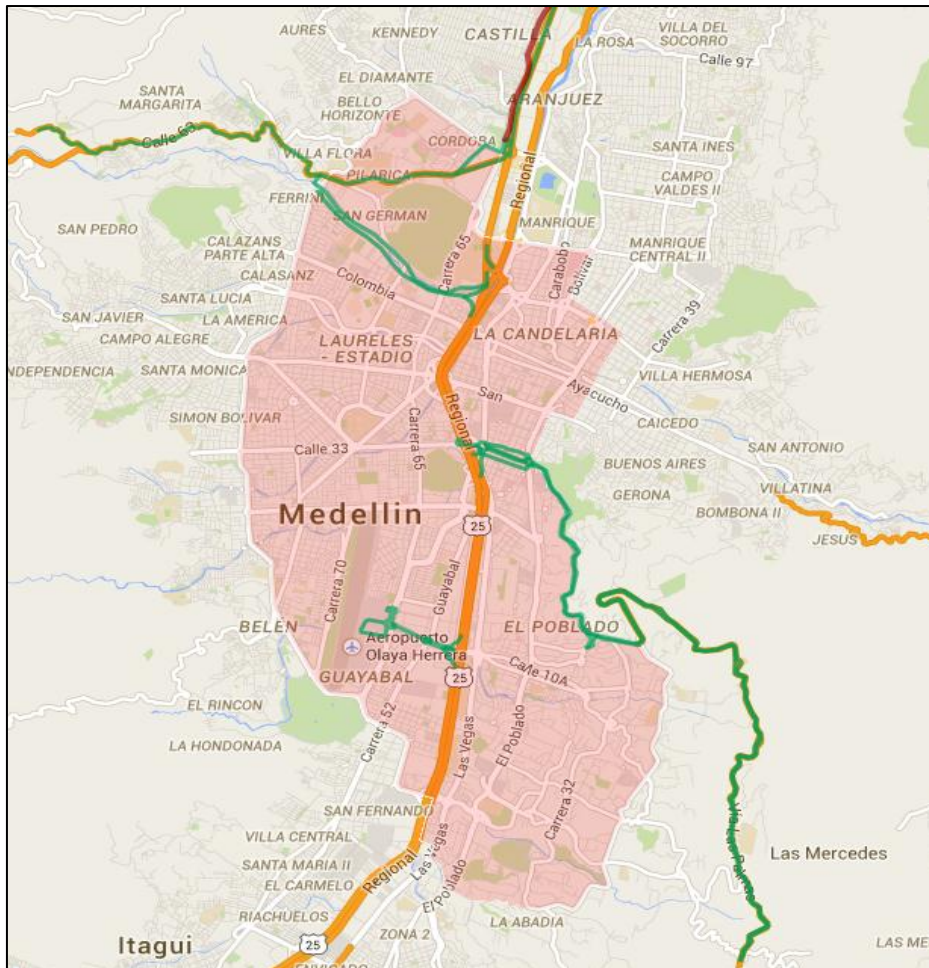


Fuente: Presente estudio

6.4 Modelación del transporte en el escenario base sin pico y placa

Corresponde al escenario donde se elimina la medida del pico y placa para los vehículos particulares que en el escenario 2014, tenían la restricción de circular en determinadas zonas (entre ellas la zona de estudio). En la Figura 6-5, se indica las zonas de aplicación de la medida de pico y placa en la ciudad de Medellín en el año 2014.

Figura 6-5. Zona de aplicación medida pico y placa Medellín - año 2014



Fuente: Google Maps

Para llevar la demanda de los autos a este escenario se analiza la cantidad de vehículos afectados diariamente por la medida. Como la restricción es de 4 números de placas diferentes (último dígito) por cada día de lunes a viernes, se entiende que si la distribución de números de placa de los vehículos es equitativa, por cada número se restringe el 10%, lo que significa que las 4 placas restringen el 40%. Sin embargo, la medida de pico y placa tiene algunas excepciones que aplican para autos particulares, que según la SMM (2014) están exentos:

- Los vehículos particulares y oficiales que usen gas natural vehicular o energía eléctrica como combustible, siempre y cuando lo acrediten con la respectiva certificación en el momento de ser requerido por la autoridad en la vía pública.
- Vehículos propiedad de medios de comunicación y los vehículos contratados y acreditados, mientras estén al servicio de alguno de los mencionados medios; además los que estén dotados de equipos que no permitan que sea remplazado por otro vehículo. En cualquier caso deberán tener identificación visual externa.
- Vehículos pertenecientes a la Fuerzas Militares, Policía Nacional y los del INPEC que sean especialmente destinados para el transporte de personal detenido.
- Vehículos particulares y oficiales utilizados para el transporte de personas discapacitadas o pacientes que se desplacen en razón de tratamientos vitales como radioterapias, quimioterapias, diálisis o similares, siempre y cuando el o los discapacitados o pacientes estén ocupando el vehículo.
- Vehículos pertenecientes a empresas privadas de vigilancia con identificación visual externa permanentemente y, previa acreditación de tal calidad ante la Secretaría de Movilidad.
- Vehículos particulares y oficiales en los que se transporten Magistrados de los diferentes Tribunales, Jueces, Fiscales, Defensores Públicos, Procuradores Judiciales, siempre y cuando estén ocupando el vehículo y se acredite como tal con el carné expedido por la respectiva entidad cuando sea requerido por la Autoridad en la vía pública.
- Vehículos particulares u oficiales en que se transporten los Honorables Diputados a la Asamblea de Antioquia, siempre que dicho personaje se encuentre dentro del vehículo y ostente dicha calidad, la cual deberá acreditar en el momento que sea indicado por la Autoridad de Tránsito en la vía pública.

Por otro lado, es conveniente tener en cuenta que algunas familias de los estratos altos han optado por la compra de un segundo y hasta tercer vehículo, con el fin de no verse afectado por la restricción, evadiendo la medida de pico y placa.

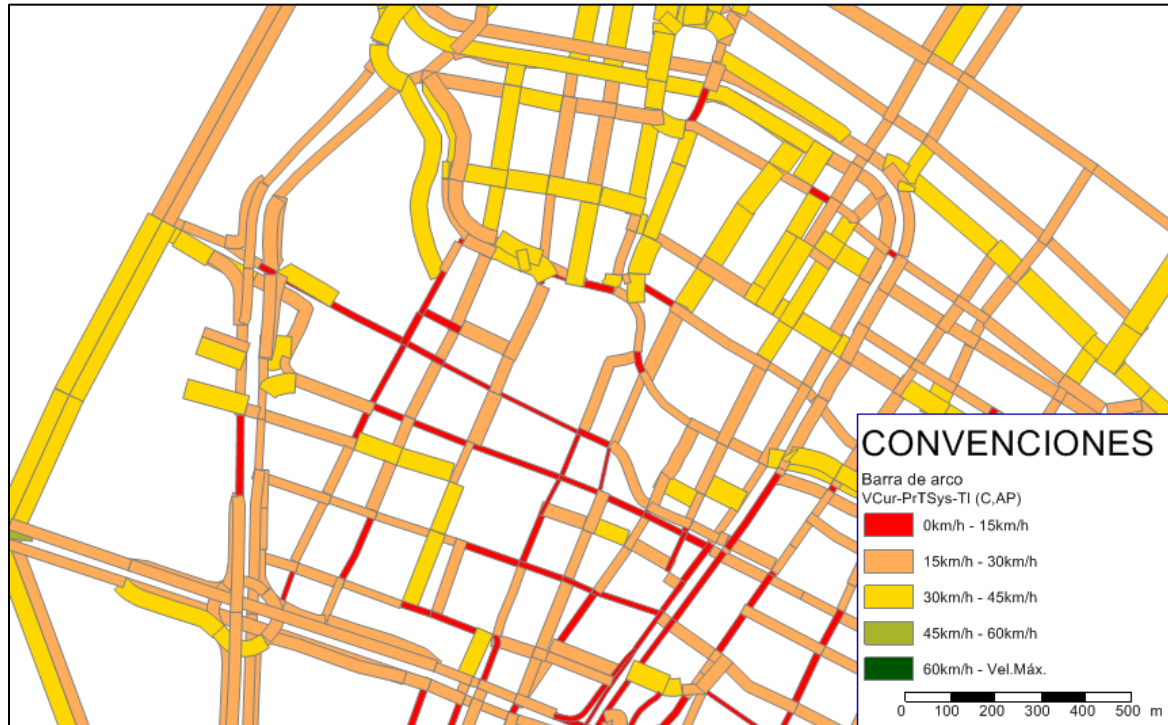
De esta forma, se consideró que el verdadero porcentaje de restricción de vehículos en la zona de estudio es de aproximadamente el 30%. Por tanto, la matriz de auto actualizada en el año 2014, se incrementa en un 30% en las zonas de restricción de la medida de pico y placa y se obtiene una matriz para el escenario sin pico y placa.

6.4.1 Resultados de la simulación escenario sin pico y placa

Se corre el modelo calibrado con la matriz auto sin pico y placa y las otras matrices si ninguna modificación. Como resultado se obtienen los siguientes resultados:

- *Velocidad de viaje:*

Figura 6-6. Velocidades en las vías – escenario sin pico y placa



Fuente: Presente estudio

En la Figura 6-6, se indica el mapa de velocidades de circulación en las vías de la zona de estudio en el escenario sin pico y placa. Se puede observar en las vías internas, que las velocidades más bajas (menores a 15 Km/h) están en la calle 50 (Colombia) sentido Este – Oeste, en la calle 49 (Ayacucho) y calle 46 (Maturín) sentido Oeste – Este; y en sectores de las carreras 55, 54, 51 y 49 en los sentidos norte – sur y viceversa. En la parte norte de la zona de estudio se tiene las velocidades más altas en un orden de 30 Km/h – 45 Km/h, mientras que en la zona sur están las más bajas: menores de 15 Km/h y en el rango entre 15 Km/h y 30 Km/h. Por su parte en el anillo vial de la zona de cobro por congestión la mayor parte de las velocidades están el orden de 15 Km/h a 30 Km/h; a excepción de la avenida Oriental entre calle San Juan y avenida la Playa en donde se tiene velocidades inferiores a 15 Km/h en los sentidos sur – norte y norte – sur, lo mismo que en la avenida Ferrocarril entre calle 46 y calle 48 sentido norte – sur.

Con las velocidades calculadas por el software Visum en este escenario, se determinará el nivel de servicio de las vías como se indica a continuación:

6.4.2 Determinación del nivel de servicio de las vías – escenario sin pico y placa

▪ Metodología.

En primer lugar se debe clasificar la vía urbana según la categoría de diseño, de acuerdo a las características definidas por el HCM – 2000, e indicadas en la Tabla 4-5. Determinación de categorías funcionales y de diseño de este documento. De acuerdo a esta categoría, la vía puede ser: Alta Velocidad, Suburbana, Intermedia o Urbana.

Utilizando la misma tabla, se debe clasificar la vía según la categoría funcional en: arteria principal o arteria menor. Posteriormente, definidas las dos categorías se clasifica la vía en uno de los cuatro tipos (I, II, III, IV), como se indica en la Tabla 4-6. Clasificación vías urbanas basado en la combinación de categorías funcionales y de diseño.

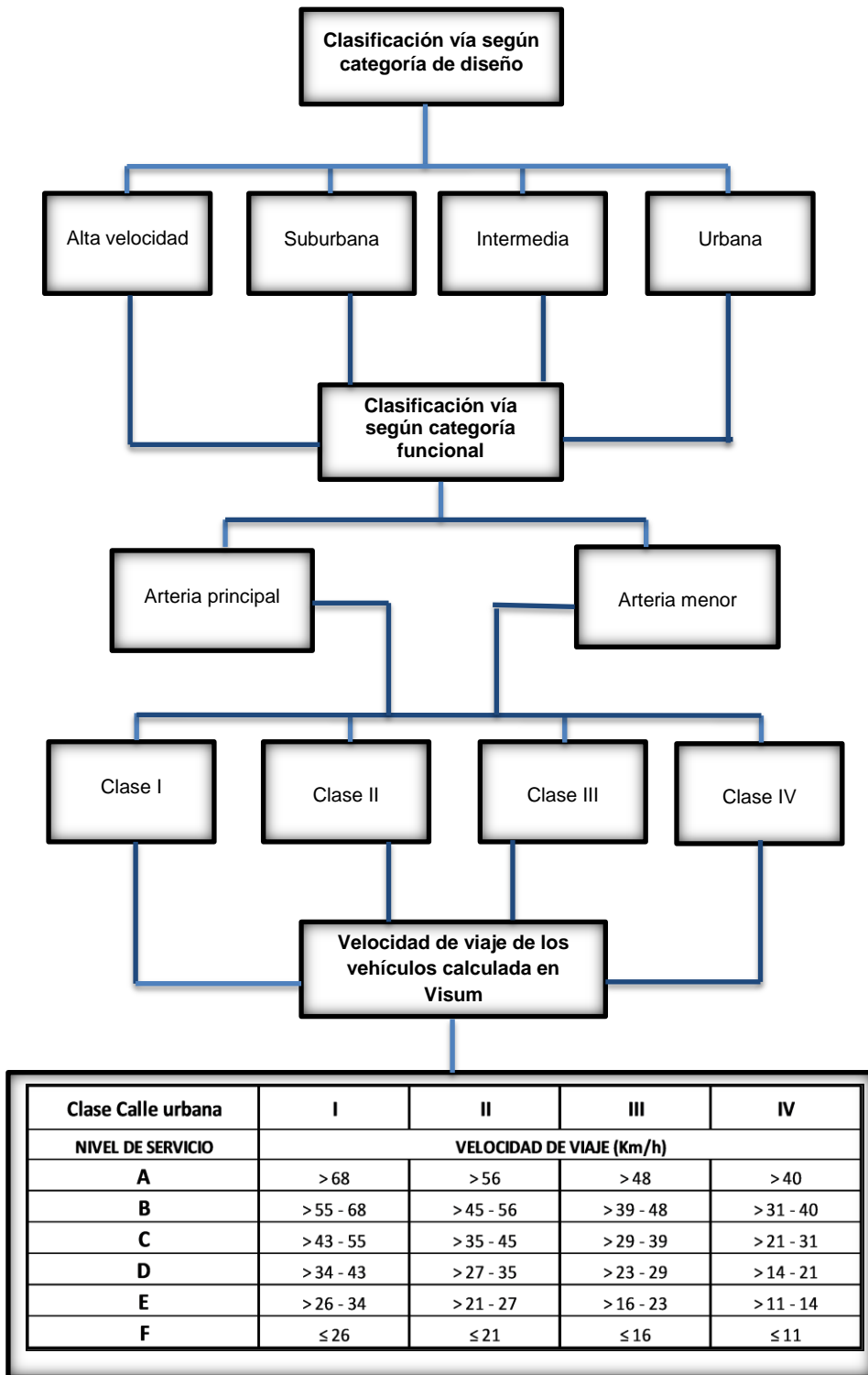
Luego, con la velocidad de circulación de los vehículos calculada por el software Visum en cada arco, se entra en la Tabla 4-7. Nivel de servicio por clase de vía urbana, y se define el nivel de servicio del segmento de arco de acuerdo al rango de velocidad respectivo. En la Figura 6-7, se indica el árbol de decisión que resume la metodología para determinar el nivel de servicio de las vías urbanas, tomando como parámetro la velocidad de viaje de los vehículos calculada de un proceso de macro simulación del transporte.

Se puede determinar el nivel de servicio en cada segmento de arco y en un tramo conformado por varios arcos con características similares (corredor vial). En el último caso, se puede hacer bien sea tomando el valor de la velocidad menor del conjunto de arco o con el promedio ponderado de la velocidad con respecto a la unidad vehículo – kilómetro (veh-Km), donde el término vehículo se refiere a autos equivalentes. De esta forma se analiza cada una de las alternativas y se define la que mejor representa el nivel de servicio de las vías en la zona de estudio como se describe a continuación:

Nivel de servicio por cada segmento de arco

Equivale a tener el nivel de servicio de las vías en cada cuadra o manzana de la zona de estudio. En este caso, se evalúa el nivel de servicio aplicando la metodología indicada en la Figura 6-7, Los resultados de la determinación del nivel de servicio se indican en la Tabla 6-10.

Figura 6-7. Árbol de decisión para determinar el nivel de servicio de las vías urbanas con base a la velocidad de viaje



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6-10. Determinación del nivel de servicio por cada segmento de arco

Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen en eh/h	Vehículo - Km	Velocidad en arco Km/h	Clase de vía			Nivel de Servicio por arco
								C.Funcional	C.diseño	Tipo	
Vías internas											
Sucre	Cr 47	CI 58 - CI 57	N - S	0,091	1176	107,016	24	Arteria menor	Urbana	IV	C
	Cr 47	CI 57 - CI 56	N - S	0,099	809	80,091	33				B
	Cr 47	CI 56 - CI 54	N - S	0,174	863	150,162	32				B
	Cr 47	CI 54 - CI 53	N - S	0,088	863	75,944	32				B
	Cr 47	CI 53 - CI 52	N - S	0,209	1110	231,990	27	Arteria menor	Urbana	IV	C
	Cr 47	CI 52 - CI 50	N - S	0,117	960	112,320	23				D
	Cr 47	CI 50 - CI 49	N - S	0,081	1359	110,079	16				F
	Cr 47	CI 49 - CI 48	N - S	0,096	1410	135,360	9				
Junín	Cr 49	CI 44 - CI 45	S - N	0,137	1406	192,622	19	Arteria menor	Urbana	IV	D
	Cr 49	CI 45 - CI 46	S - N	0,168	1485	249,480	14				E
	Cr 49	CI 46 - CI 48	S - N	0,116	1349	156,484	19				D
	Cr 49	CI 48 - CI 49	S - N	0,089	1137	101,193	16				D
	Cr 49	CI 49 - CI 50	S - N	0,088	850	74,800	22	Arteria menor	Urbana	IV	C
	Cr 49	CI 49 - CI 52	S - N	0,115	596	68,540	27				C
	Cr 49	CI 54 - CI 56	S - N	0,175	152	26,600	35				B
	Cr 49	CI 56 - CI 57	S - N	0,112	152	17,024	35				B
Palacé	Cr 50	CI 44 - CI 45	S - N	0,132	1290	170,280	22	Arteria menor	Urbana	IV	C
	Cr 50	CI 45 - CI 46	S - N	0,168	1197	201,096	25				C
	Cr 50	CI 46 - CI 48	S - N	0,110	1275	140,250	20				D
	Cr 50	CI 48 - CI 49	S - N	0,094	1065	100,110	24				C
	Cr 50	CI 49 - CI 50	S - N	0,094	2033	191,102	6	Arteria menor	Urbana	IV	F
	Cr 50	CI 50 - CI 52	S - N	0,176	1122	197,472	17				D
	Cr 50	CI 52 - CI 53	S - N	0,177	709	125,493	30				C
	Cr 50	CI 53 - CI 54	S - N	0,088	748	65,824	40				B
	Cr 50	CI 54 - CI 56	S - N	0,169	609	102,921	40				B
	Cr 50	CI 56 - CI 57	S - N	0,112	291	32,592	40				B
Bolívar	Cr 51	CI 44 - CI 45	S - N	0,125	1014	126,750	12	Arteria menor	Urbana	IV	E
	Cr 51	CI 45 - CI 46	S - N	0,173	932	161,236	17				D
	Cr 51	CI 46 - CI 48	S - N	0,110	1026	112,860	13				E
	Cr 51	CI 48 - CI 49	S - N	0,099	1382	136,818	8				F
	Cr 51	CI 49 - CI 50	S - N	0,097	1534	148,798	9				F

Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen en eh/h	Vehículo - Km	Velocidad en arco Km/h	Clase de vía			Nivel de Servicio por arco
								C.Funcional	C.diseño	Tipo	
	Cr 51	CI 50 - CI 51	S - N	0,241	40	9,640	22	Arteria menor	Urbana	IV	C
	Cr 52	CI 51 - CI 52	S - N	0,111	1612	178,932	16				D
	Cr 51	CI 53 - CI 54	S - N	0,064	729	46,656	34				B
	Cr 51	CI 54 - CI 56	S - N	0,092	632	58,144	40				B
	Cr 51	CI 56 - CI 57	S - N	0,268	1103	295,604	30				C
	Cr 51	CI 57 - CI 58	S - N	0,084	1970	165,480	14				E
Carabobo	Cr 52	CI 58 - CI 57	N - S	0,081	880	71,280	28	Arteria menor	Urbana	IV	C
	Cr 52	CI 57 - CI 54	N - S	0,224	781	174,944	30				C
	Cr 52	CI 54 - CI 52	N - S	0,184	667	122,728	36				B
Cundinamarca	Cr 53	CI 45 - CI 46	S - N	0,168	448	75,264	33	Arteria menor	Urbana	IV	B
	Cr 53	CI 46 - CI 48	S - N	0,114	612	69,768	31				C
	Cr 53	CI 48 - CI 49	S - N	0,097	507	49,179	16				D
	Cr 53	CI 49 - CI 50	S - N	0,120	631	75,720	29				C
	Cr 53	CI 50 - CI 51	S - N	0,083	1206	100,098	24				C
	Cr 53	CI 51 - CI 53	S - N	0,174	460	80,040	26				C
	Cr 53	CI 53 - CI 54	S - N	0,158	1090	172,220	18				D
	Cr 53	CI 54 - CI 57	S - N	0,219	1121	245,499	29				C
	Cr 53	CI 57 - CI 58	S - N	0,081	865	70,065	23				C
Cúcuta	Cr 54	CI 58 - CI 57	N - S	0,068	66	4,488	35	Arteria menor	Urbana	IV	B
	Cr 54	CI 57 - CI 54	N - S	0,224	266	59,584	35				B
	Cr 54	CI 54 - CI 53	N - S	0,126	517	65,142	30				C
	Cr 54	CI 53 - CI 51	N - S	0,180	1196	215,280	24	Arteria menor	Urbana	IV	C
	Cr 54	CI 51 - CI 50	N - S	0,080	2046	163,680	21				D
	Cr 54	CI 50 - CI 49	N - S	0,132	1269	167,508	23				C
	Cr 54	CI 49 - CI 48	N - S	0,108	1220	131,760	22				C
	Cr 54	CI 48 - CI 46	N - S	0,111	1118	124,098	25				C
	Cr 54	CI 46 - CI 45	N - S	0,165	1031	170,115	13				E
	Cr 54	CI 45 - CI 44	N - S	0,112	967	108,304	16				D
Tenerife	Cr 55	CI 53 - CI 52A	N - S	0,071	351	24,921	16	Arteria menor	Urbana	IV	D
	Cr 55	CI 52A - CI 51	N - S	0,106	1339	141,934	12				E
	Cr 55	CI 51 - CI 50	N - S	0,078	1404	109,512	14				E
	Cr 55	CI 50 - CI 49	N - S	0,142	1861	264,262	11				F
	Cr 55	CI 49 - CI 48	N - S	0,112	1543	172,816	14				E
	Cr 55	CI 48 - CI 46	N - S	0,113	458	51,754	20				D
	Cr 55	CI 46 - CI 45	N - S	0,164	310	50,840	18				D
	Cr 55	CI 45 - CI 44	N - S	0,115	149	17,135	10				F

Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen en eh/h	Vehículo - Km	Velocidad en arco Km/h	Clase de vía			Nivel de Servicio por arco			
								C.Funcional	C.diseño	Tipo				
Amador	CI 45	A.Ferrocarril - Cr 55	W - E	0,105	404	42,420	20	Arteria menor	Urbana	IV	D			
	CI 45	Cr 55 - Cr 54	W - E	0,109	547	59,623	22				C			
	CI 45	Cr 54 - Cr 53	W - E	0,135	609	82,215	16				D			
	CI 45	Cr 53 - Cr 52A	W - E	0,068	109	7,412	13				E			
	CI 45	Cr 52A - Cr 51	W - E	0,145	99	14,355	13				E			
	CI 45	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,098	64	6,272	25				C			
	CI 45	Cr 50 - Cr 49	W - E	0,031	79	2,449	22				C			
	CI 45	Cr 49 - Oriental	W - E	0,154	1	0,154	20				D			
Maturín	CI 46	A.Ferrocarril - Cr 55	W - E	0,179	67	11,993	19	Arteria menor	Urbana	IV	D			
	CI 46	Cr 55 - Cr 54	W - E	0,107	173	18,511	16				D			
	CI 46	Cr 54 - Cr 53	W - E	0,123	269	33,087	16				D			
	CI 46	Cr 53 - Cr 52A	W - E	0,062	185	11,470	16				D			
	CI 46	Cr 52A - Cr 51	W - E	0,147	201	29,547	14				E			
	CI 46	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,103	161	16,583	12				E			
	CI 46	Cr 50 - Cr 49	W - E	0,071	235	16,685	10				F			
	CI 46	Cr 49 - Oriental	W - E	0,165	393	64,845	11				F			
Pichincha	CI 48	Oriental - Cr 47	E - W	0,043	988	42,484	22	Arteria menor	Urbana	IV	C			
	CI 48	Cr 47 - Cr 49	E - W	0,116	424	49,184	26				C			
	CI 48	Cr 49 - Cr 50	E - W	0,098	460	45,080	32				B			
	CI 48	Cr 50 - Cr 51	E - W	0,102	766	78,132	27				C			
	CI 48	Cr 53 - Cr 54	E - W	0,122	105	12,810	37			IV	B			
	CI 48	Cr 54 - Cr 55	E - W	0,100	163	16,300	37				B			
	CI 48	Cr 55 - A.Ferrocarril	E - W	0,223	1306	291,238	23				C			
Ayacucho	CI 49	A.Ferrocarril - Cr 56B	W - E	0,092	0	0,000	40	Arteria menor	Urbana	IV	B			
	CI 49	Cr 56B - Cr 55	W - E	0,187	1402	262,174	25				C			
	CI 49	Cr 55 - Cr 54	W - E	0,095	1761	167,295	13				E			
	CI 49	Cr 54 - Cr 53	W - E	0,124	1772	219,728	12				E			
	CI 49	Cr 53 - Cr 51	W - E	0,218	1648	359,264	11				F			
	CI 49	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,093	1251	116,343	10				F			
	CI 49	Cr 50 - Cr 49	W - E	0,097	1148	111,356	13				E			
	CI 49	Cr 49 - Cr 47	W - E	0,105	1236	129,780	12				E			
	CI 49	Cr 47 - Oriental	W - E	0,065	1263	82,095	15				D			
	CI 49	Oriental - Cr 47	E - W	0,066	514	33,924	19				Arteria menor	Urbana	IV	D
	CI 49	Cr 47 - Cr 49	E - W	0,105	436	45,780	19							D
	CI 49	Cr 49 - Cr 50	E - W	0,163	696	113,448	20	D						

Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen en eh/h	Vehículo - Km	Velocidad en arco Km/h	Clase de vía			Nivel de Servicio por arco
								C.Funcional	C.diseño	Tipo	
Colombia	CI 50	Cr 49 - Cr 47	W - E	0,109	265	28,885	35	Arteria menor	Urbana	III	C
	CI 50	Cr 47 - Oriental	W - E	0,082	134	10,988	44				B
	CI 50	Cr 50 - Cr 51	E - W	0,075	1503	112,725	13	Arteria principal	Urbana	III	F
	CI 50	Cr 51 - Cr 53	E - W	0,216	2074	447,984	8				F
	CI 50	Cr 53 - Cr 54	E - W	0,117	1473	172,341	9				F
	CI 50	Cr 54 - Cr 55	E - W	0,090	2252	202,680	12				F
	CI 50	Cr 55 - Cr 56A	E - W	0,189	1795	339,255	13				F
	CI 50	Cr 56A - A. Ferrocarril	E - W	0,180	1666	299,880	13				F
Av. La Playa - De Greiff	CI 52	Oriental - Cr 47	E - W	0,097	352	34,144	22	Arteria principal	Urbana	III	E
	CI 52	Cr 47 - Cr 49	E - W	0,101	573	57,873	19				E
	CI 52	Cr 49 - Cr 50	E - W	0,158	1169	184,702	16				F
	CI 52	Cr 50 - Cr 51	E - W	0,163	1572	256,236	14				F
	CI 53	Cr 51 - Cr 52	E - W	0,106	1523	161,438	15				F
	CI 53	Cr 52 - Cr 53	E - W	0,105	1398	146,790	9				F
	CI 53	Cr 53 - Cr 54	E - W	0,107	1065	113,955	21				E
	CI 53	Cr 54 - Cr 55	E - W	0,069	386	26,634	27				D
	CI 53	Cr 55 - Cr 54	E - W	0,150	326	48,900	27				D
	Cr 56	CI 54 - A. Ferrocarril	S - N	0,233	437	101,821	31				C
	Cr 56	Cr 52 - Cr 53	E - W	0,109	1182	128,838	19	Arteria menor	Urbana	III	E
	Cr 56	Cr 53 - Cr 54	E - W	0,108	534	57,672	33				C
	Cr 56	Cr 54 - CI 54	S - N	0,199	534	106,266	28				D
	Cr 56	CI 54 - CI 57	S - N	0,238	436	103,768	30				C
Maracaibo	CI 53	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,120	787	94,440	13	Arteria menor	Urbana	IV	E
	CI 53	Cr 50 - Cr 47	W - E	0,251	748	187,748	20				D
	CI 53	Cr 47 - Oriental	W - E	0,106	501	53,106	15				D
Caracas	CI 54	Oriental - Cr 47	E - W	0,101	769	77,669	38	Arteria menor	Urbana	IV	B
	CI 54	Cr 47 - Cr 48	E - W	0,054	715	38,610	39				B
	CI 54	Cr 48 - Cr 49	E - W	0,073	884	64,532	36				B
	CI 54	Cr 49 - Cr 50	E - W	0,123	768	94,464	30				C
	CI 54	Cr 50 - Cr 51	E - W	0,140	906	126,840	21,0				D
Juanambú	CI 54	Cr 51 - Cr 52	E - W	0,099	308	30,492	36	Arteria menor	Urbana	IV	B
	CI 54	Cr 52 - Cr 53	E - W	0,118	249	29,382	38				B
	CI 54	Cr 53 - Cr 54	E - W	0,092	218	20,056	38				B
	CI 54	Cr 54 - Cr 56	E - W	0,126	14	1,764	35				B
La Paz	CI 57	A. Ferrocarril - Cr 54	W - E	0,220	572	125,840	27	Arteria menor	Urbana	IV	C
	CI 57	Cr 54 - Cr 53	W - E	0,094	542	50,948	33				B

Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen en eh/h	Vehículo - Km	Velocidad en arco Km/h	Clase de vía			Nivel de Servicio por arco
								C.Funcional	C.diseño	Tipo	
	CI 57	Cr 53 - Cr 52	W - E	0,120	851	102,120	28	Arteria menor	Urbana	IV	C
	CI 57	Cr 52 - Cr 51D	W - E	0,102	830	84,660	29				C
	CI 57	Cr 51D - Cr 51	W - E	0,059	1010	59,590	37				B
	CI 57	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,206	331	68,186	20				D
	CI 57	Cr 50 - Cr 49	W - E	0,110	486	53,460	19				D
	CI 57	Cr 49 - Cr 48	W - E	0,075	1273	95,475	15				D
	CI 57	Cr 48 - Cr 47	W - E	0,061	1120	68,320	18				D
	CI 57	Cr 47 - Oriental	W - E	0,091	1498	136,318	16				D

Anillo Vial

Av. Oriental	Cr 46	CI 44 - CI 45	S - N	0,148	1186	175,528	11	Arteria principal	Urbana	III	F
	Cr 46	CI 45 - CI 47	S - N	0,168	1186	199,248	11				F
	Cr 46	CI 47 - CI 49	S - N	0,186	373	69,378	13				F
	Cr 46	CI 49 - CI 52	S - N	0,198	614	121,572	14				F
	Cr 46	CI 52 - CI 53	S - N	0,192	502	96,384	26				D
	Cr 46	CI 53 - CI 54	S - N	0,096	440	42,240	26				D
	Cr 46	CI 54 - CI 55	S - N	0,088	678	59,664	25				D
	Cr 46	CI 55 - CI 56	S - N	0,087	678	58,986	25				D
	Cr 46	CI 56 - CI 57	S - N	0,087	678	58,986	25				D
	Cr 46	CI 57 - CI 58	S - N	0,142	1206	171,252	22				E
	Cr 46	CI 58 - CI 57	N - S	0,126	624	78,624	26	Arteria principal	Urbana	III	D
	Cr 46	CI 57 - CI 56	N - S	0,088	432	38,016	27				D
	Cr 46	CI 56 - CI 54	N - S	0,174	432	75,168	26				D
	Cr 46	CI 54 - CI 53	N - S	0,090	528	47,520	21				E
	Cr 46	CI 53 - CI 52	N - S	0,198	528	104,544	21				E
	Cr 46	CI 52 - CI 50	N - S	0,118	1413	166,734	16				F
	Cr 46	CI 50 - CI 49	N - S	0,083	1319	109,477	16				F
	Cr 46	CI 49 - CI 48	N - S	0,102	1550	158,100	13				F
	Cr 46	CI 48 - CI 46	N - S	0,079	2520	199,080	11				F
	Cr 46	CI 46 - CI 45	N - S	0,103	2822	290,666	9				F
Av. Oriental (Echeverry)	CI 58	Cr 47 - Cr 48	E - W	0,094	754	70,876	28	Arteria principal	Urbana	III	D
	CI 58	Cr 48 - Cr 49	E - W	0,073	1777	129,721	25				D
	CI 58	Cr 49 - A.Ferrocarril	E - W	1,012	1881	1903,572	25				D
	CI 58	Cr 49 - Cr 51	E - W	0,335	1150	385,250	26	Arteria principal	Urbana	III	D
	CI 58	A.Ferrocarril - Cr 49	W - E	1,013	926	938,038	31	Arteria principal	Urbana	III	C
	CI 58	Cr 49 - Cr 48	W - E	0,074	1280	94,720	27				D

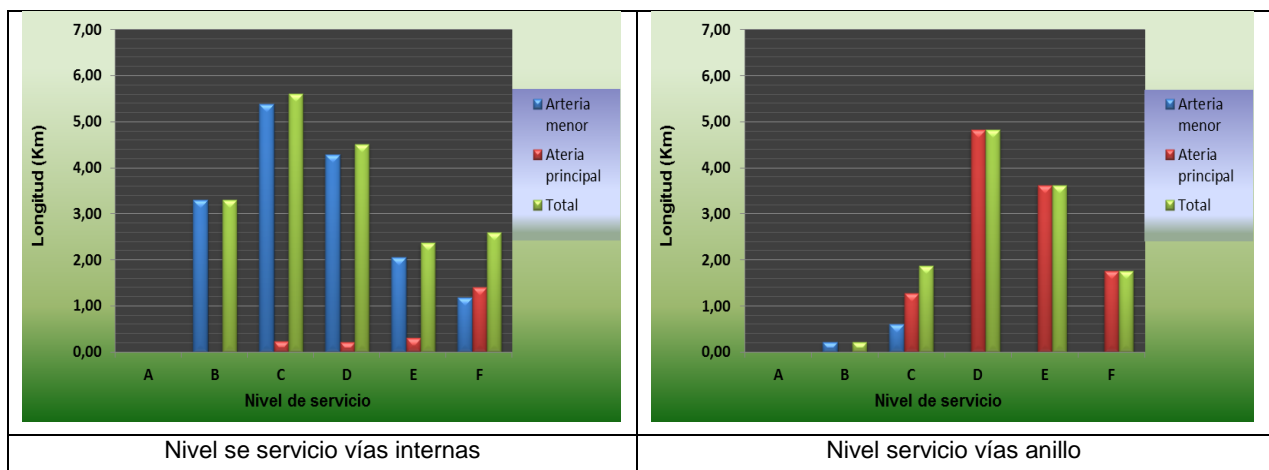
Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen en eh/h	Vehículo - Km	Velocidad en arco Km/h	Clase de vía			Nivel de Servicio por arco
								C.Funcional	C.diseño	Tipo	
	CI 58	Cr 48 - Cr 47	W - E	0,078	1710	133,380	26				D
	CI 58	A.Ferrocarril - Cr 54	W - E	0,177	102	18,054	30	Arteria menor	Urbana	IV	C
	CI 58	Cr 54 - Cr 53	W - E	0,092	9	0,828	25				C
	CI 58	Cr 53 - Cr 52	W - E	0,119	497	59,143	24				C
	CI 58	Cr 52 - Cr 51 D	W - E	0,109	926	100,934	31				C
	CI 58	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,226	624	141,024	32				B
	CI 58	Cr 50 - Cr 49	W - E	0,103	624	64,272	29				C
Av. Ferrocarril	Cr 57	CI 44 - CI 46	S - N	0,317	825	261,525	21				Arteria principal
	Cr 57	CI 46 - CI 48	S - N	0,111	1631	181,041	15	F			
	Cr 57	CI 48 - CI 49	S - N	0,070	1632	114,240	15	F			
	Cr 57	CI 49 - CI 56B	S - N	0,065	1632	106,080	18	E			
	Cr 57	Cr 56B - CI 50	S - N	0,182	847	154,154	24	D			
	Cr 57	CI 50 - CI 51	S - N	0,178	847	150,766	29	D			
	Cr 57	CI 51 - Cr 56	S - N	0,399	1850	738,150	20	E			
	Cr 57	Cr 56 - CI 57	S - N	0,113	2914	329,282	22	E			
	Cr 57	CI 57 - CI 58	S - N	0,112	1922	215,264	24	D			
	Cr 57	CI 59 - CI 58	N - S	0,195	989	192,855	38	Arteria principal	Urbana	III	C
	Cr 57	CI 58 - CI 56	N - S	0,072	1866	134,352	22				E
	Cr 57	CI 56 - CI 51	N - S	0,337	1866	628,842	17				E
	Cr 57	CI 51 - CI 50	N - S	0,186	1138	211,668	20				E
	Cr 57	CI 50 - CI 49A	N - S	0,125	1138	142,250	20				E
	Cr 57	CI 49A - CI 49	N - S	0,061	1707	104,127	21				E
	Cr 57	CI 49 - CI 48	N - S	0,137	1759	240,983	19				E
	Cr 58	CI 48 - CI 46	N - S	0,175	2951	516,425	15				F
Cr 57	CI 46 - CI 44	N - S	0,258	1289	332,562	24	D				
San Juan	CI 44	Oriental - Cr 50	E - W	0,094	3423	321,762	21	Arteria principal	Urbana	III	E
	CI 44	Cr 50 - Cr 51	E - W	0,087	3294	286,578	19				E
	CI 44	Cr 51 - Cr 52	E - W	0,103	2427	249,981	19				E
	CI 44	Cr 52 - Cr 59	E - W	0,711	1369	973,359	23				E
	CI 44	Cr 52 - Cr 54	E - W	0,261	1058	276,138	26	Arteria principal	Urbana	III	D
	CI 44	Cr 54 - Cr 55	E - W	0,105	1369	143,745	23				E
	CI 44	Cr 55 - A.Ferrocarril	E - W	0,056	1395	78,120	23				E
	CI 44	A. Ferrocarril - Cr 52	W - E	0,335	2214	741,690	27	Arteria principal	Urbana	III	D
	CI 44	Cr 59 - Cr 52	W - E	0,709	2214	1569,726	27	Arteria principal	Urbana	III	D
CI 44	Cr 52 - Cr 51	W - E	0,101	2991	302,091	24	D				

Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen en eh/h	Vehículo - Km	Velocidad en arco Km/h	Clase de vía			Nivel de Servicio por arco
								C.Funcional	C.diseño	Tipo	
	CI 44	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,086	2752	236,672	17				E
	CI 44	Cr 50 - Oriental	W - E	0,138	2198	303,324	19				E
	CI 44	Cr 50 - Cr 48	W - E	0,087	617	53,679	27	Arteria principal	Urbana	III	D
	CI 44	Cr 48 - Oriental	W - E	0,069	372	25,668	39				C

Fuente: Presente estudio

De los resultados de la tabla anterior, se observa que en las vías internas de la zona de estudio, el nivel de servicio D y C, es el que predomina; mientras que en las vías que conforman el anillo, el nivel de servicio predominante es el D y E. En la Gráfica 6-3, se indica la cantidad de Km de vía por cada nivel de servicio tanto para las vías internas como las vías del anillo clasificadas por la clase de vía; se puede observar que la cantidad de vía en el nivel de servicio F es de 2,6 Km en las vías internas y 1,8 Km en el anillo; en el nivel E, 2,4 Km de vías internas y 3,6 Km vías en el anillo; y así sucesivamente se puede obtener la cantidad de km de vía en cada uno de los niveles. Además, es importante anotar que tanto en las vías internas como en las vías del anillo, no existen segmentos de vías con nivel de servicio A.

Gráfica 6-3. Nivel de servicio de las vías escenario sin pico y placa



Fuente: Presente estudio

Nivel de servicio por corredor

En este caso se evalúa y determina el nivel de servicio en el corredor, identificando tramos de vía con características similares en cuanto a sentido y número de carriles. Para determinar la velocidad de viaje calculada por el software, que represente las condiciones típicas del tramo de vía y con la cual se determinará el nivel de servicio, se analizaron dos situaciones: la primera tomar una velocidad media ponderada al flujo vehículos y longitud del tramo (veh-Km) de cada arco que pertenece al tramo

respectivo, y la segunda tomar la velocidad crítica (mínima) del grupo de arcos que componen el tramo.

En la Tabla 6-11, se indica la determinación del nivel de servicio calculado con la velocidad por los dos métodos. Como es apenas lógico, tomando la velocidad mínima en el tramo, se tiene un nivel de servicio más crítico, el cual influye para todos los vehículos que transiten a lo largo del corredor debido a que las longitudes de cada corredor no son tan grandes, permitiendo que las colas de vehículos crezcan rápidamente y se expandan a todo el tramo; por lo anterior, se considera que el nivel de servicio característico del corredor es aquel que se determina con la velocidad más crítica.

Tabla 6-11. Nivel de servicio en las vías por corredor

Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen Veh/h	Vehículo - Km	Velocidad en arco Km/h	Vel. menor en tramo	Vel. media pond (Km/h)	Clase de vía			NS con vel. media-ponderada.	NS con vel. mínima
										C.Funcional	C.diseño	Tipo		
Vías internas														
Sucre	Cr 47	Cl 58 - Cl 57	N - S	0,091	1176	107,016	24	24,0	29,0	Arteria menor	Urbana	IV	C	C
	Cr 47	Cl 57 - Cl 56	N - S	0,099	809	80,091	33							
	Cr 47	Cl 56 - Cl 54	N - S	0,174	863	150,162	32							
	Cr 47	Cl 54 - Cl 53	N - S	0,088	863	75,944	32							
	Cr 47	Cl 53 - Cl 52	N - S	0,209	1110	231,990	27	9,0	15,5	Arteria menor	Urbana	IV	D	F
	Cr 47	Cl 52 - Cl 50	N - S	0,117	960	112,320	23							
	Cr 47	Cl 50 - Cl 49	N - S	0,081	1359	110,079	16							
	Cr 47	Cl 49 - Cl 48	N - S	0,096	1410	135,360	9							
Junín	Cr 49	Cl 44 - Cl 45	S - N	0,137	1406	192,622	19	14,0	18,1	Arteria menor	Urbana	IV	D	E
	Cr 49	Cl 45 - Cl 46	S - N	0,168	1485	249,480	14							
	Cr 49	Cl 46 - Cl 48	S - N	0,116	1349	156,484	19							
	Cr 49	Cl 48 - Cl 49	S - N	0,089	1137	101,193	16							
	Cr 49	Cl 49 - Cl 50	S - N	0,088	850	74,800	22	35,0	36,8	Arteria menor	Urbana	IV	B	B
	Cr 49	Cl 49 - Cl 52	S - N	0,115	596	68,540	27							
	Cr 49	Cl 54 - Cl 56	S - N	0,175	152	26,600	35							
	Cr 49	Cl 56 - Cl 57	S - N	0,112	152	17,024	35							
Cr 49	Cl 57 - Cl 58	S - N	0,088	270	23,760	40	6,0	18,8	Arteria menor	Urbana	IV	D	F	
Cr 50	Cl 44 - Cl 45	S - N	0,132	1290	170,280	22								
Cr 50	Cl 45 - Cl 46	S - N	0,168	1197	201,096	25								
Cr 50	Cl 46 - Cl 48	S - N	0,110	1275	140,250	20								
Cr 50	Cl 48 - Cl 49	S - N	0,094	1065	100,110	24								
Cr 50	Cl 49 - Cl 50	S - N	0,094	2033	191,102	6								
Cr 50	Cl 50 - Cl 52	S - N	0,176	1122	197,472	17								
Cr 50	Cl 52 - Cl 53	S - N	0,177	709	125,493	30								
Cr 50	Cl 53 - Cl 54	S - N	0,088	748	65,824	40	30,0	36,3	Arteria menor	Urbana	IV	B	C	

Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen Veh/h	Vehículo - Km	Velocidad en arco Km/h	Vel. menor en tramo	Vel. media pond (Km/h)	Clase de vía			NS con vel. media-ponderada.	NS con vel. mínima
										C.Funcional	C.diseño	Tipo		
	Cr 50	Cl 54 - Cl 56	S - N	0,169	609	102,921	40							
	Cr 50	Cl 56 - Cl 57	S - N	0,112	291	32,592	40							
	Cr 50	Cl 57 - Cl 58	S - N	0,090	136	12,240	40							
Bolívar	Cr 51	Cl 44 - Cl 45	S - N	0,125	1014	126,750	12	8,0	11,9	Arteria menor	Urbana	IV	E	F
	Cr 51	Cl 45 - Cl 46	S - N	0,173	932	161,236	17							
	Cr 51	Cl 46 - Cl 48	S - N	0,110	1026	112,860	13							
	Cr 51	Cl 48 - Cl 49	S - N	0,099	1382	136,818	8							
	Cr 51	Cl 49 - Cl 50	S - N	0,097	1534	148,798	9							
	Cr 51	Cl 50 - Cl 51	S - N	0,241	40	9,640	22							
	Cr 52	Cl 51 - Cl 52	S - N	0,111	1612	178,932	16	14,0	24,1	Arteria menor	Urbana	IV	C	E
	Cr 51	Cl 53 - Cl 54	S - N	0,064	729	46,656	34							
	Cr 51	Cl 54 - Cl 56	S - N	0,092	632	58,144	40							
	Cr 51	Cl 56 - Cl 57	S - N	0,268	1103	295,604	30							
	Cr 51	Cl 57 - Cl 58	S - N	0,084	1970	165,480	14							
	Carabobo	Cr 52	Cl 58 - Cl 57	N - S	0,081	880	71,280	28	28,0	31,6	Arteria menor	Urbana	IV	B
Cr 52		Cl 57 - Cl 54	N - S	0,224	781	174,944	30							
Cr 52		Cl 54 - Cl 52	N - S	0,184	667	122,728	36							
Cundinamarca	Cr 53	Cl 45 - Cl 46	S - N	0,168	448	75,264	33	16,0	25,5	Arteria menor	Urbana	IV	C	D
	Cr 53	Cl 46 - Cl 48	S - N	0,114	612	69,768	31							
	Cr 53	Cl 48 - Cl 49	S - N	0,097	507	49,179	16							
	Cr 53	Cl 49 - Cl 50	S - N	0,120	631	75,720	29							
	Cr 53	Cl 50 - Cl 51	S - N	0,083	1206	100,098	24							
	Cr 53	Cl 51 - Cl 53	S - N	0,174	460	80,040	26							
	Cr 53	Cl 53 - Cl 54	S - N	0,158	1090	172,220	18							
	Cr 53	Cl 54 - Cl 57	S - N	0,219	1121	245,499	29							
Cúcuta	Cr 54	Cl 58 - Cl 57	N - S	0,068	66	4,488	35	30,0	32,5	Arteria menor	Urbana	IV	B	C
	Cr 54	Cl 57 - Cl 54	N - S	0,224	266	59,584	35							
	Cr 54	Cl 54 - Cl 53	N - S	0,126	517	65,142	30							
	Cr 54	Cl 53 - Cl 51	N - S	0,180	1196	215,280	24	13,0	20,7	Arteria menor	Urbana	IV	D	E
	Cr 54	Cl 51 - Cl 50	N - S	0,080	2046	163,680	21							
	Cr 54	Cl 50 - Cl 49	N - S	0,132	1269	167,508	23							
	Cr 54	Cl 49 - Cl 48	N - S	0,108	1220	131,760	22							
	Cr 54	Cl 48 - Cl 46	N - S	0,111	1118	124,098	25							
	Cr 54	Cl 46 - Cl 45	N - S	0,165	1031	170,115	13							

Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen Veh/h	Vehículo - Km	Velocidad en arco Km/h	Vel. menor en tramo	Vel. media pond (Km/h)	Clase de vía			NS con vel. media-ponderada.	NS con vel. mínima
										C.Funcional	C.diseño	Tipo		
	Cr 54	Cl 45 - Cl 44	N - S	0,112	967	108,304	16							
Tenerife	Cr 55	Cl 53 - Cl 52A	N - S	0,071	351	24,921	16	10,0	13,3	Arteria menor	Urbana	IV	E	F
	Cr 55	Cl 52A - Cl 51	N - S	0,106	1339	141,934	12							
	Cr 55	Cl 51 - Cl 50	N - S	0,078	1404	109,512	14							
	Cr 55	Cl 50 - Cl 49	N - S	0,142	1861	264,262	11							
	Cr 55	Cl 49 - Cl 48	N - S	0,112	1543	172,816	14							
	Cr 55	Cl 48 - Cl 46	N - S	0,113	458	51,754	20							
	Cr 55	Cl 46 - Cl 45	N - S	0,164	310	50,840	18							
	Cr 55	Cl 45 - Cl 44	N - S	0,115	149	17,135	10							
	Amador	Cl 45	A.Ferrocarril - Cr 55	W - E	0,105	404	42,420							
Cl 45		Cr 55 - Cr 54	W - E	0,109	547	59,623	22							
Cl 45		Cr 54 - Cr 53	W - E	0,135	609	82,215	16							
Cl 45		Cr 53 - Cr 52A	W - E	0,068	109	7,412	13							
Cl 45		Cr 52A - Cr 51	W - E	0,145	99	14,355	13							
Cl 45		Cr 51 - Cr 50	W - E	0,098	64	6,272	25							
Cl 45		Cr 50 - Cr 49	W - E	0,031	79	2,449	22							
Cl 45		Cr 49 - Oriental	W - E	0,154	1	0,154	20							
Maturín	Cl 46	A.Ferrocarril - Cr 55	W - E	0,179	67	11,993	19	10,0	13,5	Arteria menor	Urbana	IV	E	F
	Cl 46	Cr 55 - Cr 54	W - E	0,107	173	18,511	16							
	Cl 46	Cr 54 - Cr 53	W - E	0,123	269	33,087	16							
	Cl 46	Cr 53 - Cr 52A	W - E	0,062	185	11,470	16							
	Cl 46	Cr 52A - Cr 51	W - E	0,147	201	29,547	14							
	Cl 46	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,103	161	16,583	12							
	Cl 46	Cr 50 - Cr 49	W - E	0,071	235	16,685	10							
	Cl 46	Cr 49 - Oriental	W - E	0,165	393	64,845	11							
Pichincha	Cl 48	Oriental - Cr 47	E - W	0,043	988	42,484	22	22,0	26,8	Arteria menor	Urbana	IV	C	C
	Cl 48	Cr 47 - Cr 49	E - W	0,116	424	49,184	26							
	Cl 48	Cr 49 - Cr 50	E - W	0,098	460	45,080	32							
	Cl 48	Cr 50 - Cr 51	E - W	0,102	766	78,132	27	23,0	24,3			IV	C	C
	Cl 48	Cr 53 - Cr 54	E - W	0,122	105	12,810	37							
	Cl 48	Cr 54 - Cr 55	E - W	0,100	163	16,300	37							
	Cl 48	Cr 55 - A.Ferrocarril	E - W	0,223	1306	291,238	23							
Ayacucho	Cl 49	A.Ferrocarril - Cr 56B	W - E	0,092	0	0,000	40	10,0	14,3	Arteria menor	Urbana	IV	D	F
	Cl 49	Cr 56B - Cr 55	W - E	0,187	1402	262,174	25							
	Cl 49	Cr 55 - Cr 54	W - E	0,095	1761	167,295	13							
	Cl 49	Cr 54 - Cr 53	W - E	0,124	1772	219,728	12							

Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen Veh/h	Vehículo - Km	Velocidad en arco Km/h	Vel. menor en tramo	Vel. media pond (Km/h)	Clase de vía			NS con vel. media-ponderada.	NS con vel. mínima
										C.Funcional	C.diseño	Tipo		
	CI 49	Cr 53 - Cr 51	W - E	0,218	1648	359,264	11	19,0	19,6	Arteria menor	Urbana	IV	D	D
	CI 49	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,093	1251	116,343	10							
	CI 49	Cr 50 - Cr 49	W - E	0,097	1148	111,356	13							
	CI 49	Cr 49 - Cr 47	W - E	0,105	1236	129,780	12							
	CI 49	Cr 47 - Oriental	W - E	0,065	1263	82,095	15							
	CI 49	Oriental - Cr 47	E - W	0,066	514	33,924	19							
	CI 49	Cr 47 - Cr 49	E - W	0,105	436	45,780	19							
	CI 49	Cr 49 - Cr 50	E - W	0,163	696	113,448	20							
Colombia	CI 50	Cr 49 - Cr 47	W - E	0,109	265	28,885	35	8,0	11,0	Arteria principal	Urbana	III	F	F
	CI 50	Cr 47 - Oriental	W - E	0,082	134	10,988	44							
	CI 50	Cr 50 - Cr 51	E - W	0,075	1503	112,725	13							
	CI 50	Cr 51 - Cr 53	E - W	0,216	2074	447,984	8							
	CI 50	Cr 53 - Cr 54	E - W	0,117	1473	172,341	9							
	CI 50	Cr 54 - Cr 55	E - W	0,090	2252	202,680	12							
	CI 50	Cr 55 - Cr 56A	E - W	0,189	1795	339,255	13							
Av. La Playa - De Greiff	CI 52	Oriental - Cr 47	E - W	0,097	352	34,144	22	9,0	17,4	Arteria principal	Urbana	III	E	F
	CI 52	Cr 47 - Cr 49	E - W	0,101	573	57,873	19							
	CI 52	Cr 49 - Cr 50	E - W	0,158	1169	184,702	16							
	CI 52	Cr 50 - Cr 51	E - W	0,163	1572	256,236	14							
	CI 53	Cr 51 - Cr 52	E - W	0,106	1523	161,438	15							
	CI 53	Cr 52 - Cr 53	E - W	0,105	1398	146,790	9							
	CI 53	Cr 53 - Cr 54	E - W	0,107	1065	113,955	21							
	CI 53	Cr 54 - Cr 55	E - W	0,069	386	26,634	27							
	CI 53	Cr 55 - Cr 54	E - W	0,150	326	48,900	27							
	Cr 56	CI 54 - A.Ferrocarril	S - N	0,233	437	101,821	31							
	Cr 56	Cr 52 - Cr 53	E - W	0,109	1182	128,838	19							
	Cr 56	Cr 53 - Cr 54	E - W	0,108	534	57,672	33							
	Cr 56	Cr 54 - CI 54	S - N	0,199	534	106,266	28							
	Cr 56	CI 54 - CI 57	S - N	0,238	436	103,768	30							
	Maracaibo	CI 53	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,120	787	94,440							
CI 53		Cr 50 - Cr 47	W - E	0,251	748	187,748	20							
CI 53		Cr 47 - Oriental	W - E	0,106	501	53,106	15							
Caracas	CI 54	Oriental - Cr 47	E - W	0,101	769	77,669	38	21,0	31,6	Arteria menor	Urbana	IV	B	D
	CI 54	Cr 47 - Cr 48	E - W	0,054	715	38,610	39							
	CI 54	Cr 48 - Cr 49	E - W	0,073	884	64,532	36							

Corredor	ID	Tramo	Senti do	Longi tud (Km)	Volu men Veh/h	Vehicul o - Km	Veloci dad en arco Km/h	Vel _ meno r en tramo	Vel. media pond(Km/h)	Clase de vía			NS con vel. media- ponder ada.	NS con vel. mínima
										C.Funcional	C.diseño	Tipo		
	CI 54	Cr 49 - Cr 50	E - W	0,123	768	94,464	30							
	CI 54	Cr 50 - Cr 51	E - W	0,140	906	126,840	21,0							
Juanambú	CI 54	Cr 51 - Cr 52	E - W	0,099	308	30,492	36	35,0	37,2	Arteria menor	Urbana	IV	B	B
	CI 54	Cr 52 - Cr 53	E - W	0,118	249	29,382	38							
	CI 54	Cr 53 - Cr 54	E - W	0,092	218	20,056	38							
	CI 54	Cr 54 - Cr 56	E - W	0,126	14	1,764	35							
La Paz	CI 57	A.Ferrocarril - Cr 54	W - E	0,220	572	125,840	27	27,0	29,8	Arteria menor	Urbana	IV	C	C
	CI 57	Cr 54 - Cr 53	W - E	0,094	542	50,948	33							
	CI 57	Cr 53 - Cr 52	W - E	0,120	851	102,120	28							
	CI 57	Cr 52 - Cr 51D	W - E	0,102	830	84,660	29							
	CI 57	Cr 51D - Cr 51	W - E	0,059	1010	59,590	37							
	CI 57	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,206	331	68,186	20	15,0	17,1	Arteria menor	Urbana	IV	D	D
	CI 57	Cr 50 - Cr 49	W - E	0,110	486	53,460	19							
	CI 57	Cr 49 - Cr 48	W - E	0,075	1273	95,475	15							
	CI 57	Cr 48 - Cr 47	W - E	0,061	1120	68,320	18							
CI 57	Cr 47 - Oriental	W - E	0,091	1498	136,318	16								

Anillo vial

Av. Oriental	Cr 46	CI 44 - CI 45	S - N	0,148	1186	175,528	11	11,0	17,6	Arteria principal	Urbana	III	E	F
	Cr 46	CI 45 - CI 47	S - N	0,168	1186	199,248	11							
	Cr 46	CI 47 - CI 49	S - N	0,186	373	69,378	13							
	Cr 46	CI 49 - CI 52	S - N	0,198	614	121,572	14							
	Cr 46	CI 52 - CI 53	S - N	0,192	502	96,384	26							
	Cr 46	CI 53 - CI 54	S - N	0,096	440	42,240	26							
	Cr 46	CI 54 - CI 55	S - N	0,088	678	59,664	25							
	Cr 46	CI 55 - CI 56	S - N	0,087	678	58,986	25							
	Cr 46	CI 56 - CI 57	S - N	0,087	678	58,986	25							
	Cr 46	CI 57 - CI 58	S - N	0,142	1206	171,252	22							
	Cr 46	CI 58 - CI 57	N - S	0,126	624	78,624	26	7,0	13,4	Arteria principal	Urbana	III	F	F
	Cr 46	CI 57 - CI 56	N - S	0,088	432	38,016	27							
	Cr 46	CI 56 - CI 54	N - S	0,174	432	75,168	26							
	Cr 46	CI 54 - CI 53	N - S	0,090	528	47,520	21							
	Cr 46	CI 53 - CI 52	N - S	0,198	528	104,544	21							
	Cr 46	CI 52 - CI 50	N - S	0,118	1413	166,734	16							
	Cr 46	CI 50 - CI 49	N - S	0,083	1319	109,477	16							
	Cr 46	CI 49 - CI 48	N - S	0,102	1550	158,100	13							
	Cr 46	CI 48 - CI 46	N - S	0,079	2520	199,080	11							
Cr 46	CI 46 - CI 45	N - S	0,103	2822	290,666	9								

Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen Veh/h	Vehículo - Km	Velocidad en arco Km/h	Vel. menor en tramo	Vel. media pond (Km/h)	Clase de vía			NS con vel. ponderada.	NS con vel. mínima						
										C.Funcional	C.diseño	Tipo								
	Cr 46	Cl 45 - Cl 44	N - S	0,228	1720	392,160	7													
Av. Oriental (Echeverry)	Cl 58	Cr 47 - Cr 48	E - W	0,094	754	70,876	28	25,0	25,2	Arteria principal	Urbana	III	D	D						
	Cl 58	Cr 48 - Cr 49	E - W	0,073	1777	129,721	25													
	Cl 58	Cr 49 - A.Ferrocarril	E - W	1,012	1881	1903,572	25	26,0	26,0	Arteria principal	Urbana	III	D	D						
	Cl 58	Cr 49 - Cr 51	E - W	0,335	1150	385,250	26													
	Cl 58	A.Ferrocarril - Cr 49	W - E	1,013	926	938,038	31	26,0	30,1	Arteria principal	Urbana	III	C	D						
	Cl 58	Cr 49 - Cr 48	W - E	0,074	1280	94,720	27													
	Cl 58	Cr 48 - Cr 47	W - E	0,078	1710	133,380	26	24,0	29,9	Arteria menor	Urbana	IV	C	C						
	Cl 58	A.Ferrocarril - Cr 54	W - E	0,177	102	18,054	30													
	Cl 58	Cr 54 - Cr 53	W - E	0,092	9	0,828	25													
	Cl 58	Cr 53 - Cr 52	W - E	0,119	497	59,143	24													
	Cl 58	Cr 52 - Cr 51 D	W - E	0,109	926	100,934	31													
	Cl 58	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,226	624	141,024	32													
Cl 58	Cr 50 - Cr 49	W - E	0,103	624	64,272	29	15,0	20,9	Arteria principal	Urbana	III	E	F							
Cr 57	Cl 44 - Cl 46	S - N	0,317	825	261,525	21														
Cr 57	Cl 46 - Cl 48	S - N	0,111	1631	181,041	15														
Cr 57	Cl 48 - Cl 49	S - N	0,070	1632	114,240	15														
Cr 57	Cl 49 - Cl 56B	S - N	0,065	1632	106,080	18														
Cr 57	Cr 56B - Cl 50	S - N	0,182	847	154,154	24														
Cr 57	Cl 50 - Cl 51	S - N	0,178	847	150,766	29														
Cr 57	Cl 51 - Cr 56	S - N	0,399	1850	738,150	20														
Cr 57	Cr 56 - Cl 57	S - N	0,113	2914	329,282	22														
Cr 57	Cl 57 - Cl 58	S - N	0,112	1922	215,264	24														
Cr 57	Cl 59 - Cl 58	N - S	0,195	989	192,855	38								15,0	20,2	Arteria principal	Urbana	III	E	F
Cr 57	Cl 58 - Cl 56	N - S	0,072	1866	134,352	22														
Cr 57	Cl 56 - Cl 51	N - S	0,337	1866	628,842	17														
Cr 57	Cl 51 - Cl 50	N - S	0,186	1138	211,668	20														
Cr 57	Cl 50 - Cl 49A	N - S	0,125	1138	142,250	20														
Cr 57	Cl 49A - Cl 49	N - S	0,061	1707	104,127	21														
Cr 57	Cl 49 - Cl 48	N - S	0,137	1759	240,983	19														
Cr 58	Cl 48 - Cl 46	N - S	0,175	2951	516,425	15														
Cr 57	Cl 46 - Cl 44	N - S	0,258	1289	332,562	24	19,0	21,5	Arteria principal	Urbana	III	E	E							
Cl 44	Oriental - Cr 50	E - W	0,094	3423	321,762	21														
Cl 44	Cr 50 - Cr 51	E - W	0,087	3294	286,578	19														
Cl 44	Cr 51 - Cr 52	E - W	0,103	2427	249,981	19														

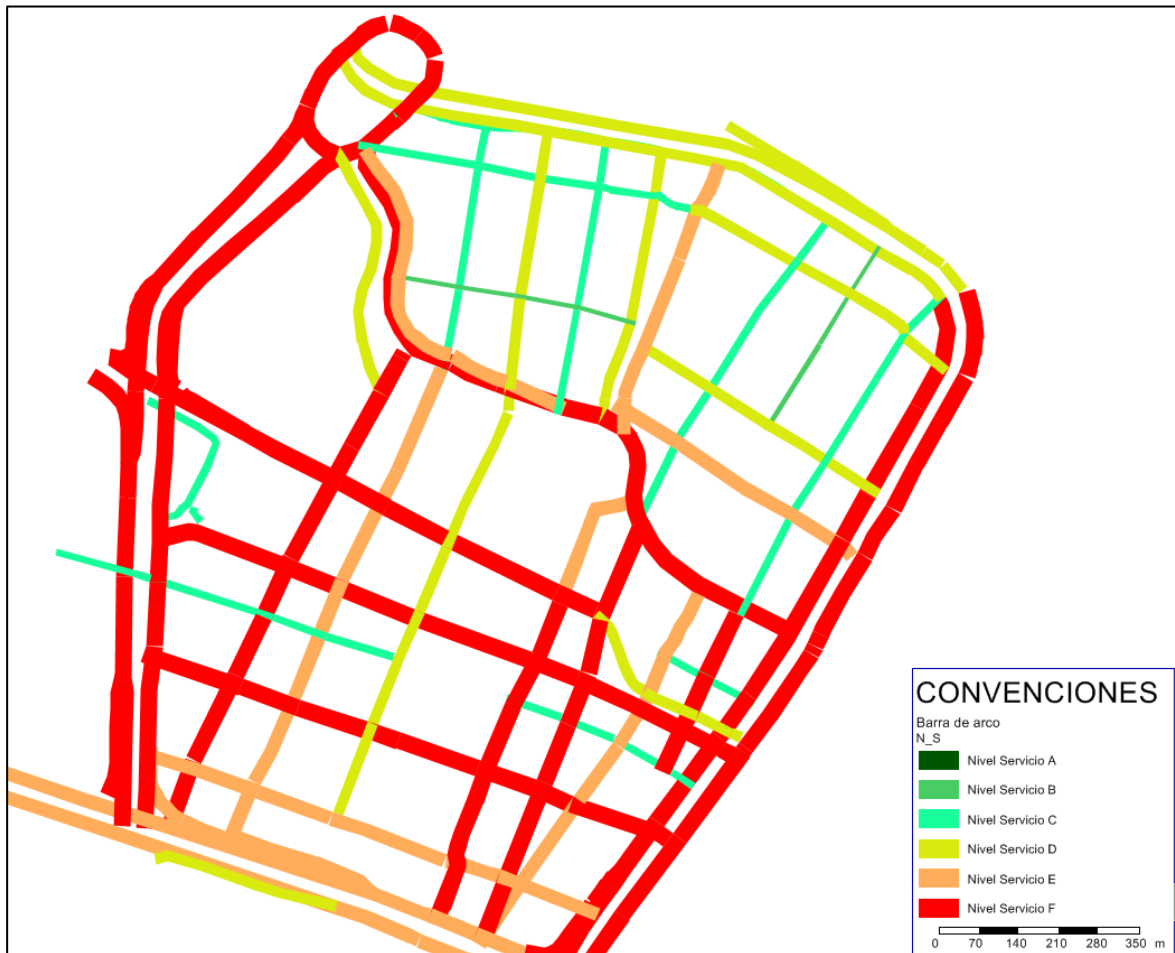
Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen Veh/h	Vehículo - Km	Velocidad en arco Km/h	Vel. menor en tramo	Vel. media pond (Km/h)	Clase de vía			NS con vel. media-ponderada.	NS con vel. mínima
										C.Funcional	C.diseño	Tipo		
	Cl 44	Cr 52 - Cr 59	E - W	0,711	1369	973,359	23							
	Cl 44	Cr 52 - Cr 54	E - W	0,261	1058	276,138	26							
	Cl 44	Cr 54 - Cr 55	E - W	0,105	1369	143,745	23	23,0	24,7	Arteria principal	Urbana	III	D	E
	Cl 44	Cr 55 - A.Ferrocarril	E - W	0,056	1395	78,120	23							
	Cl 44	A. Ferrocarril - Cr 52	W - E	0,335	2214	741,690	27	27,0	27,0	Arteria principal	Urbana	III	D	D
	Cl 44	Cr 59 - Cr 52	W - E	0,709	2214	1569,726	27							
	Cl 44	Cr 52 - Cr 51	W - E	0,101	2991	302,091	24	17,0	24,6	Arteria principal	Urbana	III	D	E
	Cl 44	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,086	2752	236,672	17							
	Cl 44	Cr 50 - Oriental	W - E	0,138	2198	303,324	19							
	Cl 44	Cr 50 - Cr 48	W - E	0,087	617	53,679	27	27,0	30,9	Arteria principal	Urbana	III	C	D
	Cl 44	Cr 48 - Oriental	W - E	0,069	372	25,668	39							

Fuente: Presente estudio

En la Figura 6-8, se indica el nivel de servicio característico por corredor en la zona de estudio. Como se puede observar, los corredores con nivel de servicio más crítico (F) son: en sentido Este – Oeste la Avenida Colombia y Avenida la Playa – De Greiff; y en sentido Oeste – Este, Maturín y Ayacucho. En tanto que en los sentidos norte – sur está Tenerife y en el sentido sur - norte, Palacé y Bolívar. De igual forma en las vías que conforman en anillo se tiene el nivel de servicio F en la Avenida Oriental y Avenida Ferrocarril en los sentidos norte – sur y sur – norte, respectivamente.

Las vías con nivel de servicio más favorable (C y D) se localizan en la parte norte de la zona de estudio, en todos sus sentidos; pero hay que tener en cuenta que estas vías son colectoras, por lo general con 2 carriles de circulación y especialmente tienen una condición social crítica referente a la elevada presencia de personas de la calle que deambulan consumiendo estupefacientes, ocasionado robos y zozobra; además, en esta zona existe un número elevado de prostíbulos y casas de citas que sumado a lo anterior, hacen que éstas vías sean de poca preferencia para los conductores.

Figura 6-8. Nivel de servicio característico del corredor



Fuente: Presente estudio

6.5 Escenario de cobro por congestión para autos particulares

El escenario de cobro por congestión se crea a partir de los resultados del “*Estudio de viabilización para la implementación del sistema de cobro por congestión de la ciudad de Medellín Fase I*”, realizado en el año 2012 por la Universidad Nacional de Colombia – sede Medellín. En este estudio se realizaron 1646 encuestas a población caracterizada previamente con base al estudio de la encuesta origen destino de viajes en el AMVA 2012. Las características de la población objetivo fueron en especial: que posea auto particular, que acostumbre a viajar a las zonas con restricción de pico y placa en las horas pico am y pico pm, y que además, el motivo de los viajes sea de trabajo o estudio (los otros motivos en su mayoría tienen flexibilidad).

El estudio realizado en el año 2012, fue elaborado con una cobertura de las áreas que tenían influencia de la medida de pico y placa, entre las que se encuentra la zona de estudio del centro de Medellín, objeto del presente estudio. Los resultados del estudio permitieron obtener un modelo de elección discreta construido a partir de encuestas de preferencias declaradas y encuestas de preferencias reveladas, en un escenario hipotético de implementación de un sistema de cobro por congestión que remplazaría la medida de pico y placa. De esta forma, el enunciado general de la encuesta que se hizo a cada individuo decía:

“Imagínese que el pico y placa es eliminado de la ciudad y en cambio usted podría viajar en automóvil sin ninguna restricción en las horas pico de la mañana y de la tarde, pagando un cobro por congestión que le permitirá viajar desde y hacia ciertas zonas de la ciudad como el Centro, Laureles, Belén y El Poblado. Esta tarifa deberá pagarse tanto para la mañana (6:30am y 8:30am) como en la tarde (5:30pm y 7:30pm). La restricción por congestión aplica de lunes a viernes en los dos periodos pico del día⁷”;

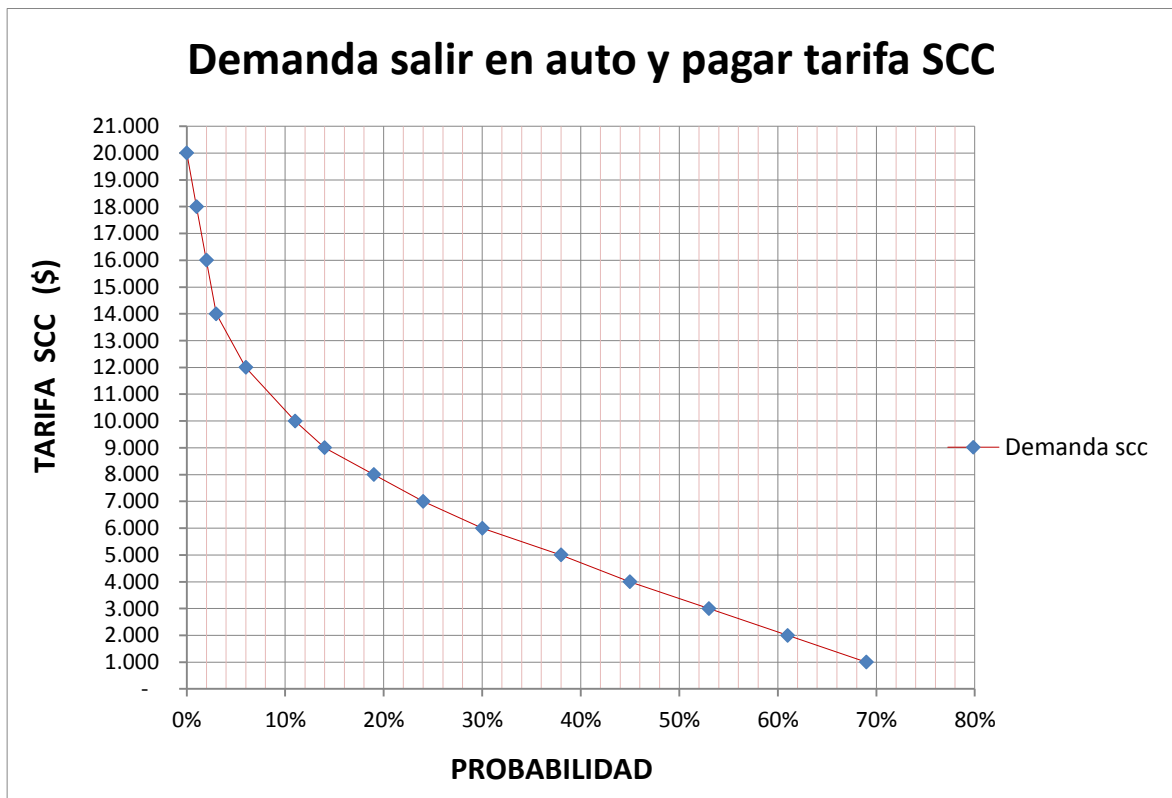
En seguida la encuesta ofrecía varios casos de elección con distintos valores de tiempo de viaje, costos de viaje y tarifa de cobro por congestión para diferentes escenarios que involucran viajes en taxi, bus, metro y automóvil antes, durante y después del cobro por congestión.

El estudio de Sistema de Cobro por Congestión - SCC, caracterizó a la población a encuestar con la menor flexibilidad posible en sus viajes. Si embargo una vez realizadas las encuestas se encontró usuarios especialmente con motivo trabajo que no cumplen horario y tienen la flexibilidad de salir después o antes del SCC. Ya en el modelo de elección discreta se tuvo en cuenta la flexibilidad mediante una variable muda que se activaba si la persona tenía flexibilidad en la elección horaria, afectando así la función de utilidad para las alternativas de elección: viajar antes del SCC y viajar después del SCC.

El estudio presentó como resultado un modelo de elección discreta general y un modelo de elección discreta estratificado; en este último caso se evaluó en un grupo los estratos 1, 2, 3 y 4 y en otro grupo los estratos 5 y 6. Los resultados de estos modelos permitieron obtener curvas de probabilidades de la demanda para las diferentes alternativas de elección. En este caso se utilizará la curva de probabilidad de la demanda para los usuarios que saldrían durante las horas de aplicación y pagarían la tarifa de cobro por congestión. En la Figura 6-9, se indica la curva de la probabilidad de la demanda para los usuarios de auto particular que saldrían y pagarían la tarifa de cobro por congestión para diferentes valores de la tarifa, analizado desde el modelo general; y en la Figura 6-10, se indica la misma probabilidad pero evaluada desde el modelo estratificado.

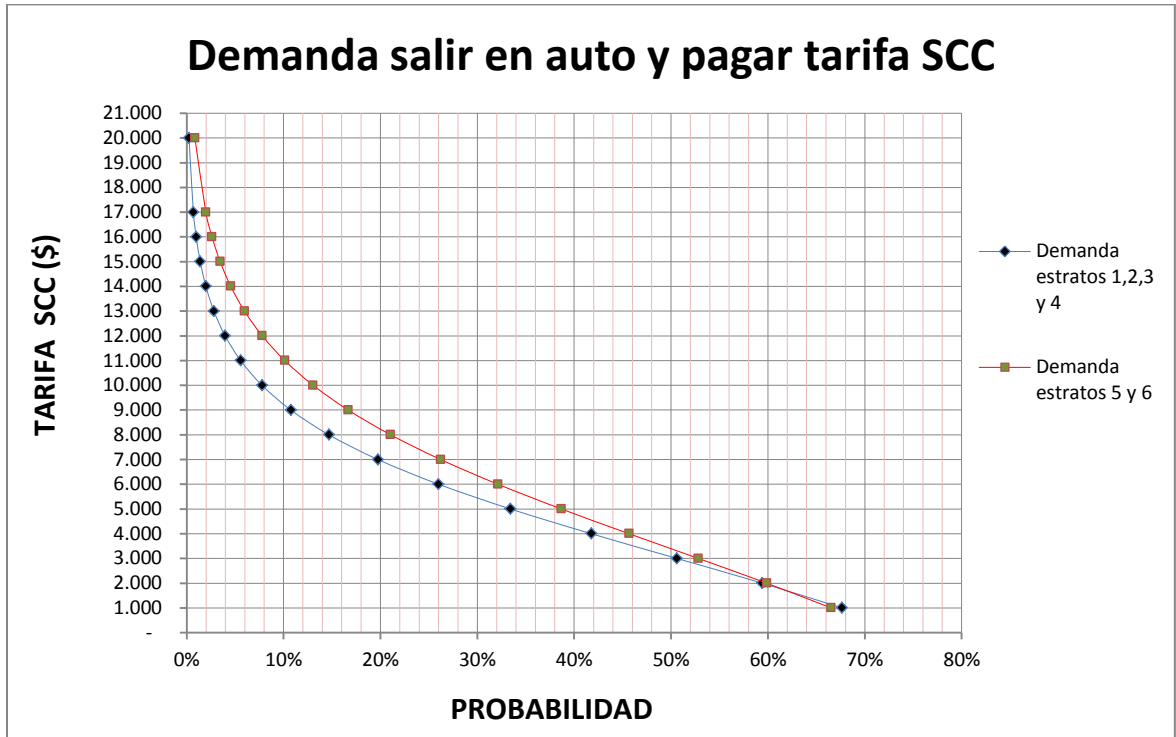
⁷ Estudio de viabilización para la implementación del sistema de cobro por congestión de la ciudad de Medellín.- Fase 1 (2012)

Figura 6-9. Probabilidad demanda usuarios que pagan tarifa cobro por congestión – modelo general



Fuente: Estudio de viabilización para la implementación del sistema de cobro por congestión de la ciudad de Medellín - Fase 1 (2012)

Figura 6-10. Probabilidad demanda usuarios que pagan tarifa cobro por congestión – modelo estratificado



Fuente: Estudio de viabilización para la implementación del sistema de cobro por congestión de la ciudad de Medellín - Fase 1 (2012)

6.5.1 Disminución de la demanda por el sistema de cobro por congestión

En el presente estudio, se utilizará la curva de probabilidad definida para el modelo estratificado (Figura 6-10), por considerarse que el modelo estratificado representa mejor el comportamiento de los usuarios del vehículo particular ante una medida de cobro por congestión, esto debido a que los estratos altos tienen mayor poder adquisitivo, además que para éstas personas la comodidad, seguridad y el confort son determinantes para no dejar el auto y pasarse a otros modos en los casos de viajes sin flexibilidad, como puede suceder en los estratos más bajos.

De esta forma, el paso siguiente es definir la tarifa de cobro por congestión; ésta debe ser de un valor significativo que permita desestimular el uso del vehículo del automóvil particular en una proporción mayor a la efectuada por la restricción de la medida del pico y placa en la ciudad de Medellín en el año base 2014; y a la vez, debe proporcionar cierta cantidad de demanda que justifique y garantice la inversión y operación de un sistema de cobro por congestión. Por otro lado, el Plan Nacional de Desarrollo (PND) 2014 – 2018, “*Todos Por un Nuevo País*”, en el numeral 3 del artículo 32 “*Otras Fuentes de*

Financiación para los Sistemas de Transporte”, da vía libre para la creación y además establece la forma como se deben calcular las tasas para los sistemas de cobro por congestión o contaminación que se implanten en los municipios o distritos mayores a 300.000 habitantes. Según el documento, “Las tasas se calcularán así: La base gravable será el valor promedio de dos (2) pasajes del servicio de transporte público en el Municipio o Distrito” (p. 15). Para el caso de Medellín, analizando los costos del pasaje en transporte de metro, integrados buses y microbuses, se tiene que el valor promedio de un pasaje es de aproximadamente \$2.000.

La forma como se formuló el estudio de viabilización para la implementación del sistema de cobro por congestión de la ciudad de Medellín - Fase 1 en el año 2012, estipuló cobro tanto por entrar como por salir de la zona de cobro por congestión para los autos particulares, así las cosas, un valor de tarifa de \$ 4.000 (valor aproximado de 2 pasajes) por cada evento entrar o salir del anillo de restricción, es un valor considerable que permite obtener el principal objetivo de desestimular el uso de auto particular.

El valor de la tarifa definida para el presente estudio es demostrativa para la aplicación de la metodología objeto de la investigación; el verdadero valor si se implementase un SCC en el centro de Medellín debe ser determinado con base a un estudio socio económico, financiero y de movilidad, en donde se tenga en cuenta la relación costo/beneficio, lo cual puede llegar a ocasionar controversias con los estipulado en el PND 2014 - 2018, sobre todo si el valor de la tarifa resulta ser mayor a los 2 pasajes promedio de transporte público.

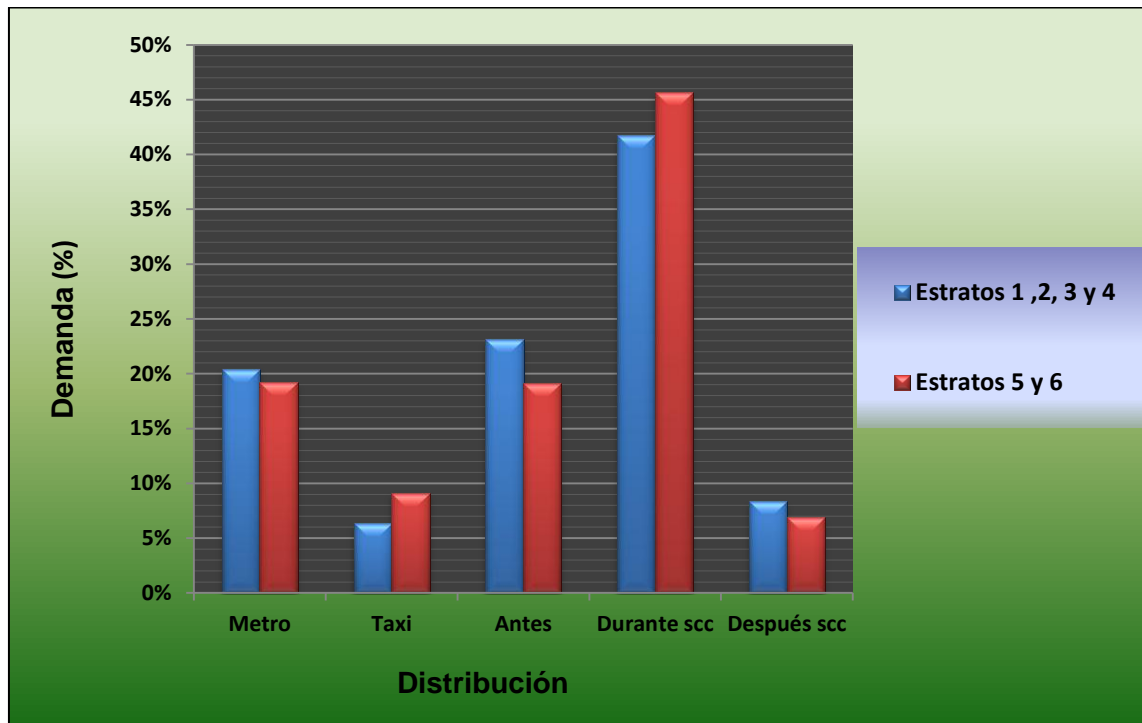
Con esta tarifa, entrando en la curva de la Figura 6-10, se tiene que para el grupo de estratos 1, 2, 3 y 4, la probabilidad de salir y pagar el cobro por congestión es del 42% de usuarios; y para el grupo de estratos 5 y 6, la probabilidad de la demanda es del 46%.

Con estos valores se obtiene una restricción del auto particular del 58% y del 54% respectivamente, para las horas pico; restricción que de acuerdo al mismo modelo de lección discreta permite aplicar otras curvas de probabilidades similares a la indicada en la Figura 6-10 pero para las otras alternativas, y se obtiene como resultado la redistribución de los viajes de la forma como se indica en la Gráfica 6-4.

Es importante aclarar que de acuerdo al “*Estudio de viabilización para la implementación del sistema de cobro por congestión de la ciudad de Medellín Fase I*”, el servicio de transporte público colectivo (Bus) no se vería impactado por la medida del Sistema de Cobro por Congestión (SCC). El estudio de encuestas de Preferencias Declaradas (PD) realizadas a los usuarios del auto particular sin flexibilidad que no pagarían la tarifa de cobro por congestión y se pasarían al modo Bus resultó ser muy reducido, por tanto este grupo en el modelo de elección discreta no fue significativo y no se tuvo en cuenta. Por esta razón, si se implementase un SCC en las mismas condiciones planteadas en el estudio del año 2012, la demanda del bus no se vería impactada, caso contrario ocurriría con el METRO, en cual el estudio indicó ser significativo para el usuario del auto particular que no pagaría la tarifa del SCC. Al existir mayor demanda de usuarios del

METRO. Lo anterior puede alcanzar a impactar la oferta del METRO, llegando a necesitarse más trenes en las horas pico en que funcionaría la medida del SCC.

Gráfica 6-4. Distribución de la demanda de viajes del auto particular con tarifa de SCC igual 4.000 pesos



Fuente: Elaboración propia – con base al estudio de viabilización para la implementación del sistema de cobro por congestión de la ciudad de Medellín - Fase 1 (2012)

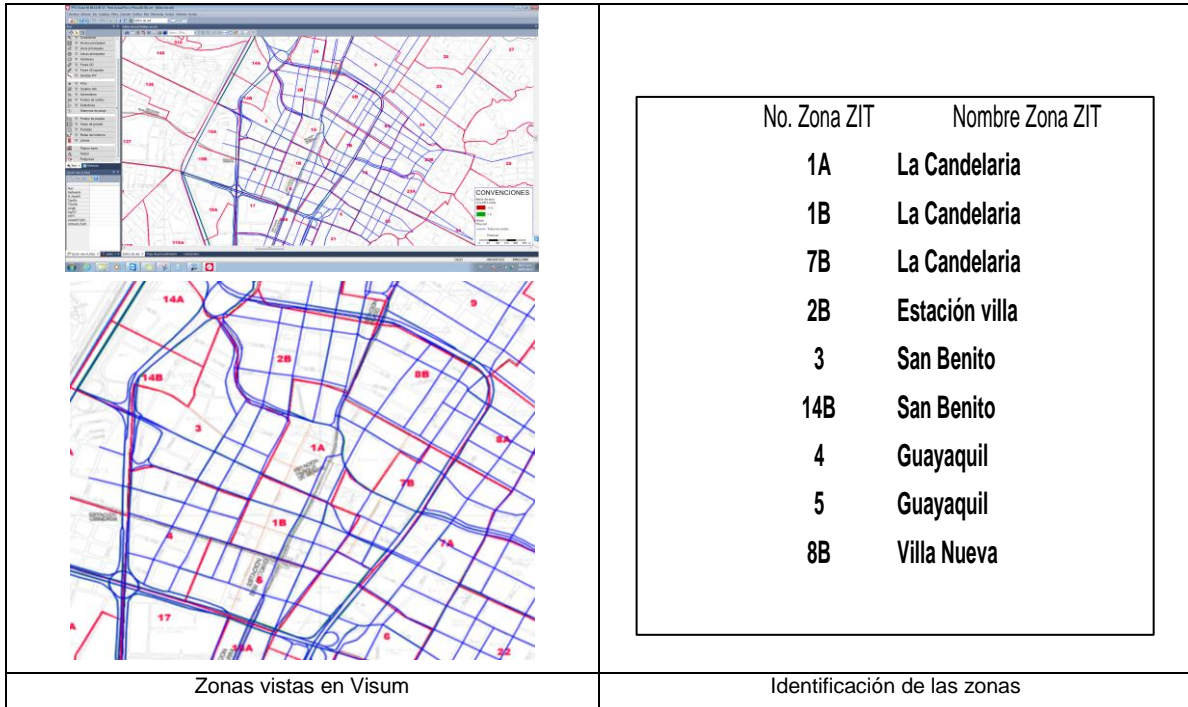
Definida la tarifa de cobro por congestión, y con ella las probabilidades de la demanda de usuarios de auto particular que pagan y circulan en la zona de aplicación, en seguida se debe aplicar dichas probabilidades a la matriz origen destino correspondiente, y con ello se tiene definido el escenario de cobro por congestión para la simulación en Visum.

La matriz afectar es la del modo auto, para ello se define los pares origen destino que tienen influencia en la zona de estudio precisada en la presente investigación. Para estas zonas ZIT, se crea una plantilla de una matriz decisión que indica a cuales viajes que entran o salen se debe restringir la circulación del auto de acuerdo a los valores de probabilidad obtenidos. En la Figura 6-11, se relaciona las zonas ZIT localizadas dentro de la zona de estudio en donde se restringe la circulación de los autos por la tarifa de cobro por congestión.

Ahora, para afectar los viajes de auto con las probabilidades, es necesario conocer la proporción de viajes realizados por usuarios del grupo de estratos 1, 2, 3 y 4 y de igual forma los usuarios del grupo de estratos 5 y 6. Para ello, se consulta la base de datos de la Encuesta Origen Destino de Hogares 2012 y se hace una caracterización de los usuarios de auto que viajaron a la zona de estudio de acuerdo a los grupos de estratos

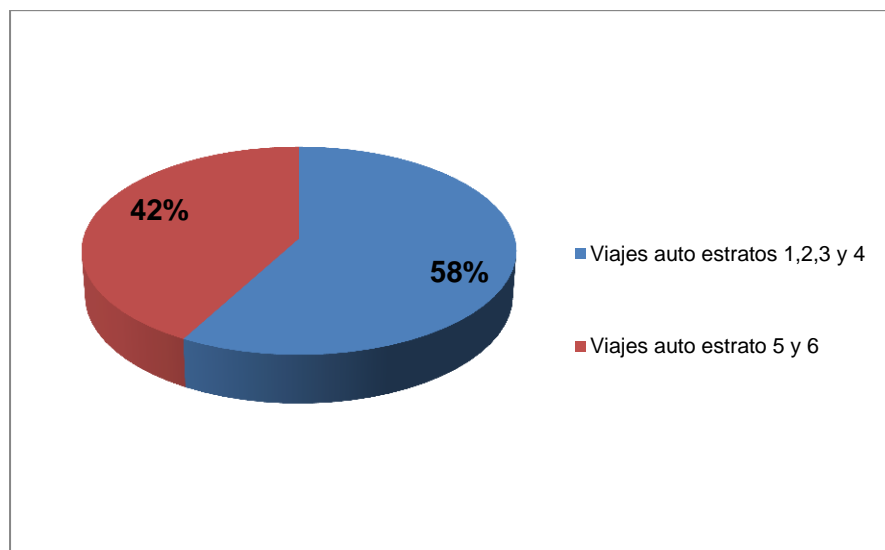
definidos en el modelo. En la Gráfica 6-5, se indica la caracterización de los usuarios que viajan en auto a la zona de estudio.

Figura 6-11. Zonas ZIT en donde se restringe la circulación de auto particular por cobro por congestión



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 6-5. Caracterización por grupos de estratos a los usuarios que viajan en auto a la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia – con base al estudio EOD - 2012

Por otro lado, se debe considerar la probabilidad del volumen de vehículos tipo taxi que se incrementan por los usuarios de auto particular que al existir un SCC con una tarifa igual a \$4.000, se cambiarían al modo taxi y viajan en las horas de funcionamiento de la medida de cobro por congestión aumentando el volumen de vehículos en las vías (ver Gráfica 6-4)

De esto modo se tiene un factor de restricción por cobro por congestión (F_{cc}) para la matriz auto, en los pares origen destino con influencia en la zona de estudio como se describe a continuación:

$$F_{cc} = (0,42 * 0,58 * 1,06 + 0,46 * 0,42 * 1,09) \quad (8)$$

$$\#viajes_{auto} * F_{cc} = \text{Matriz auto restringida por SCC}$$

Donde:

F_{cc} = Factor de restricción por sistema de cobro por congestión.

$\#viajes_{auto}$ = Número de viajes realizado en auto (igual a número de autos).

$0,42*0,58*1,06$ = corresponde al 42% de probabilidad de la demanda de usuarios de auto pertenecientes al grupo de estrato 1, 2, 3 y 4 para un SCC con tarifa de \$4.000, afectado por el 58% de usuarios de estos mismos estratos que en un día típico viajan al centro en auto particular, e incrementado por el 6% de usuarios de auto particular estrato 1, 2, 3 y 4 que al existir un sistema de cobro por congestión con una tarifa de \$4.000, dejan de usar el auto y se transportarían en taxi.

$0,46*0,52*1,09$ = corresponde al 46% de probabilidad de la demanda de usuarios de auto pertenecientes al grupo de estrato 5 y 6 para un SCC con tarifa de \$4.000, afectado por el 42% de usuarios de estos mismos estratos que en un día típico viajan al centro en auto particular, e incrementado por el 9% de usuarios de auto particular estrato 5 y 6 que al existir un sistema de cobro por congestión con una tarifa de \$4.000, dejan de usar el auto y se transportarían en taxi.

6.5.2 Restricciones en la oferta vial por el sistema de cobro por congestión

Al existir un sistema de cobro por congestión, éste estaría controlado en los accesos a la zona de cobro por congestión (entradas y salidas) por algún mecanismo tecnológico (cámaras lectoras, tarjetas con chips, etc.), convirtiendo al anillo vial en el límite de libre circulación (circulación sin pagar tarifa de cobro por congestión). Los usuarios de las zonas externas que antes de la medida de cobro por congestión utilizan las vías internas como enlaces para acortar camino y llegar hacia otras zonas externas (por ejemplo viajeros entre las comunas de Villahermosa, Buenos Aires y las comunas La América,

Belén y Laureles – Estadio), al existir una tarifa de cobro por congestión van a sufrir un costo significativo en su viaje, haciendo que busquen otras vías que eviten entrar y pagar la tarifa de cobro por congestión; es decir, estos viajeros “pasantes” que no tienen ni origen ni destino en la zona de cobro por congestión, cambiarán de ruta y disminuirán el tráfico. De esta forma, se debe buscar la forma de representar en el modelo macroscópico del escenario de cobro por congestión esta situación. Para ello, se debe afectar en el software la impedancia⁸ en la ruta de los viajes a estos usuarios; con el fin que los viajeros tomen rutas alternas que eviten costos elevados tal y como sucedería en la realidad, a no ser que sean caminos obligados por la carencia de otros caminos.

El mayor costo de viaje para los viajeros “pasantes”, es igual al costo de la tarifa de cobro por congestión definida para el escenario (\$4.000) y la deberían pagar tanto al entrar como al salir de la zona. Por esta razón, se debe afectar los arcos de acceso en ambos sentidos (entradas y salidas). En la Figura 6-12, se indica los arcos de entrada y salida a la zona de cobro por congestión que se debe aumentar la impedancia, identificados con color azul.

Para afectar la impedancia de los viajes, de tal forma que el software identifique los mayores costos equivalentes a la tarifa de cobro por congestión, existen varias formas: incrementar el tiempo de viaje, disminuir la velocidad, aumentar la distancia de viaje, entre otras. Como se está analizando niveles de servicio referente a velocidades, la idea es no manipular las velocidades, por esta razón y al facilitarse el cambio de distancia del segmento de vía (arco) en Visum, se trabajará con este parámetro, como se indica a continuación:

$$\text{Tarifa cc} = Vr_t * T \quad (9)$$

Donde:

Tarifa cc = Tarifa de cobro por congestión definida (\$4.000)

Vr_t = Valor del tiempo

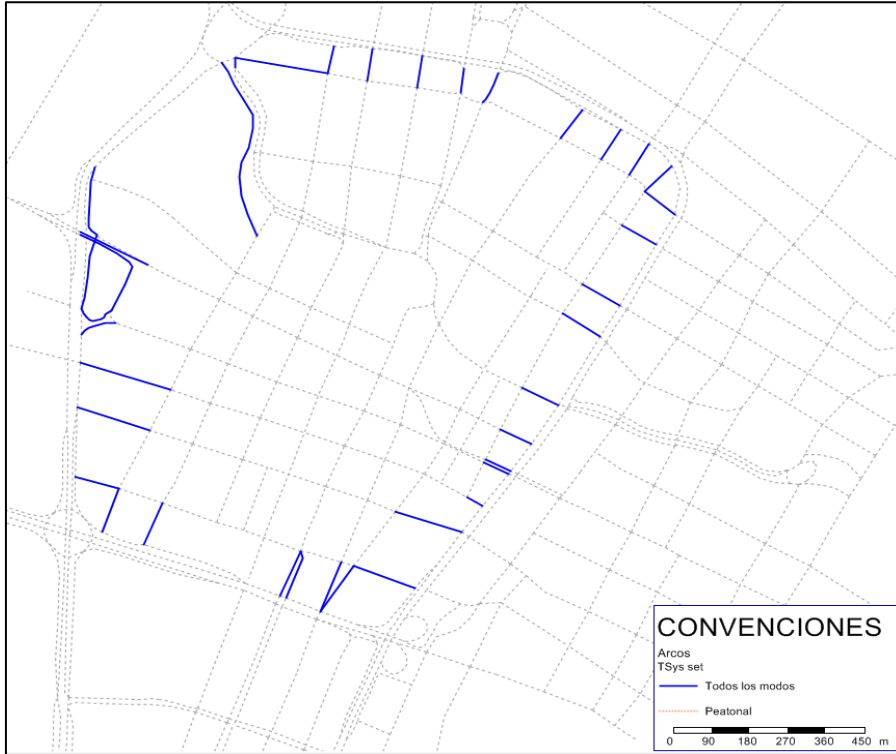
T = Tiempo equivalente al costo de la tarifa de cobro por congestión.

Del estudio de *viabilización para la implementación del sistema de cobro por congestión de la ciudad de Medellín - Fase 1 (2012)*, se tiene que el valor del tiempo para los usuarios de vehículo particular es de **\$150/minuto**.

Con estos valores, despejando T de la ecuación (9), se tiene un tiempo de 26,67 minutos (0,4445 horas).

⁸ *Impedancia: Se refiere a la dificultad o restricciones para moverse en una red de transporte urbano, medida en distancia, tiempo o costo.*

Figura 6-12. Arcos acceso a la zona de cobro por congestión



Fuente: Elaboración propia

Ahora, se debe encontrar el incremento de distancia (ΔL) partiendo de las condiciones de velocidad del escenario base de comparación (sin pico y placa), de tal forma que ΔL represente el costo de la tarifa de cobro por congestión en cada uno de los segmentos de vía que se han determinado como accesos.

De la ecuación (10), Tiempo (T) igual a Longitud (L) sobre Velocidad (V), despejando Longitud, se obtiene el incremento de longitud ΔL , indicado en la ecuación (11).

$$T = \frac{L}{V} \quad (10)$$

$$\Delta L = T * V \quad (11)$$

Donde;

$T = 0,4445$ horas.

$V =$ Velocidad de viaje determinada en el escenario sin pico y placa en Km/h.

$\Delta L =$ Incremento de distancia en viaje por cobro por congestión (Km)

En la Tabla 6-12, se indica los valores de la impedancia expresada en distancia, la cual equivale al valor de la tarifa de cobro por congestión. El valor de la última columna, es la nueva distancia del segmento de vía que se debe introducir en Visum.

Es importante aclarar que no se hizo asignación multiclase con diferentes valores del tiempo para considerar la diferenciación de percepción en el flujo de atravesamiento de la zona interna, debido a que se trabajó con un modelo estático y porque en la práctica es poco probable que en un SCC el usuario del auto particular “pasante” llámese de estrato bajo o alto utilice una vía interna que le incremente los costos de viaje (debiendo pagar el valor de la tarifa sólo por pasar), teniendo la opción de desplazarse por vías periféricas que están exentas. De todas formas, es importante tener en cuenta que la reducción de demanda si consideró y tuvo en cuenta en la reducción de las matrices un factor de descuento que da cuenta a la respuesta diferenciada de los dos grupos de estratos (bajos y altos).

Tabla 6-12. Determinación de la impedancia equivalente al costo de la tarifa de cobro por congestión - expresada en longitud de vía

Acceso - Segmento de arco		Longitud (Km) en Visum	Velocidad (Km/h)	ΔL (Km)	L Final (Km)
Nombre	ID				
Tenerife	Cr 55	0,115	10	4,45	4,560
Cúcuta	Cr 54	0,112	16	7,11	7,224
Bolívar	Cr 51	0,123	34	15,11	15,236
Bolívar	Cr 52	0,125	12	5,33	5,459
Palacé	Cr 50	0,132	22	9,78	9,911
Junín	Cr 49	0,137	19	8,45	8,583
Amador	CI 45	0,154	20	8,89	9,044
Amador	CI 45	0,154	27	12,00	12,156
Maturín	CI 46	0,165	11	4,89	5,055
Pichincha	CI 48	0,043	22	9,78	9,822
Ayacucho	CI 49	0,065	15	6,67	6,733
Ayacucho	CI 49	0,065	19	8,45	8,511
Colombia	CI 50	0,082	44	19,56	19,640
La Playa	CI 52	0,097	22	9,78	9,876
Maracaibo	CI 53	0,106	15	6,67	6,774
Caracas	CI 54	0,101	38	16,89	16,992
Bolivia	CI 56	0,095	40	17,78	17,875
La Paz	CI 57	0,091	16	7,11	7,203
Sucre	Cr 47	0,091	24	10,67	10,759
Ecuador	Cr 48	0,089	16	7,11	7,201
Venezuela	Cr 49	0,088	45	20,00	20,091
Palacé	Cr 50	0,090	45	20,00	20,093
Bolívar	Cr 51	0,084	14	6,22	6,307

Acceso - Segmento de arco		Longitud (Km) en Visum	Velocidad (Km/h)	ΔL (Km)	L Final (Km)
Nombre	ID				
Bolívar	Cr 51	0,061	36	16,00	16,063
Carabobo	Cr 52	0,081	28	12,45	12,527
Cundinamarca	Cr 53	0,081	23	10,22	10,305
Cúcuta	Cr 54	0,068	35	15,56	15,626
La Paz	CI 57	0,220	27	12,00	12,222
De Greiff	CI 53	0,022	27	12,00	12,024
Cr 56	Cr 56	0,465	34	15,11	15,578
Cr 57	Cr 57	0,179	29	12,89	13,070
Colombia	CI 50	0,180	13	5,78	5,959
Colombia	CI 50	0,270	27	12,00	12,272
Entrada a la Cr 57	Cr 57	0,191	25	11,11	11,304
Ayacucho	CI 49	0,094	44	19,56	19,652
Ayacucho	CI 49	0,092	40	17,78	17,872
Pichincha	CI 48	0,223	23	10,22	10,447
Maturín	CI 46	0,179	19	8,45	8,625
Amador	CI 45	0,105	20	8,89	8,995

Fuente: Elaboración propia

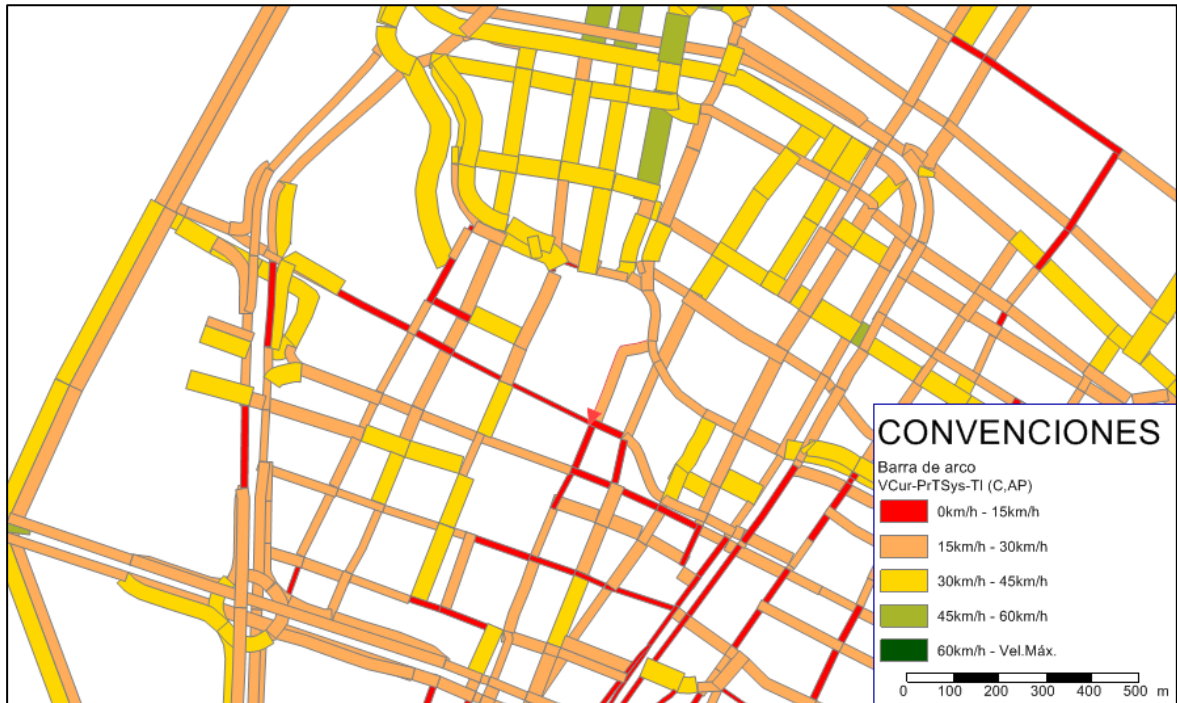
6.5.3 Simulación del escenario de cobro por congestión

Como paso siguiente, se realiza la modelación en Visum del escenario de cobro por congestión, bajo las condiciones de demanda y oferta vial descritas anteriormente. Los resultados de la simulación son los siguientes:

- *Velocidad de viaje*

En la Figura 6-13, se indica el mapa de velocidades de viaje en las vías internas y del anillo para el escenario de cobro por congestión. Se puede apreciar un ligero aumento de las velocidades en las vías internas con respecto al escenario sin pico y placa; continúa siendo más favorables las velocidades en la parte norte de la zona de estudio, y además, la vía más crítica continua siendo la calle 50 (Colombia) con una velocidad por debajo de 15 Km/h. Por su parte en las vías que conforman el anillo, se observa una leve disminución de las velocidades lo cual es apenas lógico porque estas vías son el límite permitido para circular los autos libremente sin tener que pagar la tarifa de cobro por congestión. Más adelante se realizará una comparación y un análisis más en detalle sobre los resultados de las velocidades.

Figura 6-13. Mapa velocidades de viaje en las vías con escenario de cobro por congestión



Fuente: Presente estudio

6.5.4 Determinación nivel de servicio de las vías – escenario cobro por congestión

Utilizando la misma metodología que en el caso del escenario sin pico y placa, se calcula el nivel de servicio para las vías internas y del anillo, para las condiciones del escenario de cobro por congestión.

Se calcula el nivel de servicio para las mismas condiciones: en cada uno de los segmentos de arco y por corredor con la velocidad de viaje mínima del tramo y con velocidad de viaje media ponderada con el flujo y la distancia. En la Tabla 6-13, se indica los resultados de los niveles de servicio para cada una de las condiciones descritas.

Tabla 6-13. Nivel de servicio de las vías bajo sistema de cobro por congestión

Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen (Veh/h)	Vehículo - Km	Velocidad en arco Km/h	Vel. menor en tramo	Vel. media pond. (Km/h)	Clase de vía			NS tramo vel. Media-pond.	NS tramo vel. mínima	NS por arco
										C.Funcional	C.diseño	Tipo			
Vías internas															
Sucre	Cr 47	CI 58 - CI 57	N - S	0,091	702	63,882	33	28,0	29,12	Arteria menor	Urbana	IV	C	C	B
	Cr 47	CI 57 - CI 56	N - S	0,099	988	97,812	30								C
	Cr 47	CI 56 - CI 54	N - S	0,174	1042	181,308	28								C
	Cr 47	CI 54 - CI 53	N - S	0,088	1042	91,696	28								C
	Cr 47	CI 53 - CI 52	N - S	0,209	1033	215,897	29	11,0	18,20	Arteria menor	Urbana	IV	D	F	C
	Cr 47	CI 52 - CI 50	N - S	0,117	887	103,779	24								C
	Cr 47	CI 50 - CI 49	N - S	0,081	1032	83,592	21								C
	Cr 47	CI 49 - CI 48	N - S	0,096	1209	116,064	11								F
Junín	Cr 49	CI 44 - CI 45	S - N	0,137	1082	148,234	26	19,0	23,50	Arteria menor	Urbana	IV	C	D	C
	Cr 49	CI 45 - CI 46	S - N	0,168	1161	195,048	19								D
	Cr 49	CI 46 - CI 48	S - N	0,116	1027	119,132	25								C
	Cr 49	CI 48 - CI 49	S - N	0,089	815	72,535	21								C
	Cr 49	CI 49 - CI 50	S - N	0,088	367	32,296	31	35,0	35,00	Arteria menor	Urbana	IV	B	B	B
	Cr 49	CI 49 - CI 52	S - N	0,115	247	28,405	33								B
	Cr 49	CI 54 - CI 56	S - N	0,175	223	39,025	35								B
	Cr 49	CI 56 - CI 57	S - N	0,112	223	24,976	35								B
Cr 49	CI 57 - CI 58	S - N	0,088	1	0,088	45								A	
Palacé	Cr 50	CI 44 - CI 45	S - N	0,132	910	120,12	30	14,0	26,47	Arteria menor	Urbana	IV	C	D	C
	Cr 50	CI 45 - CI 46	S - N	0,168	834	140,112	33								B
	Cr 50	CI 46 - CI 48	S - N	0,110	912	100,32	27								C
	Cr 50	CI 48 - CI 49	S - N	0,094	851	79,994	28								C
	Cr 50	CI 49 - CI 50	S - N	0,094	1293	121,542	14	29,0	35,80	Arteria menor	Urbana	IV	B	C	D
	Cr 50	CI 50 - CI 52	S - N	0,176	941	165,616	19								D
	Cr 50	CI 52 - CI 53	S - N	0,177	759	134,343	29								C
	Cr 50	CI 53 - CI 54	S - N	0,088	793	69,784	40								A
	Cr 50	CI 54 - CI 56	S - N	0,169	803	135,707	38								B
	Cr 50	CI 56 - CI 57	S - N	0,112	420	47,04	39								B
	Cr 50	CI 57 - CI 58	S - N	0,090	136	12,24	45								A
	Bolívar	Cr 51	CI 44 - CI 45	S - N	0,125	664	83								16
Cr 51		CI 45 - CI 46	S - N	0,173	580	100,34	23	C							
Cr 51		CI 46 - CI 48	S - N	0,110	674	74,14	16	D							
Cr 51		CI 48 - CI 49	S - N	0,099	961	95,139	11	F							
Cr 51		CI 49 - CI 50	S - N	0,097	1068	103,596	14	D							
Cr 51		CI 50 - CI 51	S - N	0,241	40	9,64	22	18,0	26,36	Arteria menor	Urbana	IV	C	D	C

Corredor	ID	Tramo	Senti do	Longi tud (Km)	Volumen (Veh/h)	Vehículo - Km	Velocida d en arco Km/h	Vel. menor en tramo	Vel. media pond. (Km/h)	Clase de vía			NS tramo vel. Media- pond.	NS tramo vel. mínim a	NS por arco
										C.Funcion al	C.diseñ o	Tip o			
	Cr 52	CI 51 - CI 52	S - N	0,111	922	102,342	20								D
	Cr 51	CI 53 - CI 54	S - N	0,064	1056	67,584	26								C
	Cr 51	CI 54 - CI 56	S - N	0,092	934	85,928	36								B
	Cr 51	CI 56 - CI 57	S - N	0,268	1127	302,036	30								C
	Cr 51	CI 57 - CI 58	S - N	0,084	1728	145,152	18								D
Carabobo	Cr 52	CI 58 - CI 57	N - S	0,081	424	34,344	34	34,0	36,64	Arteria menor	Urbana	IV	B	B	B
	Cr 52	CI 57 - CI 54	N - S	0,224	304	68,096	35								B
	Cr 52	CI 54 - CI 52	N - S	0,184	468	86,112	39								B
Cundinamarca	Cr 53	CI 45 - CI 46	S - N	0,168	184	30,912	35	17,0	29,51	Arteria menor	Urbana	IV	C	D	B
	Cr 53	CI 46 - CI 48	S - N	0,114	348	39,672	34								B
	Cr 53	CI 48 - CI 49	S - N	0,097	219	21,243	17								D
	Cr 53	CI 49 - CI 50	S - N	0,120	369	44,28	32								B
	Cr 53	CI 50 - CI 51	S - N	0,083	720	59,76	28								C
	Cr 53	CI 51 - CI 53	S - N	0,174	309	53,766	27								C
	Cr 53	CI 53 - CI 54	S - N	0,158	415	65,57	22								C
	Cr 53	CI 54 - CI 57	S - N	0,219	386	84,534	36								B
	Cr 53	CI 57 - CI 58	S - N	0,081	194	15,714	28								C
Cúcuta	Cr 54	CI 58 - CI 57	N - S	0,068	1	0,068	35	33,0	34,17	Arteria menor	Urbana	IV	B	B	B
	Cr 54	CI 57 - CI 54	N - S	0,224	200	44,8	35								B
	Cr 54	CI 54 - CI 53	N - S	0,126	251	31,626	33								B
	Cr 54	CI 53 - CI 51	N - S	0,180	823	148,14	28	16,0	25,35	Arteria menor	Urbana	IV	C	D	C
	Cr 54	CI 51 - CI 50	N - S	0,080	1372	109,76	26								C
	Cr 54	CI 50 - CI 49	N - S	0,132	792	104,544	26								C
	Cr 54	CI 49 - CI 48	N - S	0,108	779	84,132	25								C
	Cr 54	CI 48 - CI 46	N - S	0,111	473	52,503	31								B
	Cr 54	CI 46 - CI 45	N - S	0,165	387	63,855	16								D
Cr 54	CI 45 - CI 44	N - S	0,112	286	32,032	19	D								
Tenerife	Cr 55	CI 53 - CI 52A	N - S	0,071	61	4,331	18	10,0	16,55	Arteria menor	Urbana	IV	D	F	D
	Cr 55	CI 52A - CI 51	N - S	0,106	735	77,91	15								D
	Cr 55	CI 51 - CI 50	N - S	0,078	751	58,578	18								D
	Cr 55	CI 50 - CI 49	N - S	0,142	878	124,676	15								D
	Cr 55	CI 49 - CI 48	N - S	0,112	907	101,584	17								D
	Cr 55	CI 48 - CI 46	N - S	0,113	297	33,561	21								C
	Cr 55	CI 46 - CI 45	N - S	0,164	149	24,436	18								D
	Cr 55	CI 45 - CI 44	N - S	0,115	10	1,15	10								F

Corredor	ID	Tramo	Senti do	Longi tud (Km)	Volumen (Veh/h)	Vehículo - Km	Velocida d en arco Km/h	Vel. menor en tramo	Vel. media pond. (Km/h)	Clase de vía			NS tramo vel. Media- pond.	NS tramo vel. mínim a	NS por arco							
										C.Funcion al	C.diseño	Tip o										
Amador	Cl 45	A.Ferrocarril - Cr 55	W - E	0,105	21	2,205	23	13,0	18,03	Arteria menor	Urbana	IV	D	E	C							
	Cl 45	Cr 55 - Cr 54	W - E	0,109	142	15,478	23								C							
	Cl 45	Cr 54 - Cr 53	W - E	0,135	242	32,67	17								D							
	Cl 45	Cr 53 - Cr 52A	W - E	0,068	109	7,412	13								E							
	Cl 45	Cr 52A - Cr 51	W - E	0,145	99	14,355	13								E							
	Cl 45	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,098	77	7,546	24								C							
	Cl 45	Cr 50 - Cr 49	W - E	0,031	79	2,449	22								C							
	Cl 45	Cr 49 - Oriental	W - E	0,154	1	0,154	20								D							
Maturín	Cl 46	A.Ferrocarril - Cr 55	W - E	0,179	66	11,814	19	10,0	13,46	Arteria menor	Urbana	IV	E	F	D							
	Cl 46	Cr 55 - Cr 54	W - E	0,107	172	18,404	16								D							
	Cl 46	Cr 54 - Cr 53	W - E	0,123	268	32,964	16								D							
	Cl 46	Cr 53 - Cr 52A	W - E	0,062	184	11,408	16								D							
	Cl 46	Cr 52A - Cr 51	W - E	0,147	200	29,4	14								D							
	Cl 46	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,103	160	16,48	12								E							
	Cl 46	Cr 50 - Cr 49	W - E	0,071	234	16,614	10								F							
	Cl 46	Cr 49 - Oriental	W - E	0,165	390	64,35	11								F							
Pichincha	Cl 48	Oriental - Cr 47	E - W	0,043	685	29,455	28	24,0	27,39	Arteria menor	Urbana	IV	C	C	C							
	Cl 48	Cr 47 - Cr 49	E - W	0,116	526	61,016	24								C							
	Cl 49	Cr 49 - Cr 50	E - W	0,098	562	55,076	30								C							
	Cl 50	Cr 50 - Cr 51	E - W	0,102	718	73,236	28								C							
	Cl 51	Cr 53 - Cr 54	E - W	0,122	128	15,616	36	28,0	29,52			IV	C	C	B							
	Cl 52	Cr 54 - Cr 55	E - W	0,100	390	39	36								B							
	Cl 53	Cr 55 - A.Ferrocarril	E - W	0,223	1048	233,704	28								C							
Ayacucho	Cl 49	A.Ferrocarril - Cr 56B	W - E	0,092	1	0,092	40	14,0	19,20	Arteria menor	Urbana	IV	D	D	A							
	Cl 49	Cr 56B - Cr 55	W - E	0,187	1295	242,165	25								C							
	Cl 49	Cr 55 - Cr 54	W - E	0,095	1306	124,07	21								C							
	Cl 49	Cr 54 - Cr 53	W - E	0,124	1281	158,844	20								D							
	Cl 49	Cr 53 - Cr 51	W - E	0,218	1131	246,558	18								D							
	Cl 49	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,093	777	72,261	14								D							
	Cl 49	Cr 50 - Cr 49	W - E	0,097	1062	103,014	14								D							
	Cl 49	Cr 49 - Cr 47	W - E	0,105	1094	114,87	14								D							
	Cl 49	Cr 47 - Oriental	W - E	0,065	918	59,67	20								D							
	Cl 49	Oriental - Cr 47	E - W	0,066	322	21,252	20								20,0	20,00	Arteria menor	Urbana	IV	D	D	D
	Cl 49	Cr 47 - Cr 49	E - W	0,105	322	33,81	20															D
Cl 49	Cr 49 - Cr 50	E - W	0,163	799	130,237	20	D															
Colombia	Cl 50	Cr 49 - Cr 47	W - E	0,109	146	15,914	35	35,0	35,05	Arteria menor	Urbana	III	C	C	C							

Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen (Veh/h)	Vehículo - Km	Velocidad en arco Km/h	Vel. menor en tramo	Vel. media pond. (Km/h)	Clase de vía			NS tramo vel. Media-pond.	NS tramo vel. mínima	NS por arco							
										C.Funcional	C.diseño	Tip o										
	Cl 50	Cr 47 - Oriental	W - E	0,082	1	0,082	44	9,0	12,53	Arteria principal	Urbana	III	F	F	B							
	Cl 50	Cr 50 - Cr 51	E - W	0,075	1047	78,525	15								F							
	Cl 50	Cr 51 - Cr 53	E - W	0,216	1373	296,568	9								F							
	Cl 50	Cr 53 - Cr 54	E - W	0,117	996	116,532	10								F							
	Cl 50	Cr 54 - Cr 55	E - W	0,090	1578	142,02	14								F							
	Cl 50	Cr 55 - Cr 56A	E - W	0,189	1452	274,428	14								F							
	Cl 50	Cr 56A - A.Ferrocarril	E - W	0,180	1196	215,28	15								F							
Av. La Playa - De Greiff	Cl 52	Oriental - Cr 47	E - W	0,097	272	26,384	22	13,0	20,27	Arteria principal	Urbana	III	E	F	E							
	Cl 52	Cr 47 - Cr 49	E - W	0,101	462	46,662	19								E							
	Cl 52	Cr 49 - Cr 50	E - W	0,158	709	112,022	18								E							
	Cl 52	Cr 50 - Cr 51	E - W	0,163	882	143,766	17								E							
	Cl 53	Cr 51 - Cr 52	E - W	0,106	723	76,638	18								E							
	Cl 53	Cr 52 - Cr 53	E - W	0,105	1001	105,105	13								F							
	Cl 53	Cr 53 - Cr 54	E - W	0,107	957	102,399	23								D							
	Cl 53	Cr 54 - Cr 55	E - W	0,069	386	26,634	27								D							
	Cl 53	Cr 55 Cl 54	E - W	0,150	326	48,9	27								D							
	Cr 56	Cl 54 - A.Ferrocarril	S - N	0,233	326	75,958	32								C							
	Cr 56	Cr 52 - Cr 53	E - W	0,109	124	13,516	30								30,0	30,19	Arteria menor	Urbana	III	C	C	C
	Cr 56	Cr 53 - Cr 54	E - W	0,108	1	0,108	35															C
	Cr 56	Cr 54 - Cl 54	S - N	0,199	1	0,199	35															C
	Cr 56	Cl 54 - Cl 57	S - N	0,238	1	0,238	35															C
Maracaibo	Cl 53	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,120	203	24,36	19	19,0	23,31	Arteria menor	Urbana	IV	C	D	D							
	Cl 53	Cr 50 - Cr 47	W - E	0,251	169	42,419	29								C							
	Cl 53	Cr 47 - Oriental	W - E	0,106	177	18,762	20								D							
Caracas	Cl 54	Oriental - Cr 47	E - W	0,101	54	5,454	45	26,0	33,14	Arteria menor	Urbana	IV	B	C	A							
	Cl 54	Cr 47 - Cr 48	E - W	0,054	1	0,054	45								A							
	Cl 54	Cr 48 - Cr 49	E - W	0,073	842	61,466	37								B							
	Cl 54	Cr 49 - Cr 50	E - W	0,123	656	80,688	33								B							
	Cl 54	Cr 50 - Cr 51	E - W	0,140	646	90,44	26								C							
Juanambú	Cl 54	Cr 51 - Cr 52	E - W	0,099	309	30,591	36	35,0	36,32	Arteria menor	Urbana	IV	B	B	B							
	Cl 54	Cr 52 - Cr 53	E - W	0,118	1	0,118	40								A							
	Cl 54	Cr 53 - Cr 54	E - W	0,092	28	2,576	40								A							
	Cl 54	Cr 54 - Cr 56	E - W	0,126	1	0,126	35								B							
La Paz	Cl 57	A.Ferrocarril - Cr 54	W - E	0,220	308	67,76	32	32,0	34,29	Arteria menor	Urbana	IV	B	B	B							
	Cl 57	Cr 54 - Cr 53	W - E	0,094	278	26,132	35								B							
	Cl 57	Cr 53 - Cr 52	W - E	0,120	514	61,68	33								B							

126 Variación del nivel de servicio de las vías urbanas en una zona con tarifa de cobro por congestión para autos particulares

Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen (Veh/h)	Vehículo - Km	Velocidad en arco Km/h	Vel. menor en tramo	Vel. media pond. (Km/h)	Clase de vía			NS tramo vel. Media-pond.	NS tramo vel. mínima	NS por arco
										C.Funcional	C.diseño	Tip o			
	Cl 57	Cr 52 - Cr 51D	W - E	0,102	514	52,428	33	18,0	19,25	Arteria menor	Urbana	IV	D	D	B
	Cl 57	Cr 51D - Cr 51	W - E	0,059	553	32,627	43								A
	Cl 57	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,206	140	28,84	20								D
	Cl 57	Cr 50 - Cr 49	W - E	0,110	424	46,64	19								D
	Cl 57	Cr 49 - Cr 48	W - E	0,075	1030	77,25	18								D
	Cl 57	Cr 48 - Cr 47	W - E	0,061	907	55,327	19								D
	Cl 57	Cr 47 - Oriental	W - E	0,091	633	57,603	21								C

Anillo vial

Av. Oriental	Cr 46	Cl 44 - Cl 45	S - N	0,148	1470	217,56	10	10,0	16,39	Arteria principal	Urbana	III	E	F	F
	Cr 46	Cl 45 - Cl 47	S - N	0,168	1470	246,96	10								F
	Cr 46	Cl 47 - Cl 49	S - N	0,186	660	122,76	12								F
	Cr 46	Cl 49 - Cl 52	S - N	0,198	686	135,828	14								F
	Cr 46	Cl 52 - Cl 53	S - N	0,192	826	158,592	24								D
	Cr 46	Cl 53 - Cl 54	S - N	0,096	765	73,44	24								D
	Cr 46	Cl 54 - Cl 55	S - N	0,088	1478	130,064	20								E
	Cr 46	Cl 55 - Cl 56	S - N	0,087	1477	128,499	20								E
	Cr 46	Cl 56 - Cl 57	S - N	0,087	1477	128,499	20								E
	Cr 46	Cl 57 - Cl 58	S - N	0,142	1797	255,174	19								E
Av. Oriental	Cr 46	Cl 58 - Cl 57	N - S	0,126	701	88,326	26	7,0	13,60	Arteria principal	Urbana	III	F	F	D
	Cr 46	Cl 57 - Cl 56	N - S	0,088	509	44,792	27								D
	Cr 46	Cl 56 - Cl 54	N - S	0,174	509	88,566	26								D
	Cr 46	Cl 54 - Cl 53	N - S	0,090	605	54,45	21								E
	Cr 46	Cl 53 - Cl 52	N - S	0,198	605	119,79	21								E
	Cr 46	Cl 52 - Cl 50	N - S	0,118	1354	159,772	16								F
	Cr 46	Cl 50 - Cl 49	N - S	0,083	1394	115,702	16								F
	Cr 46	Cl 49 - Cl 48	N - S	0,102	1902	194,004	12								F
	Cr 46	Cl 48 - Cl 46	N - S	0,079	2569	202,951	11								F
	Cr 46	Cl 46 - Cl 45	N - S	0,103	2871	295,713	9								F
Av. Oriental (Echeverry)	Cl 58	Cr 47 - Cr 48	E - W	0,094	2641	248,254	21	21,0	22,74	Arteria principal	Urbana	III	E	E	E
	Cl 58	Cr 48 - Cr 49	E - W	0,073	2309	168,557	22								E
	Cl 58	Cr 49 - A.Ferrocarril	E - W	1,012	1340	1356,08	22								E
	Cl 58	Cr 49 - Cr 51	E - W	0,335	1093	366,155	27	27,0	27,00	Arteria principal	Urbana	III	D	D	D
	Cl 58	A.Ferrocarril - Cr 49	W - E	1,013	677	685,801	36								C
	Cl 58	Cr 49 - Cr 48	W - E	0,074	1301	96,274	27								D
	Cl 58	Cr 48 - Cr 47	W - E	0,078	1301	101,478	28								D

Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen (Veh/h)	Vehículo - Km	Velocidad en arco Km/h	Vel. menor en tramo	Vel. media pond. (Km/h)	Clase de vía			NS tramo vel. Media-pond.	NS tramo vel. mínima	NS por arco
										C.Funcional	C.diseño	Tipo			
	Cl 58	A.Ferrocarril - Cr 54	W - E	0,177	148	26,196	30	22,0	30,17	Arteria menor	Urbana	IV	C	C	C
	Cl 58	Cr 54 - Cr 53	W - E	0,092	1	0,092	22								C
	Cl 58	Cr 53 - Cr 52	W - E	0,119	9	1,071	25								C
	Cl 58	Cr 52 - Cr 51 D	W - E	0,109	307	33,463	25								C
	Cl 58	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,226	624	141,024	32								B
	Cl 58	Cr 50 - Cr 49	W - E	0,103	624	64,272	29								C
Av. Ferrocarril	Cr 57	Cl 44 - Cl 46	S - N	0,317	718	227,606	22	14,0	19,39	Arteria principal	Urbana	III	E	F	E
	Cr 57	Cl 46 - Cl 48	S - N	0,111	1587	176,157	15								F
	Cr 57	Cl 48 - Cl 49	S - N	0,070	1560	109,2	16								F
	Cr 57	Cl 49 - Cl 56B	S - N	0,065	1560	101,4	18								E
	Cr 57	Cr 56B - Cl 50	S - N	0,182	1476	268,632	14								F
	Cr 57	Cl 50 - Cl 51	S - N	0,178	1476	262,728	17								E
	Cr 57	Cl 51 - Cr 56	S - N	0,399	1750	698,25	20								E
	Cr 57	Cr 56 - Cl 57	S - N	0,113	2111	238,543	23								D
	Cr 57	Cl 57 - Cl 58	S - N	0,112	2363	264,656	25								D
	Cr 57	Cl 59 - Cl 58	N - S	0,195	1065	207,675	37	15,0	19,73	Arteria principal	Urbana	III	E	F	C
	Cr 57	Cl 58 - Cl 56	N - S	0,072	1904	137,088	22								E
	Cr 57	Cl 56 - Cl 51	N - S	0,337	1904	641,648	17								E
	Cr 57	Cl 51 - Cl 50	N - S	0,186	1218	226,548	18								E
	Cr 57	Cl 50 - Cl 49A	N - S	0,125	1218	152,25	18								E
	Cr 57	Cl 49A - Cl 49	N - S	0,061	1890	115,29	19								E
	Cr 57	Cl 49 - Cl 48	N - S	0,137	1941	265,917	18								E
	Cr 58	Cl 48 - Cl 46	N - S	0,175	2902	507,85	15								F
	Cr 57	Cl 46 - Cl 44	N - S	0,258	1069	275,802	25								D
San Juan	Cl 44	Oriental - Cr 50	E - W	0,094	3482	327,308	20	18,0	21,08	Arteria principal	Urbana	III	E	E	E
	Cl 44	Cr 50 - Cr 51	E - W	0,087	3390	294,93	18								E
	Cl 44	Cr 51 - Cr 52	E - W	0,103	2571	264,813	19								E
	Cl 44	Cr 52 - Cr 59	E - W	0,711	1328	944,208	23								D
	Cl 44	Cr 52 - Cr 54	E - W	0,261	1243	324,423	24	24,0	25,12	Arteria principal	Urbana	III	D	D	D
	Cl 44	Cr 54 - Cr 55	E - W	0,105	803	84,315	28								D
	Cl 44	Cr 55 - A.Ferrocarril	E - W	0,056	761	42,616	28								D
	Cl 44	A. Ferrocarril - Cr 52	W - E	0,335	1165	390,275	25	25,0	25,00	Arteria principal	Urbana	III	D	D	D
	Cl 44	Cr 59 - Cr 52	W - E	0,709	2149	1523,641	28	17,0	24,95	Arteria principal	Urbana	III	D	E	D
	Cl 44	Cr 52 - Cr 51	W - E	0,101	2928	295,728	24								D
Cl 44	Cr 51 - Cr 50	W - E	0,086	2787	239,682	17	E								

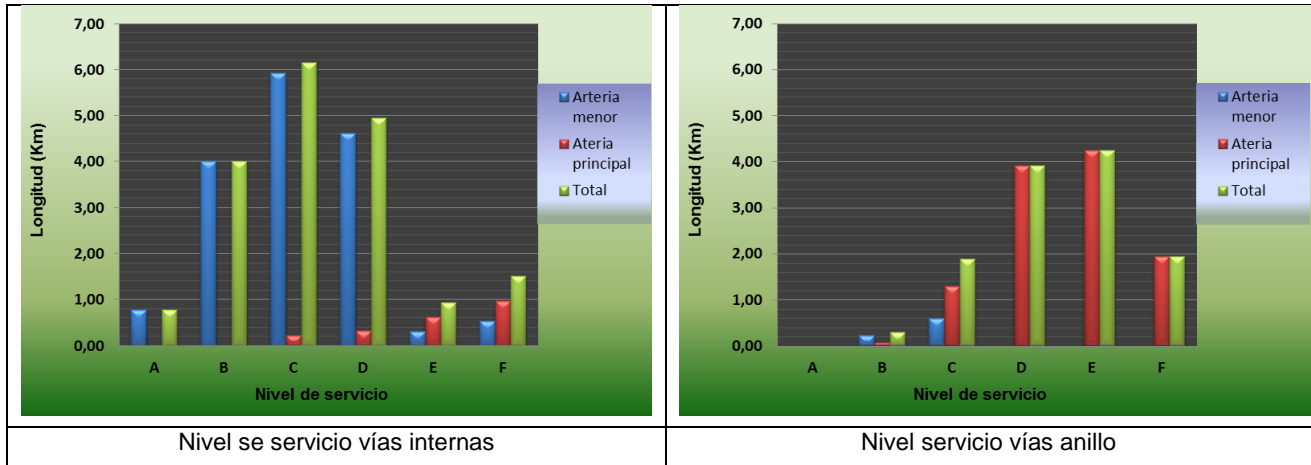
Corredor	ID	Tramo	Sentido	Longitud (Km)	Volumen (Veh/h)	Vehículo - Km	Velocidad en arco Km/h	Vel. menor en tramo	Vel. media pond. (Km/h)	Clase de vía			NS tramo vel. Media-pond.	NS tramo vel. mínima	NS por arco
										C.Funcional	C.diseño	Tip o			
	Cl 44	Cr 50 - Oriental	W - E	0,138	2561	353,418	18								E
	Cl 44	Cr 50 - Cr 48	W - E	0,087	277	24,099	30	30,0	32,28	Arteria principal	Urbana	III	C	C	C
	Cl 44	Cr 48 - Oriental	W - E	0,069	103	7,107	40								B

Fuente: Presente estudio

En la Gráfica 6-6, se resume la cantidad de Km de vía por cada nivel de servicio tanto para las vías internas como para las que conforman el anillo clasificadas por la clase de vía. En las vías internas se observa que la mayor cantidad de kilómetros está en el nivel de servicio C con un poco más de 6 Km, seguido de los niveles D y B con 5 Km y 4 Km respectivamente, en el nivel de servicio F hay alrededor de 1,5 km y además, en este escenario se tiene aproximadamente 800 metros de vías en el nivel de servicio A.

En el anillo vial, se tiene que en el nivel de servicio E, esta la mayor cantidad de kilómetros con 4,3, seguido muy de cerca por el nivel de servicio D con casi 4 Km. En el nivel de servicio F, hay cerca de 4 Km, al igual que en el nivel de servicio C; en el nivel de servicio B aproximadamente 300 metros, mientras que en el nivel de servicio A, no hay ninguna vía.

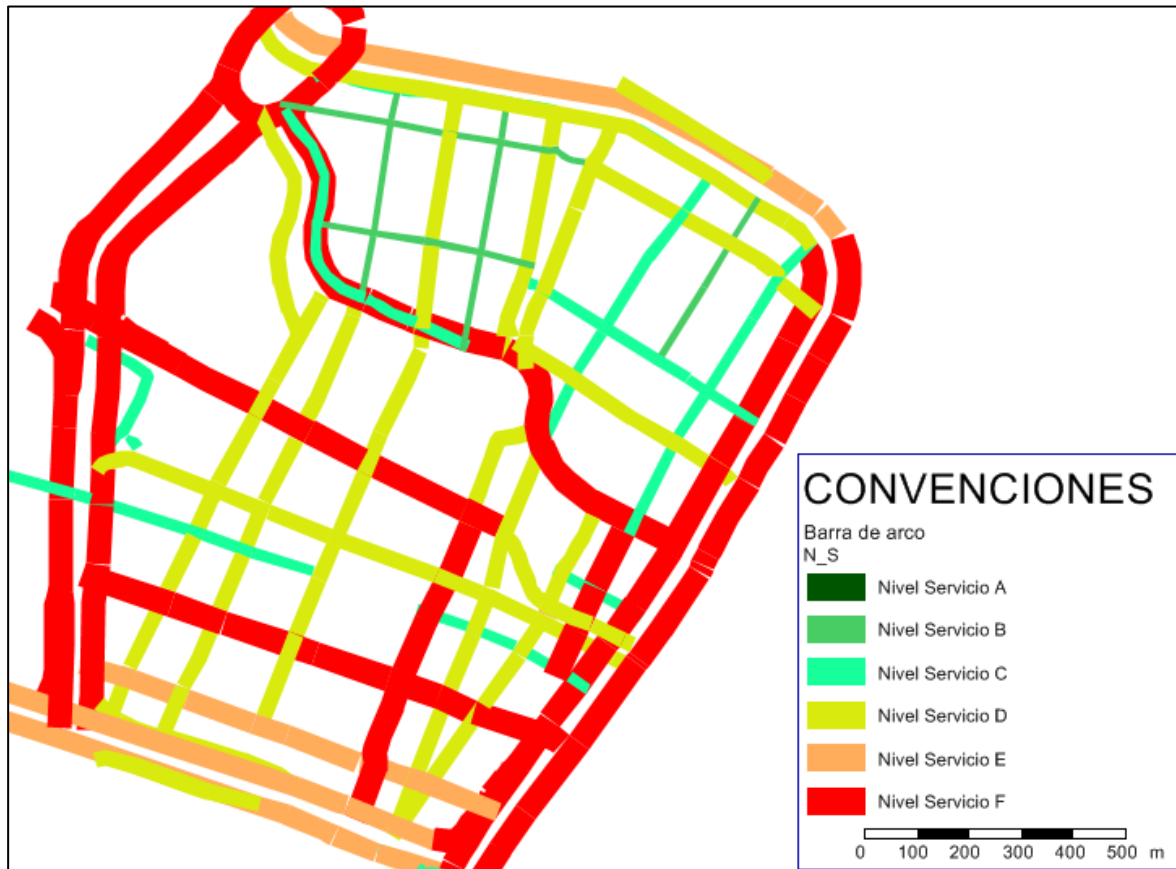
Gráfica 6-6. Nivel de servicio de las vías escenario cobro por congestión



Fuente: Presente estudio

En la Figura 6-14, se indica el mapa de nivel de servicio característico para cada corredor, determinado con la velocidad crítica del tramo. Se puede observar que los corredores con nivel de servicio más crítico (F) son: la Avenida La Playa, Avenida De Greiff, Avenida Colombia, Maturín y un tramo de Bolívar y sucre para el caso de las vías de la zona interna del cobro; por su parte en el anillo vial, la Avenida Oriental y Avenida Ferrocarril en sus dos sentidos sur - norte y norte – sur, tienen el nivel de servicio crítico F. Los corredores viales ubicados en la parte norte de la zona de cobro siguen siendo los que mejor nivel de servicio tienen (niveles C y B).

Figura 6-14. Nivel de servicio característico de las vías por corredor



Fuente: Presente estudio

7. Evaluación de resultados

El objetivo fundamental de la presente investigación es evaluar los niveles de servicio de las vías ante una implementación de un sistema de cobro por congestión; sin embargo, es importante analizar y evaluar otros parámetros de movilidad como la velocidad media y el tiempo de viaje para los escenarios modelados. A continuación se realiza un análisis y evaluación de los resultados obtenidos en las simulaciones.

7.1 Evaluación de la velocidad de viaje

Se evalúa la velocidad de viaje en las vías internas y en el anillo vial, para los dos escenarios de comparación: escenario sin pico y placa, y escenario con cobro por congestión. De las tablas 6-10 y 6-13, se extrae la velocidad de viaje media ponderada al volumen y distancia de cada segmento de arco, tanto para las vías internas como para las que conforman el anillo. En Tabla 7-1, se indica la comparación de las velocidades para los dos escenarios. Se puede observar que en la zona interna donde funcionaría la medida de cobro por congestión, la velocidad media de todas las vías aumenta en un 15% con respecto al escenario sin pico y placa, pasando de 20,10 Km/h a 23,20 Km/h; en cambio en las vías que conforman el anillo, la velocidad media de todo el anillo se reduce en un 5%, pasando de 22,30 Km/h a 21,20 Km/h; esto se explica porque estas vías por ser las últimas que permiten una circulación libre sin cobro de tarifa de congestión, recibirán mayor flujo de vehículos de los viajeros que las utilizaran como camino para desplazarse a otras zonas, sin entrar a la zona de cobro.

Tabla 7-1. Comparación velocidad media de viaje

Corredor	ID	Sentido	Longitud (Km)	Velocidad media (Km/h)		Variación (%)
				Escenario sin pico y placa	Escenario con cobro por congestión	
Vías internas						
Carrera 47	Cr 47	N - S	0,661	29,00	29,12	0%
	Cr 47	N - S	0,294	15,50	18,20	17%
Junín	Cr 49	S - N	0,713	18,10	23,50	30%
	Cr 49	S - N	0,375	36,80	35,00	-5%
Palacé	Cr 50	S - N	0,774	18,80	26,47	41%
	Cr 50	S - N	0,636	36,30	35,80	-1%
Bolívar	Cr 51	S - N	0,604	11,90	16,04	35%
	Cr 51	S - N	0,860	24,10	26,36	9%

Corredor	ID	Sentido	Longitud (Km)	Velocidad media (Km/h)		Variación (%)
				Escenario sin pico y placa	Escenario con cobro por congestión	
Carabobo	Cr 52	N - S	0,489	31,60	36,64	16%
Cundinamarca	Cr 53	S - N	1,214	25,50	29,51	16%
Cúcuta	Cr 54	N - S	0,418	32,50	34,17	5%
	Cr 54	N - S	0,888	20,70	25,35	22%
Tenerife	Cr 55	N - S	0,901	13,30	16,55	24%
Amador	CI 45	W - E	0,845	18,50	18,03	-3%
Maturín	CI 46	W - E	0,957	13,50	13,46	0%
Pichincha	CI 48	E - W	0,359	26,80	27,39	2%
	CI 48	E - W	0,445	24,30	29,52	21%
Ayacucho	CI 49	W - E	1,076	14,30	19,20	34%
	CI 49	E - W	0,334	19,60	20,00	2%
Colombia	CI 50	E - W	0,867	11,00	12,53	14%
Av. La Playa - De Greiff	CI 52	E - W	1,289	17,40	20,27	16%
	CI 53	E - W	0,654	26,30	30,19	15%
Maracaibo	CI 53	W - E	0,477	17,70	23,31	32%
Caracas	CI 54	E - W	0,491	31,60	33,14	5%
Juanambú	CI 54	E - W	0,435	37,20	36,32	-2%
La Paz	CI 57	W - E	0,595	29,80	34,29	15%
	CI 57	W - E	0,543	17,10	19,25	13%
Total en zona				20,10	23,20	15%
Anillo vial						
Av. Oriental	Cr 46	S - N	1,392	17,60	16,39	-7%
	Cr 46	N - S	1,389	13,40	13,60	1%
Av. Oriental, Av. Echeverry	CI 58	E - W	1,179	25,20	22,74	-10%
	CI 58	E - W	0,335	26,00	27,00	4%
	CI 58	W - E	1,165	34,10	31,00	-9%
	CI 58	W - E	0,826	29,90	30,17	1%
Av. Ferrocarril	Cr 57	S - N	1,547	20,90	19,39	-7%
	Cr 57	N - S	1,546	20,20	19,73	-2%
San Juan	CI 44	E - W	0,995	21,50	21,08	-2%
	CI 44	E - W	0,422	24,70	25,12	2%
	CI 44	W - E	0,335	27,00	25,00	-7%
	CI 44	W - E	1,034	24,60	24,95	1%
	CI 44	W - E	0,156	30,90	32,28	4%
Total en zona				22,30	21,20	-5%

Fuente: Presente estudio

Ahora, es importante saber que tan bueno puede ser el incremento de la velocidad media en las vías internas de la zona de cobro por congestión indicado en la tabla anterior; para ello, se puede hacer una comparación con los resultados obtenidos en las experiencias internacionales donde se evaluó este parámetro poco tiempo después de haberse implementado la medida. De acuerdo a Pozueta (2008), en Singapur la implantación del

sistema en 1975, provocó un incremento de la velocidad media de aproximadamente 95%, pasando de 19 Km/h a 36 Km/h; en Roma, la implantación en 2001 del nuevo sistema de control, produjo un aumento de la velocidad media de circulación en el ámbito del 4%; por su parte en Londres, los efectos del sistema de *Congestion Charging*, trajeron aumentos significativos de la velocidad media que, en 2003 y 2004, alcanzaron un 30% sobre la situación inicial (sin peaje urbano) donde la velocidad media estaba alrededor de 16 Km/h, y que, en 2005, se mantenía con un 26% de incremento. De esta forma se puede decir que el incremento de la velocidad media en un orden del 15% para el caso de Medellín, es algo significativo si se tiene en cuenta que la tarifa de cobro por congestión sólo se está evaluando para autos particulares, exceptuando las motos y camiones; y que además el escenario no contempla mejoras en la reorganización del transporte público colectivo, y tampoco medidas adicionales de gestión y control de parqueos indebidos, usos de espacio público por vendedores informales, etc.

7.2 Evaluación del tiempo total de viaje en la red

Adicionalmente se analiza la variación de la sumatoria de tiempos de viaje que gastan todos los vehículos que circulan por la red en la hora pico modelada. Se evalúa para los dos escenarios, de forma separada para las vías que conforman el anillo y las vías internas de la zona de cobro; en éste último caso, se descarta del análisis en los dos escenarios los segmentos de arco de acceso en donde se modificó la impedancia con respecto a la distancia para simular el comportamiento de los usuarios del auto particular pasantes frente a la tarifa de cobro por congestión. En la tabla Tabla 7-2, se puede observar la variación de los tiempos por corredor, y el total en la zona interna y en el anillo vial circundante. Para la zona interna, se aprecia que hay una reducción del 41%, pasando de 5.471,23 horas a 3.217,87 horas de viaje que gastan todos los vehículos que circulan por la red; en cambio para el anillo vial circundante se tiene que los tiempos de viaje totales del anillo se incrementan en un 6%, pasando de 6.741,40 horas a 7.175,19 horas. Este incremento tiene su lógica como se explico en el caso de la velocidad por el mayor flujo de viajeros pasantes, que congestionan más las vías, hacen disminuir la velocidad y aumentan los tiempos de viaje.

Tabla 7-2. Comparación tiempo total de viaje en red

Corredor	ID	Sentido	Longitud (Km)	Tiempo de viaje en red (horas)				Variación unitaria (%)	Variación total (%)
				Escenario sin pico y placa		Escenario cobro por congestión			
				Unitario (un solo veh.)	Total (para todos los veh.)	Unitario (un solo veh.)	Total (para todos los veh.)		
Vías internas									
Sucre	Cr 47	N - S	0,864	0,039	290,86	0,037	269,23	-6%	-7%
Junín	Cr 49	S - N	0,963	0,040	230,43	0,032	130,92	-20%	-43%
Palacé	Cr 50	S - N	1,188	0,056	510,26	0,044	333,82	-22%	-35%
Bolívar	Cr 51	S - N	1,255	0,073	654,27	0,061	449,90	-16%	-31%
Carabobo	Cr 52	N - S	0,408	0,013	18,10	0,011	8,58	-11%	-53%
Cundinamarca	Cr 53	S - N	1,133	0,046	280,13	0,041	119,64	-12%	-57%

Corredor	ID	Sentido	Longitud (Km)	Tiempo de viaje en red (horas)				Variación unitaria (%)	Variación total (%)
				Escenario sin pico y placa		Escenario cobro por congestión			
				Unitario (un solo veh.)	Total (para todos los veh.)	Unitario (un solo veh.)	Total (para todos los veh.)		
Cúcuta	Cr 54	N - S	1,126	0,049	425,93	0,043	217,18	-13%	-49%
Tenerife	Cr 55	N - S	0,786	0,054	393,58	0,046	174,21	-15%	-56%
Amador	Cl 45	W - E	0,586	0,035	53,16	0,034	25,76	-2%	-52%
Maturín	Cl 46	W - E	0,613	0,042	51,00	0,044	54,13	7%	6%
Pichincha	Cl 48	E - W	0,538	0,018	33,57	0,018	41,32	2%	23%
Ayacucho	Cl 49	W - E	0,919	0,069	709,58	0,051	403,92	-27%	-43%
	Cl 49	E - W	0,268	0,014	15,41	0,013	14,95	-2%	-3%
Colombia	Cl 50	E - W	0,687	0,053	480,12	0,061	392,13	15%	-18%
Av. La Playa - De Greiff	Cl 52 Cl 53	E - W	1,846	0,089	995,96	0,068	398,18	-25%	-60%
Maracaibo	Cl 53	W - E	0,371	0,022	33,26	0,015	5,48	-32%	-84%
Caracas	Cl 54	E - W	0,390	0,014	46,37	0,013	26,81	-12%	-42%
Juanambú	Cl 54	E - W	0,435	0,012	9,42	0,012	3,96	-2%	-58%
La Paz	Cl 57	W - E	0,827	0,037	239,82	0,034	147,76	-9%	-38%
Total en zona			15,203	0,776	5471,23	0,677	3217,87	-15%	-41%
Anillo vial									
Av. Oriental	Cr 46	S - N	1,392	0,084	632,61	0,086	1042,46	3%	65%
	Cr 46	N - S	1,389	0,102	1411,95	0,102	1495,52	0%	6%
Av. Oriental, Av. Echeverry	Cl 58	E - W	1,514	0,056	312,09	0,066	488,10	18%	56%
	Cl 58	W - E	1,991	0,068	457,70	0,064	317,55	-7%	-31%
Av. Ferrocarril	Cr 57	S - N	1,547	0,070	987,00	0,078	1131,58	11%	15%
	Cr 57	N - S	1,546	0,077	1135,40	0,078	1175,30	1%	4%
San Juan	Cl 44	E - W	1,417	0,070	999,47	0,061	829,77	-12%	-17%
	Cl 44	W - E	1,525	0,060	805,19	0,058	694,93	-4%	-14%
Total en zona			12,321	0,587	6741,40	0,592	7175,19	1%	6%

Fuente: Presente estudio

Haciendo el mismo análisis para un solo auto, se tiene que en la zona interna del cobro, el tiempo de viaje se reduce en un 13%, y en el anillo vial incrementa en 1%. Con este último análisis, se puede además, obtener la duración media del recorrido para un kilómetro de vía (promedio ponderado del tiempo de viaje respecto a la longitud del segmento de vía dividido entre la longitud total de la zona); de esta forma se tiene:

- Duración media de recorrido vías internas antes del cobro por congestión (escenario sin pico y placa) igual a 3,00 minutos/Km.
- Duración media de recorrido vías internas después del cobro por congestión (escenario cobro por congestión) igual a 2,54 minutos/Km. Disminuye 15%.

De igual forma para el anillo vial:

- Duración media del recorrido antes del cobro por congestión igual a 4,37 minutos/Km.
- Duración media del recorrido después del escenario del cobro por congestión igual a 4,40 minutos/Km. Aumenta 0,64%.

Con la información anterior, se puede comparar los resultados de la zona interna con los resultados de experiencias internacionales, en este caso, se tiene información que en Londres la duración media del recorrido para un kilómetro de vía, era de 2,3 minutos para el año 2002 (antes de implantar el peaje urbano); después de la implantación, en 2004, el tiempo fue de 1,6 minutos, es decir, un 30% menos; y en 2005, de 1,7 minutos, es decir 26% menos que en 2002 (Pozueta, 2008).

Evaluación de beneficios en el ahorro de tiempo

De acuerdo a los resultados de ahorro de tiempo producto de un escenario con cobro por congestión para autos particulares, se puede obtener el beneficio de ahorro económico desde el punto de vista de ahorro social del tiempo para todos los usuarios de las vías. Para ello, utilizando el valor subjetivo del tiempo (VST) determinado en el modelo de elección discreta.

$$\mathbf{VST = \$150/minuto}$$

$$\mathbf{Ahorro\ total\ de\ tiempo\ para\ una\ hora\ pico\ pm\ (vías\ zona\ interna) = 5.471,23 - 3.217,87 = 2.253,36\ horas-vehículo = 135.201,60\ minutos-vehículo}$$

La ocupación para todos los vehículos (autos, taxis, motos) se estima alrededor de 1,2 personas/veh., por tanto se tiene:

$$\mathbf{Ahorro\ total = 135.201,60/1,2 = 112.668,00\ minutos-persona}$$

Multiplicando este ahorro por el VST se tiene el beneficio económico por persona para la hora pico pm de modelación:

$$\mathbf{\$150/minuto \times 112.668,00\ minutos-persona = \$16.900.200,00}$$

Multiplicando por 2 horas se obtiene el beneficio económico para las dos horas pico pm, y por 4 horas para un día típico (asumiendo el mismo comportamiento del modelo para las horas pico am). Para obtener el beneficio anual, adicionalmente se multiplica por la cantidad de días hábiles que tiene el año que son 242 días (52 semanas x 5 días – 18 días festivos = 242 días). En la Tabla 7-3, se indica los resultados del beneficio económico teniendo en cuenta el ahorro de tiempo para el escenario de cobro por congestión en las vías internas.

Tabla 7-3. Evaluación beneficio económico con ahorro de tiempo por SCC

Variables		Beneficio 1 hora pico pm	Beneficio 2 horas - pico pm	Beneficio diario (pico am + pico pm)	Beneficio anual
VST	\$150/min.				
Ahorro Tiempo	\$112.668,00	\$16.900.200,00	\$33.800.400,00	\$67.600.800,00	\$16.359.393.600,00

Fuente: Presente estudio

Los anteriores beneficios (diario y anual), se calculan para tener una aproximación del beneficio de ahorro de tiempo en el escenario de cobro por congestión. Para tener datos más precisos, se recomienda realizar modelación para las horas pico am, y de esta forma tener resultados del comportamiento del escenario de cobro por congestión en las horas pico am.

7.3 Evaluación de la variación del nivel de servicio

La variación del nivel de servicio de las vías, se evalúa de acuerdo a la cantidad de kilómetros de vía determinados arco a arco en cada uno de los niveles de servicio para los dos escenarios comparados. De esta forma, se puede ver en la Tabla 7-4, como varía el nivel de servicio en las vías de la zona interna y de igual forma en el anillo vial para el escenario de cobro por congestión, con respecto al escenario sin pico y placa. En la zona interna se tiene que el nivel de servicio A, pasa de 0 Km a 0,782 Km de vías; en el nivel de servicio B, hay un incremento de 0,717 Km (21,7%); para el nivel de servicio C, la longitud total de vías se incrementa en un 9,8% (0,548 Km); así mismo en el nivel de servicio D, hay un incremento del 10% (0,449 km); en los niveles de servicio E y F, se observa que los kilómetros de vías disminuyen en 1,425 Km y 7,071 Km, respectivamente, éstas longitudes se redistribuyen y aumentan las longitudes de vías en los niveles superiores.

En el escenario base sin pico y placa, el 51% de las vías internas (9,5 Km) están en los niveles de servicio desfavorables D, E y F, en los cuales las condiciones de movilidad son malas debido a la baja velocidad, presencia de colas, falta de libertad para maniobrar, grandes efectos de estrés y frustración en los viajeros. En el escenario de cobro por congestión, la cantidad de vías internas con estos niveles de servicio se reduce a 7,4 Km (40% del total de vías), una cantidad aún muy grande.

Tabla 7-4. Variación del nivel de servicio en las vías

Nivel de Servicio	Escenario sin pico y placa			Escenario cobro por congestión			Variación del nivel de servicio expresado en Km de vía					
	Longitud (Km)			Longitud (Km)			A. menor		A. principal		Total	
	A. menor	A. principal	Total	A. menor	A. principal	Total	A. menor	%	A. principal	%	Total	%
Vías internas												
A	0,000	0,000	0,000	0,782	0,000	0,782	0,782		0,000		0,782	
B	3,305	0,000	3,305	4,022	0,000	4,022	0,717	21,7%	0,000		0,717	21,7%
C	5,382	0,233	5,615	5,930	0,233	6,163	0,548	10,2%	0,000	0,0%	0,548	9,8%
D	4,291	0,219	4,510	4,633	0,326	4,959	0,342	8,0%	0,107	48,9%	0,449	10,0%
E	2,061	0,305	2,366	0,316	0,625	0,941	-1,745	-84,7%	0,320	104,9%	-1,425	-60,2%
F	1,190	1,399	2,589	0,546	0,972	1,518	-0,644	-54,1%	-0,427	-30,5%	-1,071	-41,4%
Anillo vial												
A	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0%	0,000		0,000	
B	0,226	0,000	0,226	0,226	0,069	0,295	0,000	0,0%	0,069		0,069	30,5%
C	0,600	1,277	1,877	0,600	1,295	1,895	0,000	0,0%	0,018	1,4%	0,018	1,0%
D	0,000	4,827	4,827	0,000	3,924	3,924	0,000	0,0%	-0,903	-18,7%	-0,903	-18,7%
E	0,000	3,622	3,622	0,000	4,256	4,256	0,000	0,0%	0,634	17,5%	0,634	17,5%
F	0,000	1,769	1,769	0,000	1,951	1,951	0,000	0,0%	0,182	10,3%	0,182	10,3%

Fuente: Presente estudio

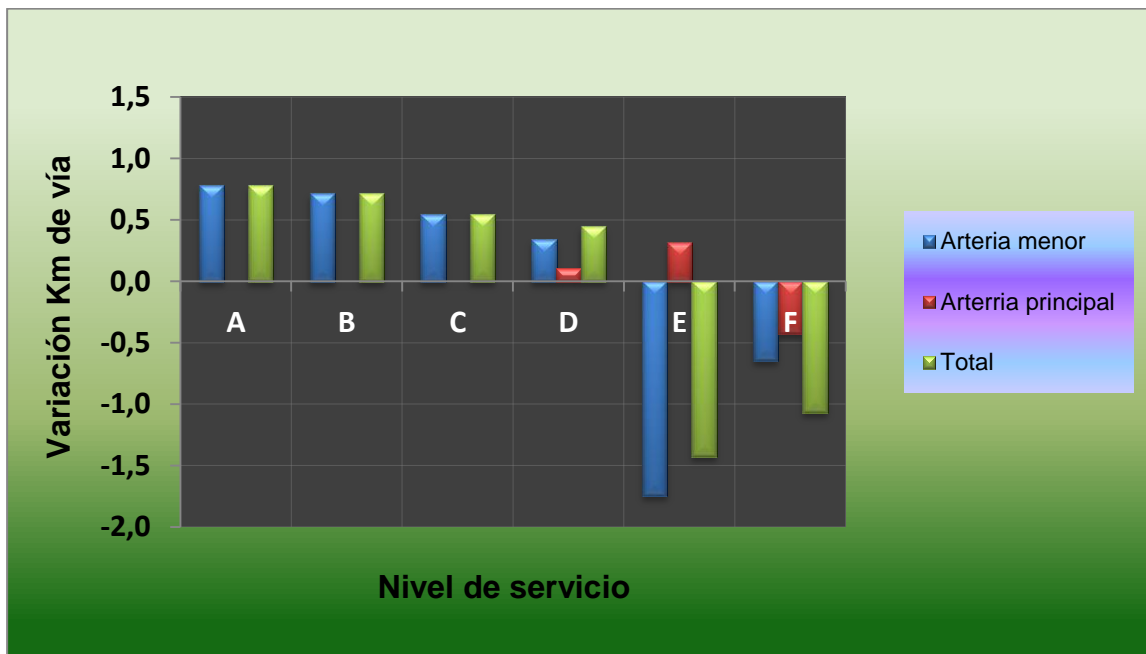
Analizando de igual forma el nivel de servicio en las vías que conforman el anillo, se observa que para los niveles de servicio catalogados como excelentes y buenos (A, B y C), solo hay un pequeño incremento en el nivel B del orden de 69 metros y en el C con 18 metros; y al contrario se castiga las vías incrementando con 634 metros en el nivel de servicio E y en 182 metros en el nivel de servicio F; en el nivel D se reducen 903 metros, los cuales se reubican especialmente en los niveles D y F.

En la Gráfica 7-1 y Gráfica 7-2, se indica la forma como varía los kilómetros de vías en cada uno de los niveles de servicio, evaluados en el escenario de cobro por congestión con respecto al escenario sin pico y placa para las vías internas y para el anillo vial respectivamente.

Haciendo un análisis del nivel de servicio característico por corredor (tomado a partir de la velocidad mínima en arco) se tiene que para la zona internas, en las vías de los corredores Junín, Palacé, Carabobo, Cúcuta, Ayacucho, Maracaibo, Caracas y La Paz hay variación del nivel de servicio, caracterizado por el paso a un nivel mas favorable; en tanto que los otros corredores permanece igual, como es el caso de la Avenida la Playa y la Avenida Colombia que además continúan con el nivel de servicio desfavorable F. En las vías del anillo vial, los niveles de servicio de los corredores permanecen iguales en los dos escenarios a excepción de un tramo de la avenida Echeverry (CI 58) sentido E-W que desmejora pasando de un nivel D a un nivel E, lo que significa que en algún segmento de la vía aumenta el volumen de vehículos “pasantes” que antes pasaban por la zona interna pero con la tarifa de SCC buscan un camino exento de pago; también se

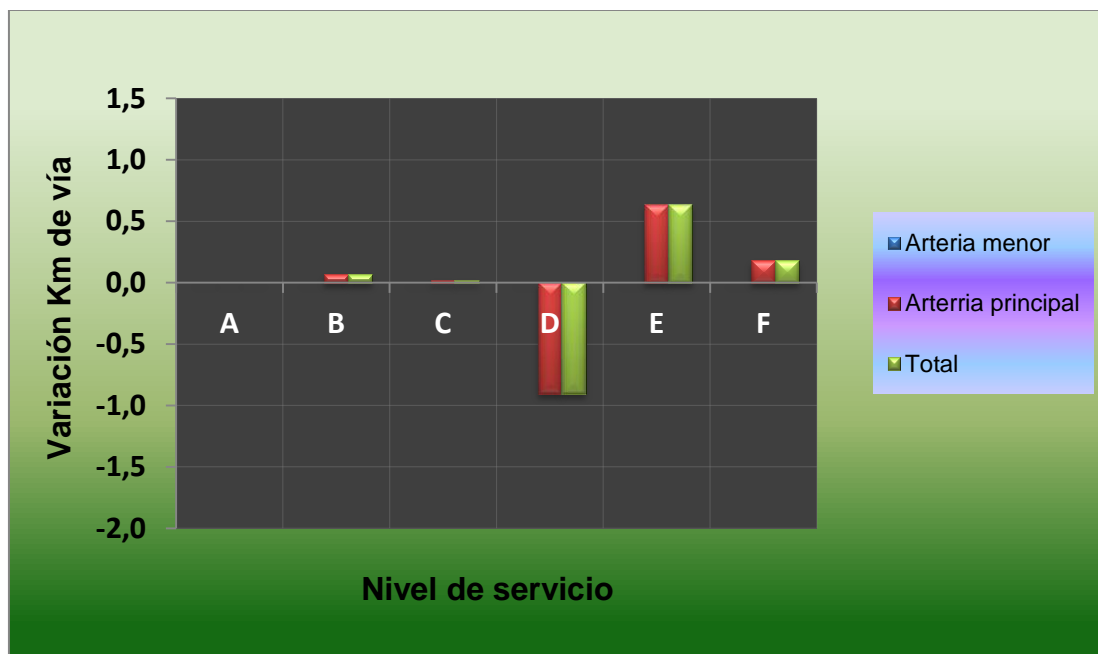
tiene un tramo en San Juan sentido W-E que mejora por menor presencia de vehículos pasando de un nivel D a C, el cual corresponde a la oreja que comunica San Juan con la Av. Regional . En la Tabla 7-5, se puede observar la forma como varía el nivel de servicio en cada corredor vial, determinado con la velocidad menor en arco.

Gráfica 7-1. Variación del nivel de servicio en las vías internas de la zona de cobro por congestión



Fuente: Presente estudio

Gráfica 7-2. Variación del nivel de servicio en las vías del anillo de la zona de cobro por congestión



Fuente: Presente estudio

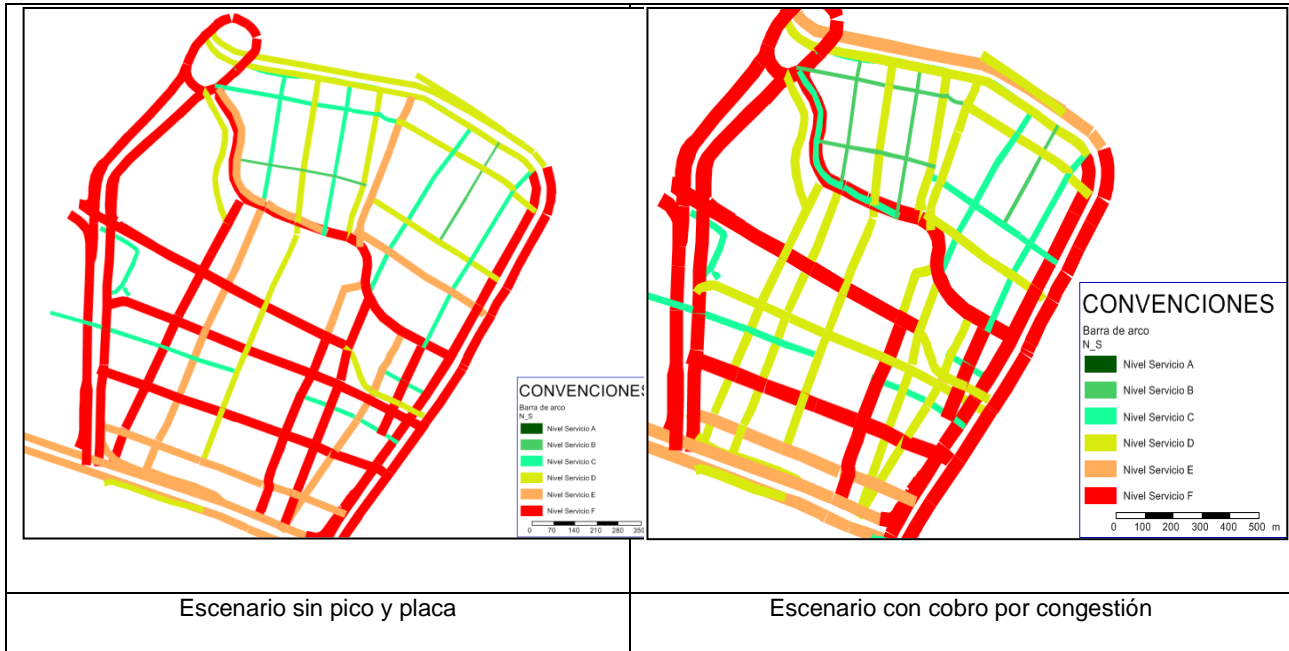
Tabla 7-5. Comparación del nivel de servicio por corredor

Corredor	ID	Sentido	Longitud (Km)	Nivel de servicio	
				Escenario sin pico y placa	Escenario cobro por congestión
Vías internas					
Sucre	Cr 47	N - S	0,661	C	C
	Cr 47	N - S	0,294	F	F
Junín	Cr 49	S - N	0,713	E	D
	Cr 49	S - N	0,375	B	B
Palacé	Cr 50	S - N	0,774	F	D
	Cr 50	S - N	0,636	C	C
Bolívar	Cr 51	S - N	0,604	F	F
	Cr 51	S - N	0,860	E	D
Carabobo	Cr 52	N - S	0,489	C	B
Cundinamarca	Cr 53	S - N	1,214	D	D
Cúcuta	Cr 54	N - S	0,418	C	B
	Cr 54	N - S	0,888	E	D
Tenerife	Cr 55	N - S	0,901	F	F

Corredor	ID	Sentido	Longitud (Km)	Nivel de servicio	
				Escenario sin pico y placa	Escenario cobro por congestión
Amador	CI 45	W - E	0,845	E	E
Maturín	CI 46	W - E	0,957	F	F
Pichincha	CI 48	E - W	0,359	C	C
	CI 48	E - W	0,445	C	C
Ayacucho	CI 49	W - E	1,076	F	D
	CI 49	E - W	0,334	D	D
Colombia	CI 50	E - W	0,867	F	F
Av. La Playa - De Greiff	CI 52	E - W	1,289	F	F
	CI 53	E - W	0,654	E	C
Maracaibo	CI 53	W - E	0,477	E	D
Caracas	CI 54	E - W	0,491	D	C
Juanambú	CI 54	E - W	0,435	B	B
La Paz	CI 57	W - E	0,595	C	B
	CI 57	W - E	0,543	D	D
Anillo vial					
Av. Oriental	Cr 46	S - N	1,392	F	F
	Cr 46	N - S	1,389	F	F
Av. Oriental, Av. Echeverry	CI 58	E - W	1,179	D	E
	CI 58	E - W	0,335	D	D
	CI 58	W - E	1,165	D	D
	CI 58	W - E	0,826	C	C
Av. Ferrocarril	Cr 57	S - N	1,547	F	F
	Cr 57	N - S	1,546	F	F
San Juan	CI 44	E - W	0,995	E	E
	CI 44	E - W	0,422	E	D
	CI 44	W - E	0,335	D	D
	CI 44	W - E	1,034	E	E
	CI 44	W - E	0,156	D	C

Fuente: Presente estudio

Figura 7-1. Nivel de servicio característico de las vías por corredor



7.4 Evaluación mayor demanda del METRO

Un sistema de cobro por congestión con una tarifa igual a \$4.000, determina una mayor demanda del METRO con los usuarios del auto particular que dejan el carro y se pasan a este modo de transporte. Según el modelo de elección discreta (ver Gráfica 6-4), se tiene que las probabilidades de los usuarios del auto particular que tendrían este comportamiento son:

- **Estratos 1, 2, 3 y 4 = 20%**
- **Estratos 5 y 6 = 19%**

El total de vehículos tipo auto particular que circulan en la zona de cobro por congestión para la hora de modelación, extraídos de la matriz auto es de **6.980 autos**. Por otro lado de la Gráfica 6-5, se tiene de la caracterización por grupos de estratos de los usuarios del auto que viajan a la zona de estudio en donde el 58% pertenecen al grupo de estratos bajos y el 42% a los estratos altos. Por tanto los nuevos usuarios del METRO serán:

$$6.980 \times 20\% \times 58\% + 6.980 \times 19\% \times 42\% = 1.367 \text{ autos}$$

De la encuesta origen destino EODH – 2012, se tiene que el factor de ocupación del auto particular es de 1,4 personas/auto, por tanto se tiene:

$$1.367 \times 1,4 = 1.913 \text{ personas}$$

Ahora bien, asumiendo que un tren lleva 2.000 personas/hora en el sentido más cargado, se puede calcular el número de trenes adicionales que se requieren:

$$1.913 / 2.000 = 1 \text{ Tren}$$

8. Conclusiones y recomendaciones

El anterior trabajo permitió determinar una metodología para determinar y evaluar la variación del nivel de servicio de las vías urbanas en una zona congestionada donde se desee implantar una medida de cobro por congestión como alternativa para desestimular el uso del auto particular. Por medio de esta metodología, partiendo de resultados de velocidad de viaje simulados mediante un software de macromodelación, se demostró que es posible identificar y proyectar el grado de mejora de la movilidad de la zona congestionada en el escenario hipotético con tarifa de congestión, y a la vez identificar otros parámetros de medición y comparación que permiten viabilizar un proyecto de éstos desde la perspectiva de la movilidad.

La metodología puede ser aplicada en cualquier tiempo futuro, teniendo en cuenta que el modelo utilizado es para una matriz fija, pero si se utiliza un modelo de 4 etapas se podrán producir nuevas matrices futuras para evaluar el NS con un tráfico diferente en el futuro. Para ello, se debe tener en cuenta los cambios de la demanda del transporte y la oferta vial a simular en el proceso macroscópico. Es decir, que para contemplar un aumento de tráfico en un futuro y evaluar la variación del NS, se debe ajustar las matrices de demanda bien sea con un factor de crecimiento, mediante ajustes con el mismo software Visum con base a resultados de aforos o por medio de un nuevo estudio de Encuestas OD que arrojarían matrices actualizadas para la asignación del transporte; de igual forma en la oferta vial, en el software se deben realizar los ajustes correspondientes a los cambios que sucedan como por ejemplo: cambios en geometría de las vías, cambios de sentidos, restricciones de circulación, peatonalización de vías, etc.

La variación del nivel de servicio de las vías localizadas dentro de una zona con un escenario hipotético de sistema de cobro por congestión para autos particulares, para el caso del centro de la ciudad de Medellín, delimitado en la presente investigación, indicó que aproximadamente 2,5 Km (14%) de vías mejoran el nivel de servicio, pero aún existe un 40% de vías (7,4 Km) que continúan en niveles de servicio desfavorables (D, E y F). En el caso de las vías que conforman el anillo, los niveles de servicio tienden a empeorar en un 13% (1,6 Km), debido a la disminución de la velocidad de circulación por mayor presencia de vehículos en éstas vías frontera. En cuanto a la velocidad, se tiene un 15% de aumento de la velocidad media de circulación en las vías internas y una disminución del 5% de la velocidad media para las vías del anillo. El otro parámetro evaluado, correspondiente al tiempo de viaje en la red para los dos escenarios, indicó que el tiempo medio de recorrido por cada auto en las vías internas se reduce de 3,00 minutos/Km en el escenario base a 2,54 minutos/Km en el escenario con cobro; para toda la red interna y todos los autos se tiene una reducción del 41%, pasando de 5.471,23 a 3.217,87 horas

de viaje, lo que en beneficios sociales representados en ahorro del tiempo para todos los usuarios viajantes significa un ahorro de aproximadamente 67,8 Millones de pesos diarios que equivale aproximadamente 16.360 Millones de pesos al año; en cambio para el anillo vial circundante se tiene que los tiempos de viaje totales del anillo se incrementan en un 6%, pasando de 6.741,40 a 7.175,19 horas.

Lo anterior, permite concluir que las vías que conformen el anillo o cordón de cualquier zona donde se desee implementar una tarifa de cobro por congestión o contaminación, deben reunir buenas condiciones geométricas como anchos de carriles, cantidad de carriles y calzadas, sentidos de circulación, etc.

Un aumento de la velocidad media de circulación en las vías internas de la zona de cobro por congestión, del orden del 15% se puede decir a primera vista que es un incremento bueno. Sin embargo, la velocidad media sigue estando por debajo de los 25 Km/h. Analizando por corredores, algunas vías como la calle Colombia con velocidades menores a 15 Km/h en algunos segmentos de arco.

Teniendo en cuenta que la distribución vehicular obtenida en el aforo realizado por TPD Ingeniería (2014), indicó que aproximadamente el 42% del total de vehículos aforados en la hora de máxima demanda modelada pertenecen a las motos, para obtener mejores resultados en cuanto a los parámetros evaluados (tiempo de viaje, velocidad y nivel de servicio) y por ende mejorar la movilidad del centro de la ciudad de Medellín, se recomienda considerar una tarifa de cobro por congestión para las motocicletas. Esto no sólo por el alto porcentaje de motos que actualmente circulan en la ciudad, sino también porque en una eventual implantación de un sistema de cobro por congestión, muchos usuarios del auto particular pueden emigrar al modo moto (sobre todo el grupo de estratos 1, 2, 3 y 4), debido a que no habría restricciones para la circulación y a la facilidad de adquisición de un vehículo como estos en el mercado. Si el SCC no contempla tarifa para las motos, la congestión en las vías de la zona de cobro causada por este modo de transporte podría aumentar considerablemente, con ello se incrementaría los índices de accidentes y agravaría también la contaminación en la zona. Es decir que lo que se ganaría con la reducción de los autos particulares en las vías, podría anular y hasta empeorar con el incremento de las motos. Según experiencias internacionales, en Londres, Singapur y Roma años después de haberse implementado el SCC sin tarifa para las motos, éstas crecieron exageradamente llevando a la necesidad de implementar una tarifa reducida para las motos como en el caso de Singapur. Si las motos tienen peaje, el cual puede ser una tarifa menor a la de los autos, se disminuye el volumen de congestión en las vías, se controla el crecimiento de este parque automotor y se contribuye con la reducción y control de externalidades negativas como accidentes en las vías y contaminación ambiental.

Según la EODH -2012, del total de viajes que se realizaban en este año con influencia en algún sector del centro de la ciudad, el 89% se realizan en modos motorizados, de los cuales al auto particular le correspondía el 16%. Los resultados de los aforos realizados por TPD Ingeniería en el año 2014, indicaron que aproximadamente el 22% de los modos motorizados corresponde al auto. Esto demuestra que el peso de la congestión en el

centro de la ciudad está determinado en gran proporción por los otros modos de transporte como las motos, el taxi, TPC y los camiones.

Ante los resultados obtenidos en la presente investigación, en las condiciones en que se evaluaron los cambios de los parámetros de movilidad ante una posible implantación de una tarifa de cobro por congestión para el centro de la ciudad de Medellín, se puede decir que son resultados buenos; sin embargo, para que su implantación sea un éxito, sería aconsejable incluir una tarifa de cobro para las motos y adicionalmente implementar soluciones a la congestión ocasionada por el TPC, se fortalezcan las políticas de control y gestión del tránsito para disminuir los parqueos indebidos, invasiones del espacio público y zonas de acopio; al mismo tiempo que se promocióne los modos de transporte no motorizados.

La metodología propuesta en la presente investigación para determinar la variación del nivel de servicio en las vías urbanas de una zona con una medida de restricción vehicular hipotética como en este caso cobro por congestión, puede ser utilizada en zonas de cualquier ciudad donde se planté desestimular el uso del auto mediante el cobro de una tarifa de cobro bien sea por la alta congestión o por el alto grado de contaminación producido por el transporte motorizado.

Como trabajos complementarios y futuros a la presente investigación para el caso estudiado en el centro de Medellín, se recomienda: 1. Determinar un modelo de elección discreta para un sistema de cobro por congestión en donde la tarifa no sólo sea para los autos particulares sino también para las motos. 2. Contemplar en el escenario de cobro por congestión la demanda del transporte y en la oferta vial los cambios de la movilidad producidos por las grandes obras que actualmente se realizan en la ciudad como son el Tranvía de Ayacucho, el Parque del Río y las que surjan en adelante con incidencias en la movilidad; de igual forma todos los cambios que resulten del estudio de reorganización y modernización del transporte público colectivo que actualmente adelanta el TPM. 3. Simular los escenarios mediante la modelación del transporte desde una perspectiva dinámica. 4. Evaluar cambios en la movilidad y de igual forma se podría evaluar la externalidad ambiental, midiendo las posibles reducciones de la polución vehicular.

Cómo recomendación para evaluar la conveniencia o no de un sistema de cobro por congestión, se deben evaluar además, los impactos en los componentes sociales, económicos, políticos y de movilidad. En este último componente, es importante también evaluar otros aspectos como la implementación y mejora del transporte no motorizado (bicicletas y peatón), mejoras en la infraestructura vial, contemplar vehículos exentos de la medida dentro de los autos particulares y las motos, trato a residentes de la zona con tarifa, sistema tecnológico y de recaudo, funcionamiento del sistema, tarifa de cobro variada de acuerdo al grado de congestión, etc.

Glosario

Calzada: Parte de la carretera destinada a la circulación de vehículos. En el caso de vías de dos o más carriles con circulación en ambos sentidos, el ancho de la calzada lo constituye la suma del ancho de los todos los carriles.

Carril: Parte de la vía cuya sección transversal está destinada a la circulación de un solo vehículo.

Congestión: La congestión se produce por una sobre utilización de la capacidad disponible. En el caso del transporte, donde la capacidad es fija y viene dada por las calles, el exceso de vehículos dispuestos a utilizar las vías puede generar largas demoras, aumento en los niveles de ruido y emisiones, como también mayores índices de contaminación. Desde el punto de vista teórico, para medir la congestión se utiliza el grado de saturación de una vía, que se define como la razón entre el flujo que circula por ella y su capacidad. Si el grado de saturación es superior a 0,7, se habla que existe “congestión evidente” mientras que si es mayor a 0,9, se está en presencia de un problema caótico. A partir de la relación anterior, es obvio que para disminuir el grado de saturación (y por ende la congestión) existen dos posibilidades: gestionar la demanda (o flujo) o aumentar la capacidad de la vía. Desde el punto de vista económico, sin embargo, no es adecuado aumentar indiscriminadamente la capacidad de la infraestructura de transporte. Es sabido que al incrementar la capacidad disponible, ésta rápidamente se utilizará. Incluso, en caso de que no se induzca más demanda o que la demanda inducida sea menor que la capacidad adicional construida, como la congestión es un fenómeno que se puede prolongar entre 6 y 8 horas al día, al construir más infraestructura se estará normalmente sub-utilizando parte de ella (Salata, 2013)

Nivel de servicio: Medida cualitativa que describe las condiciones de operación de un flujo vehicular. Se describe en términos como velocidad, tiempo de recorrido, libertad de maniobra y seguridad vial.

Sistema de cobro por congestión (Peaje urbano): El sistema de cobro por congestión o peaje urbano consiste en la aplicación de una tarifa, aplicada por medios tecnológicos y electrónicos, cuando se usan las vías en zonas donde se presenta un alto flujo vehicular en determinadas horas. Por lo general, los fondos recaudados, se destinan al funcionamiento del sistema, mejoramiento de la infraestructura para el transporte público, espacio público, ciclo rutas, entre otras.

Tarifificación vial: Se refiere al cobro de una tarifa a los conductores que circulan por una determinada vía. Es una especie de peaje que se cobra con el fin de obligar a los conductores a utilizar otra vía para descongestionar cierta zona, para recolectar recursos

para financiar proyectos viales y de transporte o bien para reducir las emisiones de CO₂ en una zona altamente congestionada.

Velocidad a flujo libre: (Free-Flow Speed, FFS). Es la velocidad a la cual los conductores sienten comodidad viajando, bajo condiciones ambientales, físicas y de tránsito controladas, en una sección descongestionada de una vía.

Vía multicarril: Es la que tiene dos o más carriles en cada sentido de circulación, pudiendo o no tener separador central.

Volumen Máxima Demanda (HMD): Es el mayor número de vehículos que transitan por una vía medidos en una hora. La HMD indica la hora en que se produce la mayor congestión durante un día completo.

Referencias bibliográficas

- Álvarez, C. (2009). Modelación de la elección de modo y hora de salida ante pico y placa combinado con peaje urbano. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2009). *Plan Maestro de Movilidad para la región Metropolitana del Valle de Aburrá*. Medellín.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2012). *Encuesta domiciliaria, encuesta de carga y estudios de tránsito complementarios para la región Metropolitana del Valle de Aburrá*. Medellín.
- Belda, E. (2011). Modelización de los niveles de servicio en autopistas en tiempo presente para la gestión dinámica del tráfico. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Bull, A. (Ed.). (2003). *Congestión de tránsito - El problema y cómo enfrentarlo*, cuadernos de la CEPAL No. 87. Santiago de Chile. CEPAL.
- Cerquera, F. (2007). Capacidad y niveles de servicio de la infraestructura vial. Tunja. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – UPTC.
- Congreso de la República de Colombia (2015). Ley sin número Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2014 -2018 “Todos Por un Nuevo País”. Consultado el 15 de mayo del 2015 en <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/ArticuladoVF.pdf>.
- Consorcio de Movilidad Regional (2007). Informe final estudio: *Plan Maestro de Movilidad para la Región Metropolitana del Valle de Aburrá*. Medellín
- Dowling, R., Skabardonis, A., & Alexiadis, V. (2004). Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic - Microsimulation Modeling Software. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Publication No. Fhwa-hrt-04-040. Georgetown.

- Galárraga, J., Herz, M., & Albrieu L. (2005). Capacidad y nivel de servicio en calles urbanas. Córdoba – Argentina. Universidad Nacional de Córdoba.
- Gigena, G. (2008). Caminos I - capacidad de un sistema vial - curso 2008 Resumen y ejercicios Capacidad vial (Recopilación bibliográfica y resumen gentileza del Ing. Guillermo Gigena, auxiliar docente del Área Transportes, Facultad de Ingeniería UNLP). La Plata. Universidad Nacional de la Plata – UNLP.
- Gonzáles-Calderón, C., Posada, J., & Sánchez-Díaz, I. (2011). The need for congestion pricing in Medellín: an economic perspective. [Versión electrónica]. *Dyna*, Vol. 79 No. 171, 123-131. Consultado el 3 de mayo del 2013, en <http://dyna.unalmed.edu.co/ediciones/171/articulos/a16v79n171/a16v79n171.pdf>
- Guzmán, L. (2008). *Los costes de la congestión urbana: estimación de cambios de bienestar derivados de la implementación de un cobro por congestión*. Madrid: Centro de Investigación del Transporte (TRANSyT–UPM).
- Guzmán, L., De la Hoz D., & Pfaffenbichler P. (2008). *Análisis de impactos en la tarifa de cobro por congestión en Madrid utilizando la dinámica de sistemas*: Universidad Politécnica de Madrid. Madrid
- Holguín-Veras, J., Wang Q., Xu, N., & Ozbay K. (2010). *The impacts of time of day pricing on car user behavior: findings from the Port Authority of New York and Jersey's initiative*. New York: Springer Science+Business Media.
- Instituto de Desarrollo Urbano (n.d). Informe final: *Modelos para la estimación de la demanda de la ALO*. Consultado el 18 de abril del 2015, en <http://webidu.idu.gov.co:9090/jspui/bitstream/123456789/31501/5/60000660-01.pdf>.
- Márquez, L., García D., & Guarín L. (2014). Funciones volumen-demora BPR y cónicas en vías multicarriles de Bogotá. *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes* (41), 30 – 39
- Medina, A. (2001). Cuantificación de la tarifa óptima por acceso, para descongestionar el centro de Bogotá D.C. Santafé de Bogotá.
- Molina, A. (1999). Viajeros y caminos medievales. [versión electrónica]. *Cuadernos de Turismo*, No. 4, 111-126. Consultado el 30 de abril del 2013, en <http://www.redalyc.org/pdf/398/39800407.pdf>.

- Muñoz, J. (2012). *Los sistemas de peaje urbano: Estudio y predicción de los efectos derivados de la implantación de un sistema de peaje urbano para la ciudad de Madrid*. Madrid: Universidad Rey Juan Carlos.
- Naranjo, V. (2008). Análisis de la capacidad y nivel de servicio de las vías principales y secundarias a la ciudad de Manizales. Manizales: Universidad Nacional de Colombia – Sede Manizales.
- Ordoñez, G. (2009). Aplicación del manual de capacidad de carreteras (HCM) versión 2,000, para la evaluación del nivel de servicio de carreteras multicarriles. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Pozueta, J. (2008). La experiencia internacional en peajes urbanos. [versión electrónica]. Cuadernos de investigación urbanística Ci[ur], No. 58. 1-116. Consultado el 15 de Octubre del 2012, en <http://polired.upm.es/index.php/ciur/article/view/273/268>.
- PTV Group (n.d). PTV Visum 14. Consultado el 15 de abril del 2015, en <http://vision-traffic.ptvgroup.com/es/productos/ptv-visum/>.
- Robusté F., & Sarmiento I. (1999). *Sistemas tarifarios del vehículo privado en medio urbano*. Madrid: Centro de Publicaciones, Ministerio de Fomento.
- Rodríguez, D. (2008). Análisis de factores relevantes en la implantación de tarifas por congestión en el Área Metropolitana de San Juan. Mayagüez: Universidad de Puerto Rico.
- Romana, M. (1994). Evaluación práctica de niveles de servicio de carreteras convencionales de dos carriles en España. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- Salas, M. (2009). Gestión de la movilidad mediante tarifas. *Revista de ingeniería – Universidad de los Andes*, No. 29. 129-136.
- Salata, A. (2013). Modelación de preferencias respecto a la aceptabilidad de tarificación vial en Santiago. Tesis de Maestría. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile.
- Sarmiento, I., Mejía, A., Gonzáles-Calderón C., & Ospina F. (2005). Estimación de los impactos de la medida de restricción de pico y placa en Medellín. Medellín.

- Secretaría de Movilidad de Medellín (2012). *Estudio de viabilización para la implementación del sistema de cobro por congestión de la ciudad de Medellín – fase I*. Medellín.
- Secretaría de Movilidad de Medellín (2012). Indicadores de movilidad. Consultado el 20 de septiembre del 2012, en <http://www.medellin.gov.co/transito/linea-base.html>.
- Transporte Planeación y Diseño – TPD Ingeniería (2014). *Estudio de preinversión de movilidad para determinar la viabilidad de peatonalización total o parcial de algunos tramos viales del centro de la ciudad de Medellín bajo el concepto de tráfico lento y de supermanzanas* (Informe final). Medellín.
- Transportation Research Board. (2000). *Highway Capacity Manual (HCM 2000)*. National Research Council. Washington, D.C.
- Venta de vehículos pinta bien (2014, 4 de octubre). *Revista Dinero*, Consultado el 20 de junio del 2015 en <http://www.dinero.com/empresas/articulo/venta-vehiculos/194642>.
- Valencia, V. (2000). *Capacidad y Niveles de Servicio*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.
- Wachs, M., & May, A. (2005). "Road Pricing in Context. The Efficient Allocation of a Limited Resource". En *International Perspectives on Road Pricing*. Transportation Research Board (Coord.) (pp. 11-13). Washington, D.C.: Norman Solomon.