UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Comparación de un Enfoque Macroscópico y otro Microscópico al Estimar las Demoras por la Congestión Urbana.

ALMA DE JESÚS VALLADARES MEJÍA

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil

Medellín Colombia

2016

Comparación de un Enfoque Macroscópico y otro Microscópico al Estimar las Demoras por la Congestión Urbana

ALMA DE JESÚS VALLADARES MEJÍA

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magíster en Ingeniería - Infraestructura y Sistemas de Transporte

Director:

PhD. Ingeniería de Transporte

IVÁN SARMIENTO ORDOSGOITIA PhD.,

Departamento de Ingeniería Civil

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería Civil

Medellín Colombia

2016

Notas de Aceptación

Presidente del Jurado

Segundo Jurado

Medellín, 2016

Agradecimientos

A la empresa Geoconsult S.A. de C.V. de Honduras y a la Universidad Nacional de Colombia, por permitirme ser becaria y de esta manera financiar y culminar mis estudios de maestría. A la casa PTV Group de Alemania por proporcionarme gratuitamente la licencia temporal del Software VISSIM, una de las herramientas básicas para el desarrollo de este trabajo de investigación.

Al profesor Iván Sarmiento por dirigir este trabajo con paciencia, por su apoyo, asesoría constante, recomendaciones, sugerencias y correcciones que contribuyeron acertadamente en el desarrollo de esta tesis.

Resumen

Los simuladores de redes de transporte se han convertido en una parte importante de los análisis hechos para la planificación de transporte, el presente trabajo de investigación busca hacer una comparación de los resultados de las demoras producidas por la congestión desde dos enfoques: macroscópico y microscópico.

La simulación de redes hace parte de la fase de asignación de flujos en una malla vial. El establecimiento de las características de la infraestructura vial disponible y la zonificación, son factores importantes que influyen directamente en los resultados de esa asignación.

Se realizó la simulación para dos casos, una red real en el centro de Medellín; y una red simplificada. Ambas se modelaron tanto a nivel macroscópico como a nivel microscópico. La información utilizada para el desarrollo del caso real fue analizada y depurada de estudios previos realizados en la ciudad de Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, y para el caso hipotético, se planteó con elementos simples que permitieron hacer una verificación de resultados más precisa que con la red real.

Haciendo uso de la prueba estadística Test-t student, se comprobó que las demoras evaluadas en ambos simuladores no son significativamente diferentes, lo que indica que las evaluaciones hechas en ambos softwares son congruentes entre sí. Sin embargo, si el área a estudiar, es relativamente grande, mayor a 2 Km^2, se recomienda hacer la simulación a nivel macroscópico y dejar el micro simulador, para zonas de conflicto que requieran mayor detalle.

Palabras clave: micro simulación, macro simulación, VISSIM, VISUM, demoras, congestión urbana.

Abstract

Simulators transportation networks have become an important part of the analysis made for planning transport, this research seeks to make a comparison of the results of the delays caused by congestion from two points of view: macroscopic approach and microscopic approach.

The network simulation is part of the assignment phase flow in a road network. The establishments of the characteristics of the road, infrastructure available and zoning are important factors that directly influence the outcome of that assignment.

A simulation for two cases were made, a real network, the center of Medellin; and a simplified network. Both modeled on the macroscopic and microscopic level. The information used for the development for the real network was analyzed and refined for previous studies made in the city of Medellin and the Area Metropolitana del Valle de Aburrá and the hypothetical case was proposed with simple elements that allowed for the precise verification of the results more accurate that with the real network.

Making use of the statistical test-t student test, it was found that the delays evaluated in both simulators are not significantly different, indicating that evaluations made in both software are congruent with each other. However, if the area in study, is relatively large, larger than 2.0 Km^2, is recommended the simulation macroscopical and leave the micro simulator to conflicting areas requiring more detail.

Key words: micro simulation, macro simulation, VISSIM, VISUM, delays, urban congestion.

CONTENIDO

Resumen V
Abstract VI
Contenido VII
Lista de Figuras X
Lista de Tablas XII
1. INTRODUCCIÓN 1
1.1 Planteamiento del Problema 2
1.2 Justificación 3
1.3 Preguntas de Investigación 3
1.4 Objetivos 4
1.4.1 Objetivo General 4
1.4.2 Objetivos Específicos 4
1.5 Hipótesis Preliminar 4
1.6 Metodología 4
1.6.1 Revisión bibliográfica 4
1.6.2 Obtención y depuración de información secundaria 4
1.6.3 Construcción y calibración de la red 5
1.6.4 Análisis y comparación de resultados 6
1.6.5 Obtención de factores de escala para los distintos tipos de vía. 6
2. MARCO TEÓRICO 7
2.1 Modelos de Transporte 7
2.2 Modelo Clásico de Transporte 8
2.3 Modelo de Asignación 10
2.4 Herramientas de Análisis de Tráfico 12
2.4.1 Herramientas de bosquejo-planificación 13
2.4.2 Modelo de demanda de viajes 13

2.4.3 Herramientas determinístico/analítico 14
2.4.4 Herramientas de optimización de señales de tráfico 14
2.5 Modelos de Simulación de Redes Tránsito 15
2.5.1 Modelos de Simulación Macroscópicos 16
2.5.2 Modelos de Simulación Microscópicos 17
2.5.3 Modelos de Simulación Mesoscópicos 19
2.6 Congestión y Demoras 22
2.7 Demoras evaluadas desde un micro simulador y un macro simulador 23
2.8 VISSIM 23
2.8.1 Modelo de Seguimiento de Vehículos de Widemann 74 23
2.8.2 Movimiento lateral 26
2.8.3 Controlador de semaforización o controlador de señales 27
2.8.4 Demoras en VISSIM 27
2.8.5 Tiempo de viaje calculado en VISSIM 28
2.9 VISUM 29
2.9.1 Funciones Volumen-Demora 30
2.9.2 Calibración de parámetros de las funciones VDF 37
2.9.3 Relación entre teorías de los simuladores VISSIM y VISUM 40
3. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN 42
3.1 Descripción y ubicación 43
3.2 Zonificación y Uso de Suelo 44
3.2.1 Zonificación 44
3.2.2 Uso de suelo 46
3.3 Características físicas de la red 47
3.3.1 Geometría y sentidos de circulación 47
3.3.2 Señalización 48
3.3.3 Semaforización 49
3.4 Análisis de aforos vehiculares 51
3.5 Estacionamientos 54
3.5.1 Estacionamientos públicos y privados 55
3.5.2 Estacionamientos en la vía 57
3.6 Espacios para acopio de taxis 59
3.7 Zona de acopio de camiones 60
3.8 Transporte público 61

3.9 Ubicación de paraderos de buses 63
3.10 Demanda de viajes 64
3.11 Matrices de los diferentes modos de transporte 65
4. CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE LA RED DE TRANSPORTE 66
4.1 Construcción del Modelo en VISUM (caso 1) 66
4.2 Construcción del modelo en VISSIM (caso 1) 68
4.2.1 Geometría y características físicas de la infraestructura vial (caso 1) 69
4.2.2 Elementos de Control (caso 1) 70
4.2.3 Demanda vehicular (caso 1) 72
4.2.4 Productos 72
4.3 Calibración de los modelos (caso 1) 72
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS 76
5.1 Resultados para el Centro de Medellín (caso 1) 76
5.1.1 Corredores analizados (caso 1) 76
5.1.2 Comparación de las Demoras (caso 1) 77
5.1.3 Validación mediante prueba Test-t Student (caso 1) 79
5.2 Caso hipotético (caso 2) 80
5.2.1 Construcción de la red hipotética (caso 2) 80
5.2.2 Construcción de la red en VISUM (caso 2) 80
5.2.3 Construcción de la red en VISSIM (caso 2) 81
5.2.4 Demanda, simulación y validación de la red en ambos simuladores (caso 2) 82
5.2.5 Comparación de las Demoras (caso 2) 84
5.2.6 Validación mediante prueba Test-t Student (caso 2) 86
6. CONCLUSIONES 88
BIBLIOGRAFIA 90
ANEXOS 96

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Esquema del modelo clásico de transporte de cuatro etapas 10
Figura 2-2. Esquema de las herramientas de análisis de tráfico 13
Figura 2-3. Simuladores integrados por FHWA. 16
Figura 2-4. Esquema del concepto de la congestión de tránsito 22
Figura 2-5. Diagrama del modelo psycho-physical de seguimiento de vehículos de acuerdo a Widemann 74 25
Figura 2-6. Relación típica volumen-velocidad y volumen-demora para arcos largos. 31
Figura 2-7. Concepto de las demoras en una curva VDF 41
Figura 3-1. Localización de la zona de estudio 43
Figura 3-2. Uso de suelo del área de estudio y zonas vecinas 46
Figura 3-3: Fotografía aérea de la Avenida Oriental (CR46) 48
Figura 3-4: Señalización horizontal y vertical 49
Figura 3-5: Esquema de controlador semafórico (CR50CL48_49) 50
Figura 3-6: Matriz de conflictos en las intersecciones (CR50CL48_49) 50
Figura 3-7. Evaluación de hora de máxima demanda 53
Figura 3-8.Composición vehicular para la hora de máxima demanda 54
Figura 3-9. Distribución de uso de parqueo, por tipo de estacionamiento 54
Figura 3-10: Ubicación de estacionamientos por zona Sit 57
Figura 3-11: Localización de las ZER en el área de estudio 58
Figura 3-12: Localización de parqueaderos no regulados en el área de estudio 59
Figura 3-13: Localización de espacios destinados al acopio de taxis 60
Figura 3-14: Señalización vertical en las zonas de carga 61
Figura 3-15: Localización paraderos de buses 64
Figura 4-1: Plataforma de simulación de VISUM. 67
Figura 4-2: Elementos para la construcción de un modelo en VISSIM 69
Figura 4-3: Segmento de la red de transporte en VISSIM 70
Figura 4-4: Representación infraestructura de transporte público 70

Figura 4-5: Controlador de señales intersecciones CR50CL48_49..... 71
Figura 4-6: Ubicación de los grupos de señales 1 y 2 de la intersección CR50CL48..... 71
Figura 4-7.Calibración por medio del coeficiente de correlación R^2 del modelo en VISSUM (caso 1)..... 74
Figura 5-1.Demoras calculadas por los simuladores VISSIM y VISUM, caso 1 78
Figura 5-2. Red hipotética modelada en VISUM (caso 2) 81
Figura 5-3. Red hipotética modelada en VISSIM (caso 2) 82
Figura 5-4. Correlación entre flujos vehiculares para ambos simuladores (caso 2) 83
Figura 5-5.Demoras calculadas por los simuladores VISSIM y VISUM, caso 2 85

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1: Macro simuladores de redes de transporte 17

Tabla 2-2: Micro simuladores de redes de transporte..... 18

Tabla 2-3: Meso-simuladores de redes de transporte 20

Tabla 2-4: Algunas ciudades de Colombia en las que se han utilizados simuladores de redes de transporte. 21

Tabla 2-5: Modelos de seguimiento de vehículos..... 24

Tabla 2-6: Umbrales evaluados en el modelo de seguimiento de vehículos de Widemann 74 26

Tabla 2-7: Demoras evaluadas en VISSIM 27

Tabla 2-8: Funciones flujo-demora más conocidas 33

Tabla 2-9: Funciones flujo-demora utilizadas en VISUM 34

Tabla 2-10: Funciones de impedancia utilizadas en VISUM 36

Tabla 2-11: Valores de α y β encontrados por la FHWA..... 38

Tabla 2-12: Valores de α y β analizadas para carreteras multicarriles en Bogotá. 38

Tabla 2-13: Valores de α y β evaluados en Seúl, Corea de acuerdo al nivel de servicio de las vías 39

Tabla 2-14: Valores de α y β estudiados en Corea..... 39

Tabla 2-15: Resumen de Valores de α y β analizados en diferentes ciudades. 40

Tabla 3-1: Resumen de información secundaria analizada para alimentar los simuladores 42

Tabla 3-2: Zonas SIT de la comuna La Candelaria..... 44

Tabla 3-3: Códigos de las "Mega Zonas"..... 45

Tabla 3-4: Tiempos de inicio (IV) y fin de verde (FV) de las intersecciones (CR50CL48_49) 51

Tabla 3-5: Nomenclatura utilizada para los aforos realizados en el sitio de estudio..... 52

Tabla 3-6: Celdas de estacionamientos por Zona Sit 55

Tabla 3-7: Rutas de buses introducidas en el micro simulador 62

Tabla 3-8: Demanda vehicular utilizadas en los simuladores..... 64
Tabla 3-9: Factores de conversión de ADEs 65
Tabla 3-10: Tamaño de matrices de viajes de acuerdo a cada simulador..... 65
Tabla 4-1: Tipos de vía y capacidad analizados para la zona de estudio (caso 1)..... 67
Tabla 4-2: Métodos de asignación en VISUM..... 68
Tabla 4-3: Criterios de aceptación para el indicador estadístico GEH 73
Tabla 4-4: Calibración de la red construida en VISUM mediante el indicador GEH 74
Tabla 5-1: Resumen de características de los corredores evaluados 76
Tabla 5-2: Valores de α y β utilizados en la modelación (caso 1)..... 77
Tabla 5-3: Resumen de valores de demoras evaluadas en los simuladores (caso 1)..... 78
Tabla 5-4: Valores obtenidos en la prueba de normalidad entre demoras producidas por los simuladores (caso 1)..... 79
Tabla 5-5: Valores de prueba de igualdad de varianzas entre demoras producidas por los simuladores (caso 1). 79
Tabla 5-6: Valores de prueba Test-t Student para las demoras producidas por los simuladores (caso 1). 80
Tabla 5-7: Parámetros tomados para el (caso 2)..... 80
Tabla 5-8: Matriz de demanda vehicular (caso 2)..... 82
Tabla 5-9: Flujos asignados por cada simulador y en cada arco evaluado y diferencia porcentual (caso 2)..... 82
Tabla 5-10: Valores obtenidos en la prueba de normalidad entre volúmenes asignados por los simuladores (caso 2)..... 84
Tabla 5-11: Valores de prueba de igualdad de varianzas entre volúmenes asignados por los simuladores (caso 2)..... 84
Tabla 5-12: Valores de prueba Test-t Student para validación de volúmenes asignados por los simuladores (caso 2)..... 84
Tabla 5-13: Demoras obtenidas de los simuladores (caso 2) 85
Tabla 5-14: Valores obtenidos en la prueba de normalidad entre demoras producidas por los simuladores caso 2. 86
Tabla 5-15: Valores de prueba de igualdad de varianzas entre demoras producidas por los simuladores caso 2. 86
Tabla 5-16: Valores de prueba Test-t Student para las demoras producidas por los simuladores caso 2. 87

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS, UNIDADES DE MEDIDA Y ABREVIATURAS

Km	kilómetros
s	segundos
m	metros
v/c	Relación volumen/capacidad
HCM	Manual de Capacidad de Carreteras *(Highway Capacity Manual)*
HDM	Desarrollo y Gestión de Carreteras *(Highway Development & Management)*
PTV	Planificación de Transporte y Tránsito *(Planung Transport Verkehr)*
FHWA	Administración Federal de Carreteras *(Federal Highway Administration)*
VDF	Función Volumen Demora *(Volume Delay Function)*
BPR	Oficina Pública de Carreteras *(Bureau of Public Road)*
ZER	Zona de Estacionamiento Restringido
ZER-C	Zona de Estacionamiento Restringido para Camiones
TRRL	Laboratorio de Investigación de Transporte y Carreteras de Reino Unido *(Transport and Road Research Laboratory)*
TRL	Laboratorio de Investigación de Transporte de Reino Unido *(Transport Research Laboratory)*
TSIS	Sistema Integrado de Software para Tráfico *(Traffic Software Integrated System)*
EOD	Encuesta Origen y Destino
TPM	Transporte Público de Medellín
VISSIM	Simulación de Tránsito en ciudades (*Verkehr In Städten – SIMulieren*)
VISUM	Simulación Macroscópica de Transporte
CIOS	Centro de Ingeniería y Operación Semafórica de la Secretaria de Movilidad de Medellín
RMSE	Error cuadrático medio *(Root Mean Squared Error)*
ADEs	Autos Directos Equivalentes

1. INTRODUCCIÓN

La planificación de transporte nace como una herramienta para mejorar la movilidad en las ciudades y está íntimamente relacionada con los simuladores de transporte; los resultados devueltos por estos simuladores contribuyen en conjunto con otras políticas al desarrollo de planes desde el punto de vista estratégico, táctico u operativo.

Los simuladores de transporte están siendo usados en las grandes urbes a nivel mundial para diferentes fines: evaluación de alternativas a nuevos proyectos, implementación de un nuevo sistema de transporte, aplicación de peajes urbanos, desarrollo de planes de movilidad, análisis económico de las alternativas, estimación de la cantidad de emisiones de contaminantes a la atmosfera, optimización de tiempos de semáforos, etc. En Colombia estos programas han servido de base para la creación de planes de movilidad en diferentes ciudades, evaluación de la implementación de cambios en la infraestructura vial, etc. (Universidad Nacional de Colombia & Quibdó Centro Mundial de la Biodiversidad, 2013), (FONVAL, 2012).

El modelo clásico de transporte se compone de cuatro fases principales que son la generación de viajes (cuántos viajes se producen y se atraen en las distintas zonas), la distribución de viajes (cómo se distribuyen espacialmente los viajes entre las distintas zonas), el reparto modal (cuántos viajes usan cada modo entre cada par origen-destino) y la asignación de viajes (qué ruta escogen los vehículos o los viajeros para llegar en un modo a sus destinos). El presente trabajo se enmarca en la cuarta fase del modelo clásico de panificación de transporte. El flujo vehicular es asignado en las vías obedeciendo a dos principales grupos de métodos de asignación: los estáticos y/o los dinámicos. El objetivo primordial de estos métodos es minimizar los costos del usuario, haciendo uso o no de la variación del tiempo para la elección de la ruta y verificando cómo cambian, por esta consideración, variables tales como velocidad, costo, demanda, etc.(Gao et al. 2010)

La presente investigación tiene como objetivo la comparación de los resultados de demoras arrojados por un macro simulador con un micro simulador, y analizar las diferencias que pudiesen existir al confrontar los resultados de los dos simuladores sobre las mismas vías.

Para cumplir dicho objetivo se toma como objeto real la denominada "Zona Amarilla", ubicada en el centro de la ciudad de Medellín, elegida por su condición caótica de congestión en horas pico y por ser una zona en su mayoría atractora de viajes. El municipio de Medellín y el Valle de Aburrá cuenta con una serie de estudios que han sido ejecutados en pro de mejorar la movilidad de la ciudad, algunos de estos estudios del 2014 fueron depurados y organizados proveyendo los insumos que alimentaron los simuladores usados.

Para llevar a cabo el caso aplicado se construyó la red vial del centro de Medellín en un macro simulador (VISUM) y en un micro simulador (VISSIM) comercializados por la misma casa PTV Group, debido a la conveniente compatibilidad entre ambos, se utilizó asignación de equilibrio para el enfoque macro y asignación dinámica para el micro. En ambos, la demanda de viajes utilizada se tomó de las matrices origen y destino existentes en el Valle de Aburrá.

El documento está estructurado en seis capítulos. El primero es este capítulo introductorio, en el que se plantea el problema de investigación, la justificación, la hipótesis, las preguntas de investigación, los objetivos y la metodología a utilizar.

El capítulo 2 presenta la revisión bibliográfica y marco teórico, las experiencias tanto a nivel internacional como nacional con el uso de simuladores de transporte, ahondando en el tema de los simuladores utilizados en este estudio, con sus respectivas teorías base para el análisis de las demoras.

El capítulo 3 muestra la revisión y depuración de la información secundaria existente para alimentar los simuladores, este análisis dio paso al capítulo 4 en el que se construye y calibra la red objeto de estudio en ambos simuladores.

El capítulo 5 presenta el análisis y comparación de resultados de los dos simuladores, tanto en la red vial del centro de Medellín, como para el caso hipotético de contraste. Finalmente, el capítulo 6 presenta las conclusiones de la investigación, así como las sugerencias para futuras investigaciones.

1.1 Planteamiento del Problema

De acuerdo a la revisión bibliográfica inicial realizada, es posible evidenciar tres enfoques de simulación de transporte: macro simulación, meso simulación y micro simulación (Anoniou et al., 2010). Debido a las diferencias que existen entre las teorías base de sus algoritmos, se han hecho comparaciones de resultados de tiempos de viaje, velocidades, distancias de viaje, demoras, etc. (Prevedouros & Wang, 1999), (Bloomberg & Dale, 2000), (Tian & Urbanik, 2002), cotejando entre enfoques similares y obteniendo algunas diferencias que no son tan significativas o que pudiesen afectar el funcionamiento de un proyecto. A pesar de esto, es muy poco lo que se ha comparado en niveles extremos microscópico con macroscópico, exceptuando el trabajo de Gao et al. (2010), en el que compararon los resultados de un macro simulador con un micro simulador, sin embargo, dentro de los parámetros contrastados no están las demoras.

Uno de los problemas con el que se encuentra el modelador cuando evalúa las demoras en un macro simulador es valorar los parámetros de calibración de las funciones volumen-demora utilizadas en este nivel (Márquez et al. 2015), la estimación de estos parámetros requiere de estudios costosos y no siempre son evaluados para cada tipo de vía, el mal uso de estos parámetros incurre en problemas de calibración en el modelo y por ende en predicciones que podrían ser poco confiables.

Por otra parte, los micro simuladores requieren una cantidad mayor de parámetros, pero podrían ser más fácilmente observables para asemejar el comportamiento del conductor a la realidad, esperando de ellos resultados más realistas. El análisis de las diferencias de los resultados de las demoras en las predicciones realizadas por los enfoques macro y micro no se ha llevado a profundidad en la literatura existente.

La expectativa al evaluar las demoras en una red vial, en una misma zona y utilizando los diferentes enfoques (macro, meso o micro) es que sean iguales o si existe diferencia, sean mínimas, debido a que la red evaluada es la misma. Sin embargo, como ya se mencionó las teorías base en cada enfoque son diferentes y se requiere de pericia y un considerable conocimiento teórico por parte del modelador para alimentar adecuadamente estos simuladores e interpretar bien sus resultados.

En tal sentido este trabajo de investigación, busca hacer una comparación de resultados obtenidos de las simulaciones a nivel microscópico y macroscópico, utilizando los simuladores VISSIM y VISUM respectivamente, específicamente con los resultados de las demoras ocasionadas por la congestión y encontrar factor(es) de escala, si es que existen, con el fin de convertir los resultados de uno en otro, buscando la consistencia en el uso de ambos enfoques.

1.2 Justificación

Muchas son las dificultades que agobian a las urbes a nivel mundial, entre estas se encuentra el crecimiento del parque automotor y por ende el incontrolable problema de la congestión urbana; por esta razón se hace necesario buscar alternativas que aminoren esta problemática. Una herramienta útil que contribuye a tomar decisiones acertadas en pro de resolver esta dificultad, es la modelización del transporte (J. de D. Ortúzar & Willumsen, 2008)

La implementación de un nuevo sistema de transporte, la planificación de transporte en sí, los planes estratégicos y de movilidad de las ciudades, etc. están siendo desarrollados tomando como base los resultados arrojados por los distintos modelos de transporte, cuyos algoritmos son adoptados por los software de simulación que están disponibles en el mercado. Por esta razón, se espera que las predicciones hechas a través de estos simuladores aporten tanto al modelador como a los tomadores de decisiones una visión clara de la solución óptima al problema que se plantea resolver.

Con esta investigación se pretende encontrar el (los) factor (es) que relacionan las demoras de un enfoque macroscópico con uno microscópico, para brindar confianza en los resultados obtenidos y por ende mayor eficiencia y consistencia al evaluar proyectos de transporte planteados para reducir la congestión.

1.3 Preguntas de Investigación

- ¿Se han hecho comparaciones a nivel de los dos enfoques (macro y micro) y qué resultados se han obtenido en estas comparaciones?
- ¿Existe alguna semejanza en las teorías base de los dos software micro y macroscópico?
- ¿Existe un factor para convertir una demora de un enfoque a otro según el tipo de vía y las condiciones de control?

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Relacionar las teorías base de los simuladores macroscópicos y microscópicos y encontrar un factor de escala para los resultados de demoras arrojados por ellos.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Relacionar la teoría en la que se basa los simuladores a nivel microscópico (VISSIM) con la de los simuladores a nivel macroscópico (VISUM) para modelar las demoras en el tránsito de vehículos.
- Encontrar un factor de escala para ajustar resultados de las demoras del tránsito de vehículos en una red vial urbana, entre los enfoques macroscópico y microscópico.

1.5 Hipótesis Preliminar

Es posible encontrar un factor de ajuste que permita validar los resultados de las demoras producidas en la congestión urbana del micro simulador al macro simulador, dado que en el primero por su nivel de detalle se espera que estas demoras calculadas sean más confiables.

1.6 Metodología

Desde un punto de vista práctico en la presente investigación se buscará el cumplimiento de los objetivos plateados siguiendo los siguientes pasos:

1.6.1 Revisión bibliográfica

Se hace una revisión del estado del arte en cuanto a simuladores y sus diferentes comparaciones a nivel mundial, avances realizados en las teorías base de los modelos de transporte desde el enfoque macroscópico y microscópico.

1.6.2 Obtención y depuración de información secundaria

Búsqueda y análisis de información existente. Esta depuración permite alimentar los programas de simulación usados en este trabajo de investigación y a su vez cotejar los resultados arrojados por los programas.

A continuación se presenta un listado de dicha información:

1. Simulaciones hechas en Medellín y/o Área Metropolitana del Valle de Aburrá.
2. Geometría de la red.
3. Señalización (vertical, horizontal, ciclos semafóricos, etc.)
4. Aforos vehiculares

5. Ciclos semafóricos
6. Acopio de camiones y taxis
7. Inventario de estacionamientos en el área de estudio.
8. Rutas de buses y paraderos
9. Matrices origen y destino de los modos auto liviano, taxis, camiones y motos

Se examina esta información y se toma como punto de partida para construir el caso de estudio y hacer la verificación de la hipótesis del trabajo investigativo.

Demanda y modos de transporte

La información de demanda de viajes es tomada de la Encuesta Origen Destino EOD 2012 del Valle de Aburrá, y actualizada con factores de ajuste obtenidos de aforos, a 2014. Los modos usados en las simulaciones corresponden a autos livianos, taxis, motos, camiones, y buses.

Las matrices de cada modo son adaptadas de manera tal que pueda ser leída en cada programa. VISUM utiliza Autos Directos Equivalentes (ADEs), que son transformados al multiplicar la demanda por factores de equivalencia ya establecidos, en manuales o en algunas ciudades. VISSIM, por su parte, funciona con vehículos mixtos que no necesitan sufrir ninguna transformación, es decir, cada tipo de vehículo lo simula tal cual se comporta.

1.6.3 Construcción y calibración de la red

En el marco teórico (Capítulo 2) se incluye la teoría de las cuatro etapas de modelo de transporte, se hace énfasis en la cuarta etapa, asignación, ya que es la teoría base para el desarrollo del presente trabajo.

Dadas las condiciones de congestión y tamaño del centro de la ciudad de Medellín se eligió como objeto de estudio de esta investigación, a partir de ahora se denomina Caso 1. Asimismo se crea un pequeño ejemplo hipotético, nombrada Caso 2. Ambas redes son construidas y calibradas en los simuladores VISSIM y VISUM.

La construcción de la red del caso 1 en ambos simuladores se hace partiendo de las ayudas visuales de Google maps, Google Street View, el MapGis de la Alcaldía de Medellín y verificaciones en campo. Tomando ancho de calzada, cantidad y ancho de carriles, sentido de circulación, señalización, etc.

La calibración del caso 1 es realizada mediante la aplicación de indicadores de ajuste entre datos medidos en campo y los arrojados por los simuladores, los mismos que son mostrados en el ítem de calibración de la red. Debido a que no hay datos reales para el caso 2, se hace un análisis estadístico (Prueba test-t Student, para muestras independientes) comparando los volúmenes vehiculares entre la asignación de flujos ejecutada por cada simulador.

Para los resultados de demoras en el macro simulador se parte de una red previamente calibrada (Solarte Portilla 2015), desarrollando como aporte de esta tesis la construcción de la misma red en el micro simulador, lo cual será una herramienta valiosa para futuros estudios en la ciudad de Medellín.

1.6.4 Análisis y comparación de resultados

Después de realizar las simulaciones y haber calibrado la red en el par de simuladores, se evalúan y se comparan los resultados de las **demoras** de cada simulador y se analizan sus diferencias.

Para la validación de ambos casos se ejecuta la prueba estadística Test-t Student para muestras independientes, planteando una hipótesis nula y una alternativa (generales), eligiendo un nivel de significancia (0.05) al que serán sometidas y un nivel de confianza alto (95%).

1.6.5 Obtención de factores de escala para los distintos tipos de vía.

Si después del análisis realizado se verifica que es posible encontrar factor(es) de escala se calcularán para distintos tipos de vías considerando algunos aspectos como: Jerarquía vial, capacidad de las vías, cantidad de carriles, obstáculos en las calles, etc. En caso de que no sea posible definir factores de escala, se interpretarán los resultados para llegar a la conclusión de que los valores de demora son significativamente iguales, o significativamente diferentes sin ninguna relación entre ellos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Modelos de Transporte

Un *modelo, "es una representación simplificada de la realidad"* (J. de D. Ortúzar & Willumsen, 2008). Un modelo debe poseer características intrínsecas del fenómeno representado, que lo vuelvan simple para ser manipulado.(Radelat Egües, 1994)

Los modelos pueden ser representaciones tangibles y/o intangibles. Los tangibles son modelos a escala (menor, mayor o real) entre estos se encuentran: las maquetas, canales hidráulicos, carreteras experimentales, etc. Los intangibles comprenden los métodos analíticos, con los cuales se trata de explicar por medio de expresiones lógicas y matemáticas un fenómeno. En algunos casos, estos últimos pueden ser resueltos con la aplicación de una ecuación, la creación de una gráfica, o sea, que el resultado soluciona por completo el modelo, sin embargo hay otros más complejos y requieren de iteraciones para converger y encontrar una solución.

El uso de modelos para probar y/o conocer ya sea teorías, el funcionamiento de una máquina, predecir el comportamiento de un fenómeno, la demanda y la oferta de un producto o servicio, el estado financiero de una empresa, el mejor método en la enseñanza, etc., es parte de la vida cotidiana. Sin embargo estas predicciones están sujetas a los cambios en la naturaleza misma. Por ejemplo, en un país, mediante modelos económicos, se pudo predecir el incremento en su PIB, no obstante, si durante ese año el país es azotado por un huracán que tras su paso arrasó con las cosechas de cierto producto, que es uno de los grandes aportantes en la economía del lugar, esto genera un desequilibrio en la economía de ese país, por lo tanto el PIB fluctuará y es muy probable que sea menor a lo previsto. Un modelo intenta predecir hechos regulares, pero debe considerarse que no son cien por ciento efectivos en sus predicciones si algunas variables o escenarios no han sido contemplados. Es decir, que unas veces es por errores normales de predicción que pueden ser aceptables, y otras por graves cambios en las hipótesis del modelo.

La modelación de la etapa de asignación de transporte se encuentra en la categoría de los modelos analíticos ya que emplean ecuaciones derivadas de las teorías de flujo de tránsito para su desarrollo. Estas teorías a su vez hacen uso de leyes de la física y matemática para mostrar de manera inteligible el comportamiento de los vehículos en una malla vial. Por la complejidad que representa modelar este fenómeno, requiere de procesos iterativos y el uso de equipos computacionales potentes para obtener resultados.

2.2 Modelo Clásico de Transporte

El llamado modelo clásico de transporte en realidad es un conjunto de modelos (etapas) que se concatenan para arrojar un resultado de los flujos por una red de transporte. Este modelo es empleado asiduamente para explicar de manera práctica lo que sucede en una red de transporte, desde el momento en el que un habitante de una zona comienza a tomar decisiones acerca de sus viajes: ¿Hará o no viajes?, ¿Hacia dónde viajará?, ¿En qué modo de transporte se desplazará?, ¿Qué ruta seleccionará para llegar a su destino?

La información relevante para el desarrollo de cada una de las etapas en este modelo requiere de datos como la zonificación, cantidad de viajes que entran y salen de una zona, modos de transporte disponibles, información socioeconómica, origen y destino de los viajes de los habitantes, infraestructura vial disponible, aforos vehiculares y de peatones, rutas de transporte público, etc. La calidad y cantidad de la información obtenida es un asunto determinante en la modelación, por tal motivo es importante dedicarle el tiempo necesario, desde el diseño del instrumento para su adquisición, la recolección, hasta su procesamiento.

El modelo clásico de transporte es representado en una sucesión de cuatro etapas, las primeras tres se conocen como la demanda de transporte y estas son: generación/atracción, distribución y reparto modal. La cuarta etapa, también llamada la oferta es la que realiza la asignación de los viajes a la red. Cada una de éstas, cuenta con diferentes métodos para cuantificar y predecir la demanda y la oferta de transporte en este modelo. Lo ideal es que entre las etapas de la demanda y de la oferta se establezca una coherencia o consistencia denominada modelo de equilibrio entre la demanda y la oferta (Ortúzar & Willumsen, 2011).

Generación/atracción: es la etapa inicial del modelo clásico, debido a que se recopila la información de las zonas generadoras y atractoras de viajes; habitualmente las zonas que generan viajes son las áreas residenciales y los sitios que atraen viajes son el comercio, la industria, los centros educativos, los sitios de ocio, etc. En muchos casos como en el Valle de Aburrá, las zonas generadoras se encuentran ubicadas al norte del valle y las zonas que atraen viajes están establecidas al sur. En esta fase es importante conocer la zonificación y uso de suelo del área a evaluar, pues es aquí donde se contabilizan los viajes que se originan en cada zona y donde se conocen las condiciones socioeconómicas de los habitantes. En esta etapa se predice la cantidad de viajes que generará y atraerá una determinada zona.

En la literatura se encuentran numerosas técnicas y métodos para predecir los viajes en esta etapa, entre estos mencionan: métodos del factor de crecimiento, modelo de regresión lineal con todas sus derivaciones (a nivel de zonas, de hogares, o de individuos), el análisis por categoría; clásico y clásico mejorado; este último denominado análisis de clasificación múltiple; enfoque basado en categorías de personas, etc. Ver (Ortúzar & Willumsen, 2011)

Distribución: En esta etapa se distribuyen los viajes generados en la primera etapa, su finalidad es predecir la distribución de viajes entre las distintas zonas del área de estudio.

Los métodos utilizados en esta fase son: modelos análogos o de factor de crecimiento (factor de crecimiento uniforme, método de factor de crecimiento simplemente acotado, factor de crecimiento doblemente acotado, factor promedio y Fratar) y modelos sintéticos o modelo de gravedad (Método de distribución gravitacional, individual y doblemente

acotados, modelo de oportunidades y modelo electrostático), enfoque de maximización de entropía (Patriksson, 1994; Ortúzar & Willumsen, 2011).

Reparto Modal: en esta fase se ven involucrados los sistemas disponibles en la ciudad (auto privado, moto, taxi, bicicleta, bus, metro, caminata y/o combinación de estos, etc.), es decir hay una serie de opciones entre las que el individuo decide de manera racional (la racionalidad la define el modelador) qué modo utilizar.

Para conocer la demanda de viajes en un modo de transporte, existen modelos econométricos, que predicen esa demanda, basados en la teoría de utilidad aleatoria, entre estos se encuentra: logit simple (MNL), logit jerárquico (HL), logit mixto (MXL), probit, etc. Generalmente estos modelos calculan sus predicciones evaluando variables como el costo y el tiempo de viaje. Esta predicción también puede estar condicionada por otros aspectos como la edad, el género, nivel educativo y socioeconómico. Ver (J. D. D. Ortúzar & Willumsen, 2011)

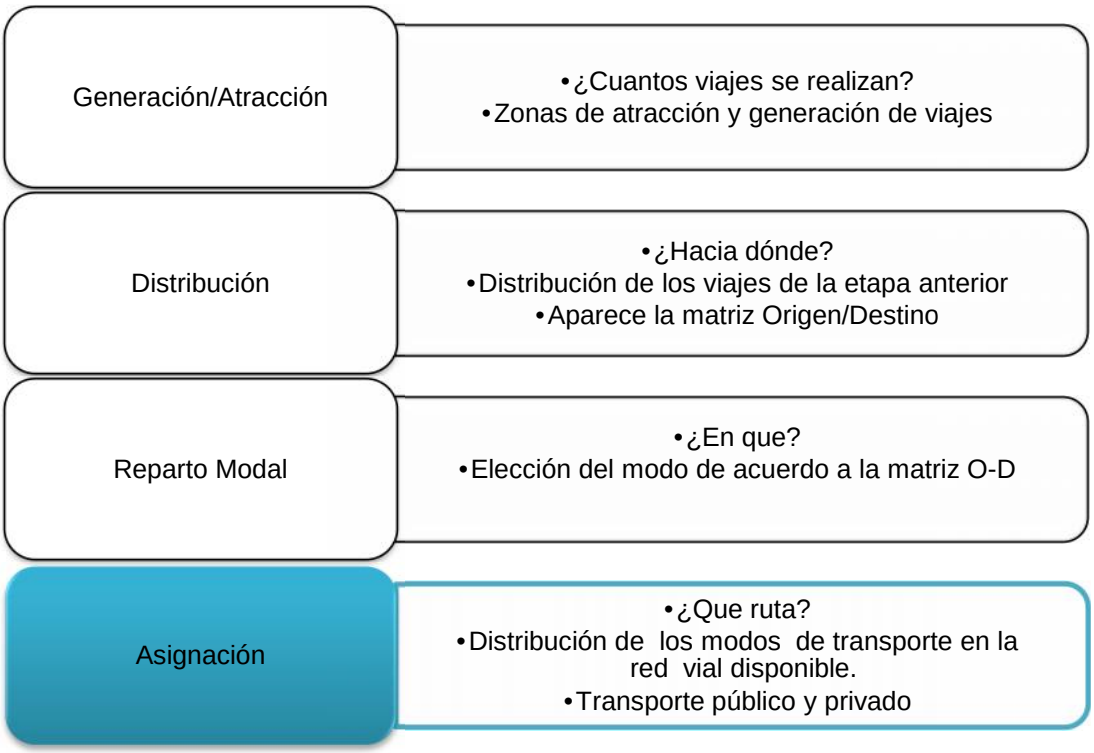
No obstante en la actualidad se ha estudiado otro tipo de modelos en los que se evalúan aspectos subjetivos e intangibles. Estos factores han sido incluidos en los modelos econométricos clásicos, por medio de la inclusión de variables latentes y psicológicas en sus ecuaciones, formando los denominados modelos híbridos.

Córdoba & Jaramillo (2012) afirman que los rasgos de la personalidad del individuo y Arbeláez Arenas (2015) sostiene que elementos subjetivos como la comodidad y seguridad, que presenta un modo de transporte en comparación con otro(s), influyen en la elección del modo.

Asignación: es la cuarta y última etapa del modelo clásico, utiliza la información de la matriz origen y destino para asignar el tráfico en una red de transporte disponible. En este paso es posible determinar los costos (tiempo de viaje) del usuario. Su fin principal es encontrar y asignar una ruta óptima al usuario, siguiendo los patrones de viaje obtenidos de las etapas anteriores.

La Figura 2-1 muestra un resumen del modelo clásico de cuatro etapas. La primera, de generación/atracción avala la cantidad de viajes que se generan o atraen en una zona, en esta fase se encuentran las áreas residenciales que producen viajes y todos aquellos sitios que atraen viajes, ya sea por trabajo, estudio, ocio y placer, etc. La segunda o de distribución, responde a la pregunta ¿hacia dónde?, como se distribuyen los viajes generados y/o atraídos en la primera etapa y da lugar a la matriz origen/destino (O/D). La tercera etapa resuelve la elección del modo de transporte, si lo hará en bus, en metro, bicicleta, caminando, taxi, vehículo propio, etc. La cuarta etapa es la de asignación, en la que se incluye la oferta de la infraestructura vial disponible para el modo elegido por los usuarios a sus diferentes destinos y retorno a sus orígenes, determinando los caminos o trayectorias seguidos por los individuos y los flujos por ellas.

Figura 2-1. Esquema del modelo clásico de transporte de cuatro etapas



Fuente: Elaboración propia con base en Ortúzar & Willumsen, (2011)

La etapa en que se concentra esta investigación es la cuarta o de asignación, razón por la cual se profundiza en este ítem, en ésta se evaluará el comportamiento del tránsito de diferentes tipos de vehículos en la red vial disponible del centro de la ciudad de Medellín y en un caso pequeño con una demanda hipotética.

2.3 Modelo de Asignación

La tarea fundamental de los modelos de asignación de tráfico es predecir los flujos vehiculares en una red vial, sabiendo que estos viajes tienen un origen y que van a un destino Habitualmente es alimentado de la información obtenida de las matrices O/D y debe existir una red a la cual se asignará todo el tráfico generado, atraído y distribuido en una zona.

La asignación puede realizarse con diferentes métodos según el enfoque requerido. En el caso del enfoque de macro simulación se utiliza la asignación por equilibrio, en donde se busca cumplir el principio de Wardrop en el que los costos por las vías utilizadas entre un par origen destino es igual en todas las rutas utilizadas. En el caso de mircro simulación se utiliza la teoría de seguimiento de vehículos que es expuesta más adelante.

Clasificación de los modelos de asignación

El efecto de la variación del tiempo en los modelos de asignación es un factor importante en la decisión de la ruta que es utilizada por un individuo para llegar al destino, y es lo que diferencia a los modelos estáticos de los dinámicos. En general, Ortúzar & Willumsen (2011), afirman que los factores mas importantes en esta desición son el tiempo de viaje y el costo monetario de ese viaje, que es proporcional a la distancia de viaje. Por otra

parte no es lo mismo viajar con alguna medida de restricción por congestión que sin ella; con sólo el hecho que exista esta condición puede cambiar el patron de viaje de un usuario de vehículo privado que se vea afectado por esa medida.

De acuerdo a la inclusión o no del tiempo de realizar el viaje, los métodos de asignación se clasifican en: métodos de asignación estáticos y métodos de asignación dinámicos.

Modelos de asignación estáticos

En los modelos de asignación estáticos, no se toma en cuenta la elección de la hora de viajes como factor determinante en la selección de la ruta. En método de asiganción estático y conocido, es el método de as asignación "todo o nada". En este método todos los viajes en las rutas son asignadas equitativamente, es decir que busca el tiempo de recorrido mínimo y de acuerdo a este criterio así realiza la asignación sin límite de capacidad. Si varios usuarios van de un punto “A” a un punto “B”, asume que su comportamiento es similar, que no se desviarán del camino y por lo tanto usarán la misma ruta para llegar a su destino; si existiesen dos rutas paralelas que pueden servir a estos usuarios, tomará una como la más rápida y la que genera menos costos y es la que elegirá. (Ortúzar & Willumsen 2011). Puede ser utilizado en las vías donde no hay congestión o donde la red sea relativamente pequeña. Genera problemas al ser aplicada en redes grandes ya que la concepción de costos de este método es que son fijos en los arcos, porque la capacidad se asume como infinita (Ramírez Rodríguez, 1995). Otra aplicación: asignar tráfico en vías exclusivas, es decir que no se ven afectadas por la congestión; en medios de transporte masivo; tranvía, metro, etc.

Después del método todo o nada, surgieron otros métodos que tenían en cuenta la restricción de capacidad tales como el incremental, el de equilibrio de usuario, el de equilibrio estocástico del usuario, entre otros. El incremental asigna la matriz en porcentajes pequeños (10 o 20% cada vez, por ejemplo), y cada vez que aplica un porcentaje asigna por el todo o nada. Pero cada vez que aumenta el porcentaje, los caminos mínimos van cambiando porque algunos de ellos se van congestionando. Aunque trata de asemejarse a un llenado gradual de la red, el método incremental no garantiza el equilibrio (que todos los costos entre cada par origen destino sean iguales, que como lo establece el principio de Wardrop), Wardrop (1952).

El método del equilibrio, desarrollado por Sheffi (1985), resolvió matemáticamente el principio de Wardrop (1952) y asigna de manera gradual los viajes de modo que se chequea que se garantice dicho principio. En este método se asume que todos los usuarios tienen igual información e igual valor del tiempo. Cuando estos supuestos se relajan van surgiendo otros métodos más sofisticados como el del Equilibrio Estocástico del Usuario, en el cual se asume que los valores percibidos en cuanto a costos de la red por parte de los usuarios pueden tener variaciones estocásticas. Pero aun así, todos los usuarios siguen siendo en promedio iguales. Cuando se relaja este último supuesto, y se introducen distintos valores del tiempo, con lo cual se pueden simular distintos tipos de matrices de vehículos distintos (autos, motos, taxis, camiones, etc.), se llega al Equilibrio Estocástico Multiusuario o multiclase. No obstante, todos los métodos anteriores siguen siendo estáticos porque suponen que la matriz es fija en un período de tiempo, es decir, que todos los viajes pueden ser asignados en ese tiempo y que ninguno se puede salir de esa franja horaria, es decir, ningún viaje se podrá adelantar a ese período, ni postergar para después de ese período.

Modelos de asignación dinámicos

Intentan reproducir el efecto del tiempo en que se realiza el viaje. La decisión de cambio de hora para viajar puede estar influenciada por alguna medida existente, e.g. cambio de precio en el pasaje del bus en horas valle, restricción en hora pico por número de placa, cobro por congestión, etc.

Los flujos son representados en la red con mayor exactitud. Los meso simuladores utilizan estos modelos para asignar el flujo. Existen dos componentes principales de la asignación dinámica: la elección del viaje y el componente del flujo de tránsito. La primera relaciona la manera en que los individuos eligen su ruta, el modo, el destino y el horario de salida. Y la segunda representa cómo se propaga el flujo en la red y regula el rendimiento de la red en términos de tiempo de viaje.(Szeto & Lo, 2006)

2.4 Herramientas de Análisis de Tráfico

Los avances tecnológicos han dado paso al desarrollo a una serie de herramientas tanto de hardware como de software que analizan y controlan el tráfico. Este apartado estudia los software de tránsito, con las cuales es posible evaluar diferentes aspectos del comportamiento del transporte en ciudades. Cada herramienta se especializa y evalúa la situación de diversas formas, acoplándose a las necesidades preponderantes de cada sitio. Teniendo la información adecuada del sitio a valorar y el uso apropiado de estos instrumentos, puede obtenerse como resultado la demanda y la oferta de transporte de una zona.

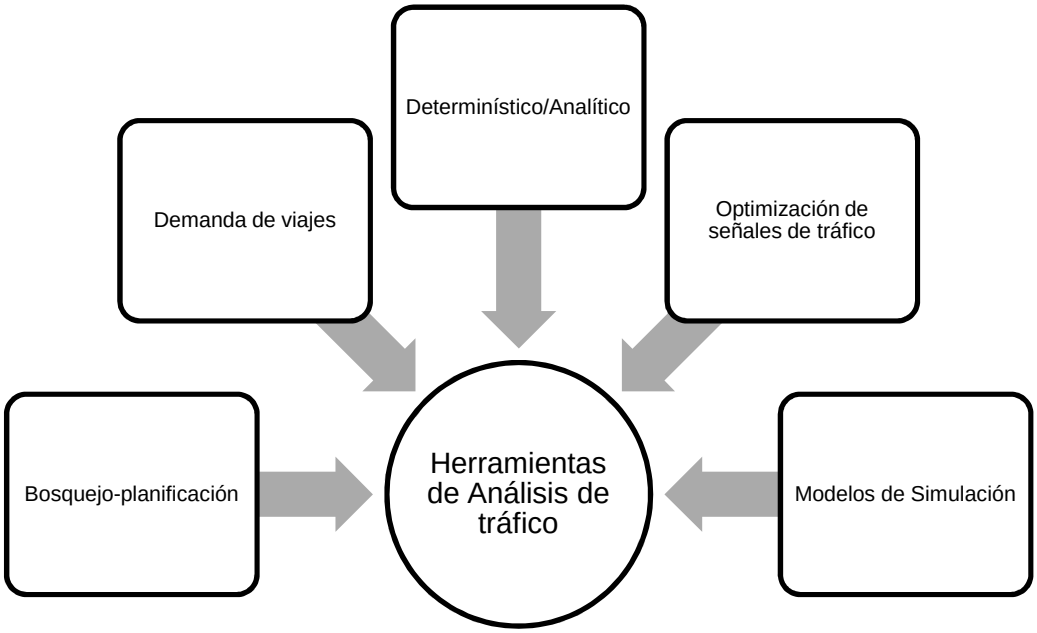
Los plazos de tiempo para la evaluación e implementación de soluciones, el alcance del estudio y por supuesto el presupuesto disponible para su ejecución, son factores influyentes para la elección de la herramienta apropiada. Otros criterios para seleccionar el instrumento de análisis conveniente pueden verse en (FHWA, 2004).

Las herramientas de análisis de tráfico se clasifican de acuerdo al nivel de detalle, parámetros a evaluar, tamaño del proyecto, etc. La FHWA las agrupa en las siguientes categorías:

- Herramientas bosquejo-planificación
- Modelos de demanda de viajes
- Herramientas determinístico/analítico
- Herramientas de optimización de señales de tráfico
- Modelos de simulación

Un esquema general de las herramientas de análisis de tráfico es presentado en la Figura 2-2.

Figura 2-2. Esquema de las herramientas de análisis de tráfico



Fuente: Elaboración propia, con base en FHWA (2004)

2.4.1 Herramientas de bosquejo-planificación

Teniendo un boceto o esquema preliminar de un proyecto, estas herramientas permiten evaluarlo sin entrar en un estudio ingenieril profundo. Es muy útil cuando el proyecto está en estudios preliminares, porque mediante su uso se pueden hacer propuestas y presupuestos iniciales, que si bien es cierto no dan una solución definitiva, si orientan a cerca de la factibilidad de ejecución del proyecto.

Las alternativas de solución a una carretera terciaria en mal estado, podrían ser: pavimentarla, solamente dar algún tipo tratamiento superficial, etc. Conociendo datos iniciales como la topografía y geometría de la carretera, datos de CBR y algunos costos estimados, pueden ser comparadas en el software HDM (Highway Development & Management) para determinar la factibilidad económica de cada opción. Este software hace parte de este grupo de herramientas de bosquejo-planificación.

Cabe aclarar que las herramientas de bosquejo-planificación no sustituyen a ninguna de las otras y que si el proyecto lo amerita debe profundizarse en su estudio. Una ventaja significativa es que son fáciles de usar y menos costosas. Pero tienen desventajas como su limitado alcance y que carecen de firmeza analítica.

Algunos ejemplos de estas herramientas de bosquejo-planificación son: Turbo Aechitecture Overview, HDM, QUICKZONE, TEAPAC, TransDec, entre otras.

2.4.2 Modelo de demanda de viajes

Estos modelos predicen la demanda futura de viajes con datos actuales, analizando básicamente la información obtenida de las matrices origen y destino, y conociendo la

información de hogares, trabajo, centros de estudio, centros de ocio, etc. Como ya se mencionó en el modelo clásico, las primeras tres etapas de este modelo corresponden al análisis de la demanda de viajes en un sitio.

Los siguientes son programas que facilitan la modelación de la demanda y la oferta de viajes: CUBE (con todas sus versiones), EMME, IDAS, Micro TRIMS, SATURN, Tmodel, TransCAD, VISUM, etc. Para el reparto modal existe software libre como el Biogeme para hacer las estimaciones de los modelos de elección discreta, asi como otros comerciales.

2.4.3 Herramientas determinístico/analítico

Se les llama de esta manera porque necesitan de un método analítico para su solución y determinístico porque después de aplicar ese método su solución es única. Uno de los métodos analíticos más utilizados es el del Manual de Capacidad de Carreteras HCM, desarrollado en Estados Unidos. Los métodos utilizados en este manual permiten pronosticar rápidamente la capacidad, demoras, densidad y colas de un tramo de carretera. Los valores utilizados en sus ecuaciones son los promedios, por eso se dice que su análisis es macroscópico. Un aspecto importante que desfavorece su uso es su alcance, ya que no se puede analizar una red de gran tamaño. No obstante, son prácticos a la hora de analizar o evaluar un tramo concreto de un corredor.

Existen numerosos instrumentos en esta categoría, a continuación se mencionan por lo menos treinta de ellos: 5-Leg Signalized Intersection Capacity, SIDRA, ARCADY, ARTPLAN, CATS, Canadian Capacity Guide (CCG), CINCH, CIRCAP, DELAYE, dQUEUE, FREEPLAN, FREWAY, FRIOP, General Purpose Queuing Model, Generalized Annual Average Daily Service Volume Tables, HCS, IQPAC, Left-Turn Signal/Phase Warrant Program, PICADY, PROGO, Quality/Level of Service Handbook, Roadrunner HCM, SIPA, SPANWIRE, SPARKS, Synchro, TEAPAC (con sus versiones /NOSTOP,/SIGNAL2000,WARRANTS), TIMACS, TS/PP-Draft, WEST, WHICH, etc.

2.4.4 Herramientas de optimización de señales de tráfico

Estas herramientas han sido tema de interés en diferentes ramas de la ingeniería, funcionan como un todo y su principal objetivo es optimizar el tiempo de viaje y proveer una pronta respuesta a los usuarios en la vía; va desde el manejo del tiempo de los ciclos semafóricos en la red vial, hasta mantener informados a los habitantes, a través de las redes sociales, en tiempo real, sobre los incidentes ocurridos sobre alguna vía, que vías están congestionadas y qué rutas alternas están disponibles.

Existen una gama de herramientas que contribuyen con la tarea de optimizar, un ejemplo sencillo: los ciclos semafóricos, van desde las convencionales que muestran tiempos fijos de verde, rojo y ámbar, hasta los complejos, denominados semáforos inteligentes, que actúan con sensores y dan prioridad a la vía que tiene mayor congestión o permiten el paso al sistema de transporte masivo, que tiene carriles exclusivos para su desplazamiento.

Se acopla a estas herramientas, el uso de la telemática en los sistemas de transporte, la cual por medio de radiotransmisores informan a la entidad encargada del funcionamiento del transporte público, la ubicación y el tiempo que demorará en llegar a cierta estación y/o paradero un modo cualquiera, de los disponibles en esa ciudad. Esta información a

su vez es trasladada a los demás modos y a los usuarios por medio de pantallas informativas en los paraderos, estaciones y terminales, asimismo a través de aplicaciones en aparatos celulares. Esta herramienta permite optimizar el tiempo de viaje de un usuario, ya que sabe con exactitud a qué hora hará el abordaje en su punto de espera. (Deutsche Well, 2012).

La ciudad de Medellín cuenta con el Sistema Inteligente de Movilidad de Medellín SIMM, el cual integra cámaras de fotodetección, circuito cerrado de TV, paneles informativos, WEB 2.0, optimización de semáforos y un software gestor. La implementación de este sistema le ha permitido a la ciudad mejorar en materia de movilidad, por ejemplo, con el sistema de fotodetección, es fácil detectar incidentes en algún sitio de la ciudad y dar respuesta de manera inmediata, evitando que se genere congestión en ese punto de la red. (Secretaria de Movilidad de Medellín, 2013)

Los siguientes son ejemplos de estas herramientas: PASSER con sus diferentes versiones, Syhchro, TEAPAC (con sus versiones / NOSTOP, /SIGNAL2000, WARRANTS), TRANSYT-7F, TS/PP-Draft, etc.

2.5 Modelos de Simulación de Redes Tránsito

El uso de simuladores de tránsito se remonta a los años 50, en el Reino Unido, con el desaparecido Laboratorio de Investigación de Transporte y Carreteras (TRRL, por sus siglas en inglés) hoy Laboratorio de Investigación de Transporte (TRL, por sus siglas en inglés) quienes desarrollaron la primera simulación en intersecciones. (TRL, 2015). Asimismo en Estados Unidos, la desaparecida Oficina Pública de Carreteras (BPR, por sus siglas en inglés) hoy en día la Administración Federal de Carreteras (FHWA, por sus siglas en inglés), desde su inicio ha ejecutado estudios en pro de la investigación de métodos para el diseño de carreteras, de igual manera ha contribuido con el desarrollo de software de simulación de tránsito, en 1969 desarrollaron la función flujo-demora, denominada BPR, también conocida como Función Volumen-Demora (FVD) muy usada para el cálculo de las demoras en el tráfico en los modelos de simulación macroscópicos. (FHWA, 2015)

Desde los años noventa, los simuladores son programas desarrollados en ambientes gráficos que tratan de mostrar el comportamiento del flujo de tránsito en una malla vial. Para que estos simuladores ejerzan la función de representar este comportamiento, deben desarrollar algoritmos basados en modelos que fueron y siguen siendo estudiados por la academia. Tal es el caso de la teoría fundamental del flujo vehicular en los macro simuladores y el modelo de seguimiento de vehículos para los micro simuladores.

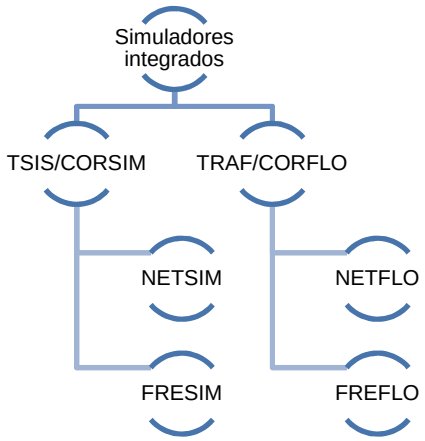
Los simuladores permiten simular diferentes escenarios, cuyo objetivo es mostrar que pasa si se implementa "x" o "y" solución a una problemática o un nuevo proyecto de transporte. La representación del flujo vehicular, no es la única ocupación de estos simuladores, también evalúan los costos económicos por emisiones de contaminantes, permiten hacer análisis de sensibilidad financiera para determinar el costo/beneficio entre alternativas estudiadas, etc.

De acuerdo al nivel de detalle con que analizan la red vial, se clasifican en: modelos de simulación macroscópicos, mesoscópicos y microscópicos; estos a su vez analizan la malla vial de acuerdo a la jerarquía; es decir, autopistas, vías urbanas, interurbana, etc. Sin embargo, no todos evalúan desde un solo enfoque, ni un solo tipo de vía.

Por ejemplo, en el esquema mostrado en la Figura 2-3 se visualiza la integración de un conjunto de micro simuladores y macro simuladores de la (FHWA, 2003) que analizan tanto redes urbanas como autopistas, estas integraciones permiten que las propuestas evaluadas sean más convincentes.

El paquete de simulación TSIS/CORSIM integra NETSIM (micro simulación de redes urbanas) y FRESIM (micro simulación de autopistas). Y el paquete TRAF/CORFLO integra NETFLO (macro simulación de redes urbanas) y FREFLO (macro simulación autopistas).

Figura 2-3. Simuladores integrados por FHWA.



Fuente: elaboración propia con base en FHWA (2003)

Por otro lado INTEGRATION simula a nivel microscópico y mesoscópico y TRANSMODELER simula los tres enfoques (macro, meso y micro) individualmente y también simultáneamente, a estos últimos se les denomina modelos híbridos. (Caliper Corparation, 2015). Igualmente el software AIMSUN integra estos tres niveles.(TTS, 2015)

El tipo de planificación a ejecutar partiendo de los resultados de los simuladores y la delimitación del área específica, son una guía para decidir qué tipo de simulador utilizar, si la planeación es estratégica, es recomendable utilizar un macro simulador, pero si se requiere alcanzar un objetivo a nivel de planeación operativa es útil detallar con un micro simulador.

2.5.1 Modelos de Simulación Macroscópicos

Son herramientas utilizadas para simular a nivel macroscópico el comportamiento del transporte público y privado en las redes de tránsito vehicular. Debido a su enfoque de análisis, utiliza valores promedio de velocidad, tiempo de viaje, flujo y densidad.

El comportamiento de los vehículos en los macro simuladores es semejante a los modelos de: (1) dinámica de fluidos: considera el flujo vehicular como un fluido, sin ningún tipo de interrupción, o sea sin intersecciones; (2) y cinética de gases; considera el tránsito de vehículos como partículas que interactúan entre sí, como un solo fluido. Estos modelos fueron desarrollados por Lighthill & Whitham (1955), aunque muchas

características que se derivan de la analogía con el flujo hidrodinámico fueron fuertemente criticadas por Daganzo (1995).

Para el funcionamiento de un modelo macroscópico se requiere básicamente de la demanda de transporte y la red vial disponible en el sitio de estudio. La demanda de viajes en los diferentes modos, es obtenida de la matriz origen y destino, la cual es desarrollada en las primeras tres etapas del modelo clásico de transporte. La malla vial son todos los elementos en materia de infraestructura vial disponibles en una zona.

Estos simuladores brindan un amplio panorama de la posible implementación de un nuevo sistema de transporte o una nueva línea a un sistema existente; sus resultados permiten el desarrollo de planes estratégicos, analizar la construcción de una nueva carretera, cuál es efecto de aplicar una política para disminuir la congestión en una ciudad, etc. Los principales dieciséis macro simuladores utilizados en los diferentes países son mostrados en la Tabla 2-1, la última columna representa el tipo de vía que se puede simular, los integrados pueden simular, tanto autopistas, redes urbanas y rurales.

Tabla 2-1: Macro simuladores de redes de transporte

Simulador	País de origen	Aplicación
AUTOS	Georgia Tech Research Institute, EEUU	Autopistas
TRAF/CORFLO	FHWA, EEUU (contiene NETFLO y FREFLO)	Integrado
EMME 4.2	Transportation Association of Canada, Canada	Integrado
FREFLO	FHWA, EEUU	Autopistas
FREQ	Universidad de California, EEUU	Integrado
KRONOS	Universidad de Minessota, EEUU	Autopistas
METACOR	Centro de Ingeniería de Tráfico y Simulación de Tráfico, Suecia	Integrado
METANET	Universidad Técnica de Múnich, Alemania	Autopistas
NETFLO	FHWA, EEUU	Redes señalizadas
NETVACI	Instituto de Tecnología de Massachusetts, EEUU	Redes señalizadas
PASSER	Instituto de Transporte de Texas, EEUU	Redes señalizadas
TRANSYT-7F	FHWA, EEUU	Redes señalizadas
TRANSYT 15.1	TRL, Reino Unido	Integrado
TRANSCAD	Corporación Caliper, EEUU	Integrado
TEXAS	Universidad de Texas, EEUU	Redes señalizadas
VISUM 15	Universidad de Karlsruhe, Alemania	Integrado

Fuente: elaboración propia con base en Kwon et al. (1997), Braban-Ledoux (2000), Sheffi et al. (1982), Babin et al. (1981), Caliper Corparation (2015) y trabajos citados por Boxill & Yu (2000).

2.5.2 Modelos de Simulación Microscópicos

Los micro simuladores modelan a detalle la red vial, es decir que simulan el comportamiento de los vehículos individualmente y algunos tienen incorporado un módulo adicional para simular el comportamiento de los peatones, como es el caso de

VISSIM. Aunque también hay software especializado en la micro simulación de peatones únicamente como VISWALK.

Los micro simuladores de vehículos utilizan para su funcionamiento los modelos de seguimiento de vehículos, cambio de carril y maniobras de adelantamiento. No son recomendables para simular redes muy grandes debido a la cantidad de vehículos que deben ingresar a la red, lo que produce ineficiencia en el funcionamiento el equipo de cómputo (Braban-Ledoux, 2000). En la Tabla 2-2 se presenta un listado de más de sesenta micro simuladores utilizados a nivel internacional

Tabla 2-2: Micro simuladores de redes de transporte

Simulador	País de origen	Aplicación
AIMSUN	Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.	Integrado
ARCADY	TRL, Reino Unido	Redes señalizadas
AUTOBAHN	Benz Consult-GMBH, Francia	Redes señalizadas
AVENUE	Universidad Metropolitana de Tokio, Japón	Redes señalizadas
CASIMIR	Instituto Nacional de Investigación de Transportes y Seguridad, Francia	Redes señalizadas
CARSIM	Universidad de Michigan	Redes señalizadas
CONTRAM	TRL y Mott McDonal, Reino Unido	Integrado
TSIS /CORSIM	FHWA, EEUU(contiene NETSIM y FRESIM)	Integrado
Dynameq 3.0	INRO, Canadá	Redes señalizadas
DRACULA	Instituto de Estudios de Transporte, Universidad de Leeds, Reino Unido	Integrado
FLEXYT	Ministerio de Transporte, Países Bajos	Redes señalizadas
FOSIM	Ministerio de Transporte, Países Bajos	Autopistas
FREEVU	Universidad de Waterloo, Canadá	Autopistas
FRESIM	FHWA, EEUU	Autopistas
HUTSIM	Universidad Tecnologica de Helsinki, Finlandia	Redes señalizadas
ICARUS	Compañía Elsevier, Amsterdam	Integrado
INTEGRATION	Universidad de Queens, Canadá	Integrado
INTRAS	FHWA, EEUU	Redes señalizadas
Junctions 9	TRL, Reino Unido	Glorietas e intersecciones a prioridad
MELROSE	Corporación Electrónica Mitsubishi, Japón	Integrado
METROPOLIS	Universidad de Cergy-Pontoise, Francia	Autopistas
MICROSIM	Universidad de Cologne, Alemania	Redes señalizadas
MICSTRAN	Instituto Nacional de Investigación de Ciencias Policiales, Japón	Redes señalizadas
MIMIC	Automotive Automation Limited, Reino Unido	Seguridad
MITSIM	Instituto de Tecnología de Massachusetts, EEUU	Integrado
MIXIC	Organización Neerlandesa para la aplicación científica, Paises Bajos.	Autopistas
MOVA	TRL, Reino Unido	Redes señalizadas
NEMIS	Mizar Automatización, Italia	Integrado
NETSIM	FHWA, EEUU	Intersecciones señalizadas
OLSIM	Universidad de Duisberg, Alemania	Autopistas
OSCADY PRO	TRL, Reino Unido	Redes señalizadas
PADSIM	Nottingham Trent University, Reino Unido	Autopistas

Simulador	País de origen	Aplicación
PARAMICS	The Edinburgh Parallel Computing Centre and Quadstone Ltd., Reino Unido	Integrado
PELOPS	Institut fur Kraftfahwesen Aachen, Alemania	Integrado
PHAROS	Instituto de Simulación y Entrenamiento, EEUU	Redes señalizadas
PLANSIM-T	Universidad de la Colonia, Alemania	Autopistas
PICADY	TRL, Reino Unido	Redes señalizadas
ROADSIM	FHWA, EEUU	Rural
SATURN	TRL y Universidad de Leeds, Reino Unido	Integrado
SIGSIM	Universidad de Newcastle, Reino Unido	Redes señalizadas
SIMCO2	Universidad Técnica de Aachen, Alemania	Autopistas
SIMDAC	ONERA, Francia	Autopistas
SIMNET	Universidad Técnica de Berlín, Alemania	Autopistas
SIMTRAFFIC	Compañía de Software para señales de tráfico, EEUU	Redes señalizadas
SISTM	TRL, Reino Unido	Autopistas
SITRA-B+	ONERA, Francia	Integrado
SITRAS	Universidad de Nueva Gales del Sur, Gales	Integrado
SMARTPATH	Universidad de California Berkley, EEUU	Autopistas
SOUND	Universidad de Tokio, Japón	Integrado
SPEACS	Programa Protetheus, Reino Unido	Autopistas
STEER	Grupo de Control de Redes de la Universidad de York, Reino Unido	Autopistas
TEXAS	Universidad de Texas, EEUU	Redes señalizadas
TEXSIM	Instituto de Transporte de Texas, EEUU	Redes señalizadas
TRAFFICQ	Administración de Vehículos Motorizados (MVA), EEUU	Redes señalizadas
TRANSIMS	Laboratorio Nacional Los Álamos, EEUU	Autopistas
TRANSMODELER	Corporación Caliper, EEUU	Integrado
THOREAU	Corporación MITRE, EEUU	Autopistas
VENDES	Tecnología AEA, EEUU	Redes señalizadas
VISSIM 7	Universidad de Karlsruhe, Alemania	Integrado
WATSIM	Asociación KLD, EEUU	Integrado
WEAVSIM	FHWA, EEUU	Integrado

Fuente: elaboración propia con base en Benekohal & Treiterer (1988), Dijker & Knoppers (2004), Yang & Koutsopoulos (1996), y trabajos citados por Boxill & Yu (2000).

2.5.3 Modelos de Simulación Mesoscópicos

Los meso simuladores representan el flujo vehicular como un grupo de vehículos llamados "pelotones" o "macro-partículas". Se considera un enfoque intermedio entre los macro simuladores y los micro simuladores, no detallan el comportamiento individual de los vehículos, ni el cambio entre carriles pero permiten el análisis de las intersecciones señalizadas (semáforos), dando cierto nivel de detalle al modelo. Son útiles para desarrollar redes razonablemente grandes.

Estos modelos asumen que el grupo de vehículos se mueven en un arco a la misma velocidad, durante cada período de tiempo y que esta depende de la densidad en el arco. (Jayakrishnan et al., 1994)

La información que alimenta estos simuladores proviene de las matrices O-D, en su mayoría utilizan la asignación dinámica, es decir que los conductores eligen su ruta con base en el tiempo de viaje y los costos de demora según el horario de viaje, en otras palabras consideran la variación en el horario de viaje de los usuarios (de Palma, Marchal, & Nesterov, 1997). Siete de los meso-simuladores más representativos y utilizados en el mercado son mostrados en la Tabla 2-3, en su mayoría utilizan la asignación dinámica como método de asignación y se puede simular todo tipo de vías. Cuatro de ellos también son utilizados como herramientas de micro simulación

Tabla 2-3: Meso-simuladores de redes de transporte

Simulador	País de origen	Aplicación
DYNAMIT	Instituto de Tecnología de Massachusetts, EEUU	Integrado
DYNEMO	Conceptos Innovativos, EEUU	Integrado
DYNASMART	Universidad de Austin Texas, EEUU	Integrado
INTEGRATION	Universidad de Queens, Canadá	Integrado
METROPOLIS	Suecia	Integrado
TRANSMODELER	Corporación Caliper, EEUU	Integrado
VISSIM 8	Universidad de Karlsruhe, Alemania	Integrado

Fuente: elaboración propia con base en Jayakrishnan et al. (1994), Caliper Corparation (2015) y trabajos citados en Boxill & Yu (2000).

En países como Estados Unidos de América, Reino Unido, Alemania, Suecia, Francia, España, Países Bajos, Japón, Italia y Canadá, los simuladores de transporte han sido ampliamente estudiados; por lo general en las Universidades, instituciones, laboratorios y compañías privadas dedicadas a la investigación en el área como se muestra en Las Tabla 2-1, Tabla 2-2 y Tabla 2-3.

Algunos nacieron en el seno de las universidades y son comercializadas por compañías privadas especializadas, tal es el caso de VISUM y VISSIM, desarrollados en la Universidad de Karlsruhe y comercializados por PTV Group en Alemania.

Aplicaciones en Colombia

Muchas son las aplicaciones de estos modelos de simulación que van desde la programación semafórica de una intersección o una ciudad, valorización de obras viales, hasta el desarrollo de planes estratégicos de transporte de una ciudad, o del país.

En la Tabla 2-4 se mencionan algunas simulaciones que se han ejecutado en Colombia para diferentes fines:

Tabla 2-4: Algunas ciudades de Colombia en las que se han utilizados simuladores de redes de transporte.

Fuente	Ciudad de aplicación	Simulador	Estudio
Citado por Suárez Castaño(2007)	Medellín	TRANSIT-7F y NETSIM	Optimización de la red semafórica de Colombia.
Citado por Suárez Castaño(2007)	Popayán y Cali	PARE	Análisis de intersecciones a prioridad.
Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2007)	Medellín	EMME/2	Plan maestro de movilidad para la región del Valle de Aburrá
Steer Daves Gleave (2011)	Medellín	VISSIM	Estudio de accesibilidad y movilidad para la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
FONVAL (2012)	Medellín	EMME/2 y VISSIM	Variación de accesibilidad y movilidad en el poblado por obras de valorización
Universidad Pedagógica y Tecnolólgica de Colombia (2012)	Tunja	TRANSCAD	Herramienta de transporte terrestre urbano de pasajeros y carga. Simulación del efecto de proyectos de infraestructura y políticas de transporte. D. Modelo de Transporte
Roda et al. (2012)	Barranquilla, Bogotá, Bucaramanga, Cali, Cartagena, Cúcuta, Ipiales, Medellín, Santa Marta	TRANSCAD	Conectividad Interurbana
Universidad Nacional de Colombia & Quibdó Centro Mundial de la Biodiversidad(2013)	Quibdó	TRANSCAD	Plan integral de movilidad del municipio de Quibdó, Chocó
TPD (2014)	Medellín	VISUM Y VISSIM	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 supermanzanas.
Solarte (2015)	Medellín	VISUM	Variación del nivel de servicio de las vías urbanas en una zona con tarifa de cobro por congestión para autos particulares

Fuente: elaboración propia

Los estudios mencionados en la Tabla 2-4 permitieron modelar diferentes escenarios como en el caso de FONVAL (2012) y TPD (2014). En el primer estudio se simuló el escenario de congestión en 2012 y luego el cambio en los tiempos de viaje al

implementar obras de infraestructura vial en las principales intersecciones en el Poblado, se simuló las obras y se cotejaron los resultados. En el segundo estudio se simularon escenarios para el centro de Medellín en diferentes periodos de tiempo, con el objetivo de comprobar el impacto que tendría la peatonalización de algunas vías. En ambos casos la finalidad es observar el cambio que ocurre en las vías al aplicar una u otra alternativa de intervención vial.

2.6 Congestión y Demoras

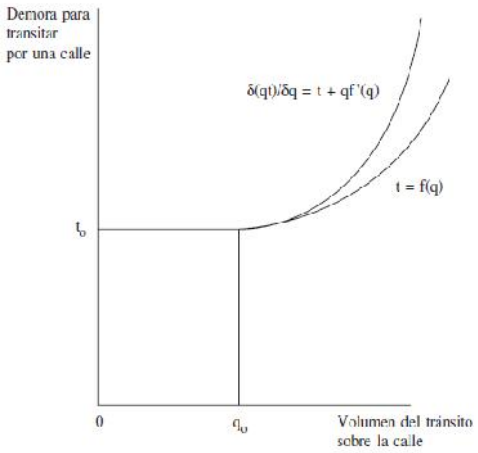
La congestión y las demoras son conceptos que están íntimamente ligados, ya que debido a los problemas de congestión se experimentan demoras en la circulación vehicular.

Se dice entonces que: *"La congestión es la condición que prevalece si la introducción de un vehículo en un flujo de tránsito aumenta el tiempo de viaje de los demás".* (Thomson & Bull, 2002)

El efecto de congestión se produce cuando los vehículos en una vía pierden cierta libertad en su desplazamiento, experimentan demoras y disminución en la velocidad a flujo libre. Se dice que cuando la relación volumen/capacidad o v/c es cercano a 1, se comienza a experimentar demoras en el tránsito, cuando llega a uno, se dice que está a capacidad y cuando es mayor que 1 la vía está saturada y en estado caótico. Inicialmente todas las vías se construyen para cierta cantidad de vehículos, pero con el paso del tiempo, la población crece y por ende el parque automotor con ella, y por consiguiente la circulación de vehículos sobre las vías, y al no tener ningún control sobre este crecimiento las vías colapsan.

En la Figura 2-4, dos funciones son presentadas, éstas son analizadas desde el punto de vista de la teoría económica. La curva inferior es el tiempo de viaje que experimentan los usuarios de una calle, este tiempo depende del volumen vehicular presente. La curva superior es la derivada de la función anterior, en términos económicos se le conoce como costos marginales. Para el entorno que interesa aquí, la diferencia entre ambas curvas, se interpreta como el aumento en el tiempo de viaje que experimentan los conductores, por la incorporación de un vehículo, en otras palabras, por la congestión. (Thomson & Bull, 2002).

Figura 2-4. Esquema del concepto de la congestión de tránsito



Fuente: Thomson & Bull (2002)

2.7 Demoras evaluadas desde un micro simulador y un macro simulador

La finalidad de esta tesis es la comparación de los resultados de las demoras por la congestión, por medio del análisis de las teorías base de dos simuladores de transporte. El estudio se hará desde la perspectiva macroscópica y microscópica.

Para el enfoque macroscópico se utilizará el software VISUM cuya base teórica para el cálculo de las demoras son las conocidas funciones volumen-demora (VDF) y para el enfoque microscópico se hará uso del software VISSIM que hace uso de un modelo de seguimiento de vehículos para el cálculo de las demoras. En este apartado se hace una revisión general del funcionamiento de ambos simuladores y se detalla en estas teorías.

A la fecha de redacción de esta tesis las versiones que están siendo usadas para estos programas son: VISSIM 8 y VISUM 15. Cabe mencionar que para su desarrollo inicial se utilizaron las versiones 7 y 14 respectivamente.

2.8 VISSIM

Es un programa de micro simulación multimodal, es decir que simula el comportamiento individual de los vehículos tanto de transporte público (buses, tranvías, trenes, metro, etc.) como del transporte privado (vehículos livianos tipo auto, camiones, motocicletas y bicicletas), además simula la conducta de los peatones y su interacción con los modos mencionados al atravesar las calles en pasos de cebra.

El modelo utilizado como base para el desarrollo de VISSIM es producto de la tesis de investigación de doctorado de Widemann, en la Universidad de Karlsruhe, Alemania, en el año de 1974, en la que estudió el comportamiento psico-físico en el modelo de seguimiento de vehículos. Para que el simulador fuese explotado comercialmente sufrió una serie de ajustes y cambios que duró aproximadamente dos décadas. Fue en 1994 que se comercializó en Alemania por la compañía PTV AG y desde ese momento ha ido incorporando nuevas herramientas en pro de aproximaciones más reales. Ver Anoniou et al., (2010)

El modelo de VISSIM tiene dos componentes básicos:

- El modelo de tráfico que es desarrollado por el modelo de seguimiento de vehículos para modelar el comportamiento lateral y el cambio de carril.
- El generador de señales, en este se encuentra el modelo de reacción a la luz ámbar.

2.8.1 Modelo de Seguimiento de Vehículos de Widemann 74

Los modelos de seguimiento de vehículos han sido tema de estudio desde los años 50, Brackstone & McDonald (1999) hicieron una revisión de los modelos de seguimiento de vehículos estudiados hasta ese año. Además se tiene el modelo, (Del Castillo Granados, 1994). Estos autores evaluaron factores como la velocidad, aceleración, tiempos de viaje, distancia entre vehículos, agresividad de los conductores, percepción-reacción del conductor, etc. para intentar comprender el comportamiento de los conductores en la vía.

Para mayor detalle de estos modelos ver trabajos de los autores mostrados en la Tabla 2-5

Tabla 2-5: Modelos de seguimiento de vehículos

Fuente	Modelo
Gazis, Herman & Potts (1959)	Gazis-Herman-Rothery (GHR) Model
Kometani & Sasaki (1958)	Safety distance or collision avoidance models (CA)
Helly (1959)	Linear (Helly) models
Michaels (1963); Lee & Jones (1967); Wiedemann (1974)	Phyco-physical or point models (AP)
Kikuchi & Chakroborty (1992)	Fuzzy logic-based models
Del Castillo Granados (1994)	Un modelo de seguimiento de vehículos

Fuente: elaboración propia

Para mostrar el comportamiento de los vehículos en la red, VISSIM hace uso del modelo de seguimiento de vehículo (car-following) de Widemann, desarrollado en 1974 para vías urbanas. En 1999 se hicieron algunas modificaciones y se desarrolló el mismo modelo pero para autopistas. Se le llama de "seguimiento de vehículos", debido a que el modelo simula los vehículos uno atrás del otro, es decir, que siguen y son seguidos por otros en el mismo carril.

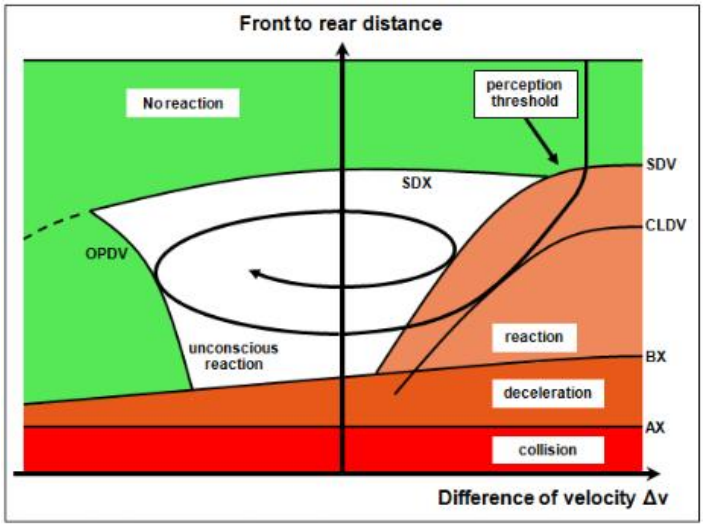
La unidad utilizada por el modelo es "driver-vehicle" esto es, "vehículo-conductor" con la cual VISSIM simula el flujo de tránsito en movimiento a través de una red. Hay una categoría de vehículo al cual se le asignan las características del comportamiento específico de cada uno los conductores de esa categoría.

Las características de cada unidad de "driver-vehicle" se encuentran discriminadas en tres categorías principales:

- Especificaciones técnicas del vehículo; tamaño, velocidad, potencial de aceleración, ubicación en la red, etc.
- Comportamiento del conductor, por ejemplo; psico-físicas del conductor (capacidad de tolerancia, y/o agresividad), memoria del conductor, habilidad para hacer maniobras (acelerar y desecelerar adecuadamente).
- Interdependencia de las unidades "Vehículo-conductor": liderar y/o seguir vehículos, permitiendo o haciendo maniobras de cambio de carril, señales de tráfico próximas y distancia a la intersección siguiente. Adaptado de (PTV Group, 2011).

Este modelo de comportamiento psico-físico del conductor se denomina de esta manera porque trata de emular la parte psicológica, aspectos de la personalidad del conductor (agresivo y no agresivo) y físico, por las percepciones que tiene el conductor, que le permiten ejecutar las diferente maniobras en las vías.

Figura 2-5. Diagrama del modelo psycho-physical de seguimiento de vehículos de acuerdo a Widemann 74



Fuente: PTV AG (2014)

En el eje de las abscisas se aprecia la diferencia de velocidad Δv, y en el eje de las ordenadas la variación de las distancias entre ellos Δx. Es importante mencionar que cuando Δv es positivo y se reduce, la distancia entre vehículos también se reduce. Ver Figura 2-5

La flecha negra que forma un espiral, indica el comportamiento que tiene un vehículo al alcanzar a otro. Los colores mostrados en el diagrama explican el proceso de seguimiento de vehículo, la percepción-reacción del conductor, mediante un grupo de umbrales (situaciones) que son observadas en el proceso de conducción.

La zona verde, es una zona de no reacción, es decir que el conductor va a su velocidad de flujo libre y no tiene ningún obstáculo en la vía, hasta que llega el momento en que percibe un obstáculo (otro vehículo) a una velocidad más baja, y su manera de conducir se ve modificada, en ese momento ingresa a la zona coral (naranja claro) y en ese momento comienza a disminuir su velocidad y por ende a acercarse al otro vehículo, claro está que este acercamiento se da en un menor ritmo que cuando el vehículo estaba en la zona verde. Finalmente el vehículo, en algunos lapsos adopta la velocidad del vehículo seguido, se dice que se mueven a una velocidad constante.

La zona blanca representa el comportamiento monótono del conductor, es decir que ya no tiene control absoluto de su velocidad, está limitada por el vehículo en frente. En esta zona se da el proceso iterativo de aceleración y deceleración.

La zona naranja es el área en la que se está ejecutando el seguimiento de vehículo, la velocidad es baja. Finalmente, la zona roja, es cuando el vehículo se encuentra en situación de emergencia, generalmente es ocasionada por conductores agresivos, cuya tendencia es a subestimar las pequeñas distancias. Los umbrales de percepción del conductor son mostrados en la Tabla 2-6.

Tabla 2-6: Umbrales evaluados en el modelo de seguimiento de vehículos de Widemann 74

Umbral	Elemento evaluado
AX	Distancia estática deseada cuando los vehículos se encuentran uno tras otro
BX	Distancia dinámica, distancia de seguridad
CLDV	Percepción del umbral para reconocer diferencias de velocidades pequeñas en distancias cortas, decrecientes
SDV	Percepción del umbral de diferencias de velocidades en largas distancias
SDX	Percepción del umbral a una distancia cada vez mayor en el proceso de seguimiento
OPDV	Percepción del umbral para reconocer diferencias de velocidad pequeñas en distancias cortas pero crecientes

Fuente: elaboración propia con base en Wiedemann (1974)

2.8.2 Movimiento lateral

El movimiento lateral en VISSIM está estructurado con base en la selección del carril, cambio de carril y movimiento lateral continuo dentro de un carril.

Selección del carril

Cuando un conductor durante su recorrido, se encuentra a una distancia larga de la siguiente intersección, no tiene conocimiento de la necesidad de cambiar de carril, opta por el carril que le da mejores condiciones para llegar más rápido. Para visualizar este proceso, se hacen tres pruebas:

- El conductor se mueve en un carril determinado y decide si se quiere quedar en ese carril.
- Evalúa la situación de los carriles aledaños, comprueba que la situación aguas abajo, de esos carriles es mejor que la de él.
- Si el carril en el que está, está congestionado, evalúa si es posible cambiarse sin afectar a los vehículos que le siguen.

Cambio de carril

VISSIM tiene dos tipos de carril, el libre y el necesario. En el libre el conductor tiene la posibilidad de cambiarse de carril para aumentar su velocidad. El necesario es el ocupado por los vehículos que necesitan hacer giros en las intersecciones o incorporarse al carril adecuado para realizar su movimiento.

Para ejecutar el cambio de carril en ambos casos, es preciso tener en cuenta el espacio disponible para realizar el movimiento y la aceleración, esta última debe ser balanceada, de manera que al ejecutar la maniobra, evite golpear el vehículo de enfrente o ser golpeado por el vehículo precedente.

Movimiento lateral continúo

El conductor se mueve lateralmente tomando en cuenta su posición, su velocidad, la longitud del vehículo y la de los vehículos que sigue y de los que es seguido. La

aceleración de los vehículos que interactúan en el movimiento lateral de un vehículo, es considerado en el modelo de seguimiento de vehículos por medio del estudio de las distancias de seguridad. El modelo calcula estas distancias para cada vehículo en esa interacción y permite este movimiento en el momento indicado, evitando que el auto colisione con alguno de los vehículos a su alrededor (Anoniou et al., 2010).

2.8.3 Controlador de semaforización o controlador de señales

Este modelo se centra en el análisis del vehículo que se encuentra frente a un semáforo que tiene luz ámbar en el momento que llega a la intersección, asimismo la reducción de la distancia de seguridad cuando el vehículo se encuentra cerca de una señal de “PARE”.

2.8.4 Demoras en VISSIM

Las demoras en VISSIM son evaluadas tomando en consideración factores como el tiempo teórico de conducción y el tiempo ideal. Son analizadas unos seis tipos de demoras: demoras totales, demoras latentes, demoras promedio, demoras de parada, demoras de parada promedio y demoras por vehículo.

Los umbrales de percepción señalados en el modelo de seguimiento de vehículo son considerados para el análisis de las demoras estudiadas en VISSIM, ver Tabla 2-7. Existen otros factores que también son considerados, como el tiempo de servicio a los pasajeros en paraderos, estaciones de metro, tren y el de los estacionamientos reales, que también son considerados.

Tabla 2-7: Demoras evaluadas en VISSIM

Tipo de demora	Descripción
Time in network (total) Tiempo total en la red	Es el tiempo de permanencia de un vehículo en la red contado desde el momento que ingresa hasta que sale, el valor guardado es el del último segundo antes de que salga de la red.
Delay time Tiempo de demora	Diferencia óptima entre el tiempo de conducción teórico y el ideal de un vehículo.
Travel time (total) Tiempo total de viaje	Tiempo total de viaje de todos los vehículos que están en la red o los que han salido.
Delay (total) Demora total	Es la demora total de todos los vehículos que están en la red y los que han salidos de ella. Ocurre cuando la velocidad real es inferior a la velocidad deseada. $Demora_{total} = \frac{dist_{real_rec}}{tiempo} - vel.deseada$ Dónde: el tiempo, es el lapso que los vehículos utilizaron en recorrer esa distancia total, de igual manera la velocidad deseada en ese lapso. Estas demoras consideran, el tiempo de parada en las señales de

Tipo de demora	Descripción
	Pare y la demora cuando los vehículos paran, sin embargo, no considera el tiempo de los buses en los paraderos y estaciones.
Delay (latent) Demora latente	Es la demora total de los vehículos que no pudieron ingresar a la red.
Delay average Demora promedio	Demora promedio por vehículo: Demora total/(#de vehículos en la red+ # de vehículos que ingresan a la red)
Delay stopped (total) Demora totales de parada	Demora total de parada de los vehículos que están en la red o están ingresando. Demora de parada = tiempo en el que el vehículo está parado ocurre cuando la velocidad es igual a cero. Al igual que en las demoras totales no se considera el tiempo de espera de los buses en los paraderos y estaciones.
Delay stopped (average) Demora promedio de parada	Tiempo de parada media por vehículo Tiempo total de parada/(#de vehículos en la red+ # de vehículos que ingresan a la red)
VehDelay Demora de los vehículos	Promedio de demoras de todos los vehículos que pasan por el área que ha sido establecida para medir tales demoras. La demora de un vehículo se calcula de la siguiente manera viaje: $Demora_{veh} = T_{real} - T_{ideal}$ Esta demora considera: zonas de reducción de velocidad y demoras debido al frenado.

Fuente: PTV AG (2014a)

De acuerdo a la Tabla 2-7, VISSIM estudia las demoras mediante la suma de diferentes parámetros que incluyen la relación de velocidad (teórica y real) con las distancias recorridas; tomando en cuenta que la velocidad teórica ocurriría si en su viaje no encuentra ningún tipo de obstáculo (congestión, intersecciones semaforizadas, etc.) y la real es la que se ve afectada por la geometría de la vía y las señales.

2.8.5 Tiempo de viaje calculado en VISSIM

El tiempo de viaje en este simulador cuando utiliza asignación dinámica utiliza dos métodos iterativos: (1) Método de factor exponencial suavizado y (2) el método de promedios sucesivos (MSA). Cada uno es elegido de acuerdo a la importancia que se le dé al tiempo de viaje en las corridas. El primero es utilizado cuando el tiempo tiene menor peso, caso contrario en el segundo.

Método de factor exponencial suavizado

$$T_i^{n,k} = 1 - \alpha \, . T_i^{n-1,k} + \alpha . TO_i^{n,k} \quad (2.1)$$

Donde:

k: Índice del intervalo de evaluación dentro del tiempo de simulación

n: Índice de iteración

i: Índice de los arcos

$TO_i^{n,k}$: Medición (observada). Tiempo de viajar en el borde i para el intervalo k en la iteración n.

$T_i^{n,k}$: Tiempo de viaje de viaje en el borde i para el intervalo k en la iteración n

α: Factor constante de suavizado.

Método de promedios sucesivos (MSA)

$$T_i^{n,k} = 1 - \frac{1}{N+n} \, . T_i^{n-1,k} + \frac{1}{N+n} . TO_i^{n,k} \quad (2.2)$$

Donde:

N: Valor definido por el usuario

k: Índice del intervalo de evaluación dentro del tiempo de simulación

n: Índice de iteración

i: Índice de los arcos

$TO_i^{n,k}$: Medición (observada). Tiempo de viajar en el borde i para el intervalo k en la iteración n.

$T_i^{n,k}$: Tiempo de viaje de viaje en el borde i para el intervalo k en la iteración n

$\frac{1}{N+n}$: Factor de suavizado variable a partir de parámetros N y el índice de iteración

2.9 VISUM

Es una plataforma de macro simulación que permite modelar tanto transporte público como transporte privado en un solo modelo de red, aunque en corridas separadas. El modelo fue desarrollado por la Universidad de Karlsruhe, Alemania durante los años 1980 y comercializado por PTV AG.

Cuando se requiere hacer planeación del transporte público de una ciudad, construcción y desarrollo de vías, planes maestros de transporte, análisis de ingeniería de tránsito y análisis de eficiencias económicas, VISUM es una herramienta que proporciona

resultados descriptivos que ayudan al modelador a mostrar qué tan eficiente sería implementar alternativas para los planteamientos mostrados.

Un modelo de transporte consiste de un modelo de demanda, un modelo de red y varios modelos de impacto.

La **demanda** de viajes en una zona de estudio está contenida en las matrices Origen-Destino. Estas permiten calcular los flujos vehiculares en los diferentes modos entre zonas. VISUM tiene la opción de evaluar esta demanda a través del modelo clásico de transporte, el modelo EVA y el modelo basado en toures.

- Modelo de 4 etapas, fue explicado en la sección 2.2
- El modelo EVA, es un modelo desarrollado por Lohse et al. (1997) en la Universidad Técnica de Drese, Alemania, con el objetivo de analizar la demanda de pasajeros en un macro simulador, puede ser aplicado tanto en el modelo de cuatro etapas como en el modelo basado en toures.
- Modelo basado en toures: es un modelo desagregado que permite al modelador incluir en su simulación datos socio-demográficos y temas de políticas de tráfico. Este modelo calcula tres unidades de trabajo: (1) Generación de viajes (análisis de viajes del hogar); (2) distribución de viajes (determinación de viajes destino); (3) elección modal, analiza las tres primeras etapas de modelo clásico. En el modelo son calculadas individualmente pero entrelazadas; especialmente los pasos 2 y 3, son llevados a cabo simultáneamente en un solo procedimiento. En la evaluación de estas tres fases del modelo basado en toures aparecen dos conceptos importantes: los viajes en cadena y el comportamiento homogéneo de los usuarios (por ejemplo: empleados con y sin auto, estudiantes, etc).

El **modelo de red:** en éste se almacena la oferta de transporte disponible. Está compuesto de las zonas de análisis de transporte, nodos, paraderos de transporte público, arcos representados en las calles y rieles, y las líneas de transporte público con sus intervalos de salida.

Los **modelos de impacto:** utilizan las salidas de los modelos de demanda y el modelo de red. VISUM muestra varios modelos de impacto en la oferta de transporte, es decir que evalúa cómo interactúan los modelos de usuarios de transporte público (PuT) con los usuarios de transporte privado (PrT).

Los resultados son mostrados gráficamente por medio de líneas de diferentes colores y grosores, es decir, que al asignar el flujo de tráfico y calcular parámetros de velocidad y tiempo de viaje, es fácil determinar cuáles son las vías con mayor flujo vehicular con sus velocidades y tiempos de viaje (PTV AG, 2014b).

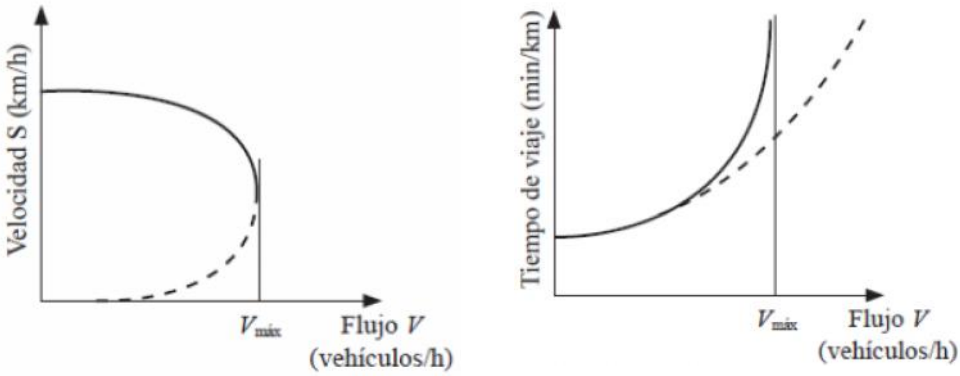
2.9.1 Funciones Volumen-Demora

La teoría que utiliza VISUM para la evaluación de las demoras en el tráfico urbano, son las funciones volumen demora, en esta sección se hace una revisión general de estas funciones y específicamente las utilizadas por este software.

Conocidas también como función flujo-demora (VDF, por sus siglas en inglés de *Volume Delay Function*), representan la relación de volumen de tránsito de una vía con las demoras experimentadas por los vehículos al transitar por ella. También se conocen como funciones Volumen-velocidad, que representan la velocidad contra el flujo de la vía. El análisis de estas curvas y su comportamiento fue desarrollado inicialmente para

tramos sin interrupción de ningún tipo, y luego fueron adaptadas para flujo interrumpido, pero para eso el software introduce las demoras a partir de los coeficientes de la ecuación, pero sigue asignando el flujo como si fuera continuo.

Figura 2-6. Relación típica volumen-velocidad y volumen-demora para arcos largos.



Fuente: J. de D. Ortúzar & Willumsen (2008)

La velocidad se ve afectada por el incremento del flujo en la vía, a mayor flujo menor velocidad, cuando el volumen vehicular llega a su capacidad, la velocidad disminuye, al punto de condicionar el movimiento de los vehículos, para el caso de la Figura 2-6 de la izquierda. Análogamente sucede con la figura de la derecha, pero que igual condiciona la libre circulación, pues a mayor flujo, mayor tiempo de viaje. Sin embargo, cuando el flujo supera la capacidad, cuando no hay movimiento, este tiempo de viaje es inestable.

El tipo de función analizada en esta investigación son las de flujo-demora. La comunidad académica ha hecho aportes valiosos en la experimentación tanto empírica como científica en busca de la tan ansiada solución al problema de flujos inestables, en el área después de que la relación v/c<>1, es decir, la región de congestión.

Estas curvas VDF, han sido ampliamente analizadas desde los años 60's, tomando en cuenta diferentes enfoques: el efecto de congestión, tráfico homogéneo, tráfico heterogéneo, diferentes tipos de usuarios, etc.; estos aspectos influyen de manera significativa en el comportamiento de la corriente vehicular y por ende los resultados varían acorde al enfoque utilizado.

Generalmente estas funciones son representadas como una multiplicación del tiempo de viaje a flujo libre por una función de flujos dividida entre la capacidad. A continuación se muestra la ecuación general de estas funciones:

$$t = t_0 . f \ \frac{v}{c} \tag{2.3}$$

Donde:

t: Tiempo de viaje en el arco para un volumen determinado de vehículos

t_0: Tiempo de viaje a flujo libre

v: Volumen en el arco

C: Capacidad de la vía (esta capacidad se puede definir hasta un límite práctico)

De acuerdo a Ortúzar & Willumsen (2011) y Spiess (1990) toda función volumen-demora debe tener las siguientes características:

- Los tiempos de viaje modelados deben ser cercanos a la realidad
- Debe ser continua y diferenciable
- $f\ \frac{v}{C}$ Debe ser creciente y de comportamiento monótona, ya que la asignación debe converger a una solución única.
- La función debe tener pocos parámetros y bien definidos.
- Cuando el flujo en la vía está llegando a la capacidad, el tiempo de viaje no debe ser infinito, en otras palabras, debe tener un valor elevado, pero no infinito, los usuarios independientemente de la congestión presente, siempre llegarán a su destino.
- En la ingeniería de tráfico hay parámetros estándares como la velocidad a flujo libre, capacidad y número de intersecciones por km que por sus características permiten que la relación flujo-demora sea fácil de transferir de un contexto a otro.

Estas funciones generalmente dependen de parámetros que deben ser calibrados para realizar la asignación, como se verá más adelante. Determinar el valor adecuado que deben tener estos parámetros se vuelve un trabajo tedioso para el modelador.

Investigadores como Branston (1976) y Spiess (1990), hicieron análisis de las funciones de este tipo que ya existían, con el fin de mostrar los problemas que surgen cuando se tienen que calibrar los parámetros , para hacer la asignación.

La revisión realizada por Branston (1976) muestra algunas inconsistencias de las VDF analizadas hasta ese momento (1961-1976), estas debilidades estaban relacionadas con el área de observación que da origen al estudio y la suposición de que las demoras de arcos adyacentes al analizado, no influyen sobre este. Por su parte Spiess (1990) hace un análisis detallado de las funciones VDF propuesta por la Bureau of Public Roads (BPR por sus siglas en inglés) y prueba que uno de los parámetros (β), cuando sus valores son altos, el tiempo de viaje se vuelve infinito, lo cual no es cierto en la realidad; por muy caótica que sea la congestión en una vía, los conductores salen de esta y llegan a su destino.

De igual manera pueden verse los trabajos de Castillo et al. (2013) que proponen una nueva familia de funciones volumen-demora, tomando como base la función BPR y adicionando una función normal acumulativa, analizando para diferentes clases de usuarios y de Si et al. (2008) proponen una derivación de las funciones flujo demora para tráfico heterogéneo (básicamente vehículos livianos, buses y bicicletas) en Beijing, en ésta convierten el volumen de cada clase en unidades equivalentes de bicicletas, como lo tienen establecidos en sus regulaciones nacionales.

Por su facilidad de uso, las funciones de la Tabla 2-8 son las más utilizadas, sin embargo no son únicas, las primeras investigaciones en esta rama fueron hechas por Irwin et al. (1961), Smulick (1961), Mosher Jr (1963), Soltman (1966), Steenbrink (1974), entre otras.

Tabla 2-8: Funciones flujo-demora más conocidas

Fuente	Ecuación	
Bureau of Public Roads (1964)	$t = t_0\ 1 + \alpha\ x^{\beta}$ Dónde: α y β son parámetros a calibrar x la relación volumen/capacidad (v/c)	(2.4)
Spiess (1990)	$f\ x = 2 + \sqrt{\alpha^2\ 1 - x^{\ 2} + \beta^2} - \alpha\ 1 - x\ - \beta$ Dónde: α parámetro a calibrar $\beta = \frac{2\alpha - 1}{2\alpha - 2}$ x la relación volumen/capacidad (v/c)	(2.5)
Akçelik (1991)	$t = t_0\ 0.25T\quad x - 1\ + \sqrt{x - 1^{\ 2} + \frac{8J_A}{CjT}x}$ Dónde: T periodo de modelación, típicamente una hora C_j capacidad de la intersección J_A parámetro de demora; puede tomar valores entre 0.1 (autopistas) y 1.6 (vías menos importantes) $x = {}^{v}\ {}_{C_j}$ grado de saturación	(2.6)
Davidson (1966)	$t\ v = t_0\ 1 + k\ \frac{v}{q - v}$ Donde: k: Parámetro que toma un valor entre 0.01 y 0.5, dependiendo del tipo de carretera (urbana o autopista). v: es el volumen de la vía q: es la capacidad de la vía	(2.7)
Overgaard (1967)	$t = t_0\alpha^{\ v}\ q^{\ \beta}$ α y β son parámetros a calibrar	(2.8)

Fuente	Ecuación
	v: es el volumen de la vía q: es la capacidad de la vía
Para todas la ecuaciones anteriores: t: tiempo total de viaje t_0: tiempo de viaje a flujo libre	

Fuente: elaboración propia

Las funciones mostradas en la

Tabla 2-8 fueron estudiadas para tráfico homogéneo, es decir que los vehículos son analizados como Autos Directos Equivalentes (ADEs); donde un vehículo liviano es tomado como unidad, el resto de vehículos son calculados multiplicando por factores de conversión, eg. En Bogotá, Colombia utilizan 1 para vehículos livianos y taxis, 2 para buses, 2.5 camiones, 0.5 para motos y 0.3 para las bicicletas.

A continuación, en la Tabla 2-9 se observan las funciones volumen-demora que pueden ser utilizadas en VISUM, para la asignación.

Tabla 2-9: Funciones flujo-demora utilizadas en VISUM

Nombre	Ecuación	
BPR	$t_{cur} = t_0 . \ 1 + a.sat^b$	(2.9)
BPR 2	$t_{cur} = \begin{cases} t_0 . \ 1 + a.sat^b , & sat \leq sat_{crit} \\ t_0 . \ 1 + a.sat^{b'} , & sat > sat_{crit} \end{cases}$	(2.10)
BPR 3	$t_{cur} = \begin{cases} t_0 . \ 1 + a.sat^b , & sat \leq sat_{crit} \\ t_0 . \ 1 + a.sat^b + q - q_{max} . d, & sat > sat_{crit} \end{cases}$	(2.11)
Cónica	$t_{cur} = t_0 . \ 2 + \overline{a^2 . \ 1 - sat^{\ 2} + b^2} - a . \ 1 - sat - b$ Donde: $b = \frac{2a - 1}{2a - 2}$	(2.12)

Nombre	Ecuación	
Cónica Marginal	$t_{cur} = t_0.\ 2 + \frac{a^2\ 1 - sat\ \ 1 - 2.sat\ + b^2}{a^2.\ 1 - sat\ ^2 + b^2} - a.\ 1 - 2.sat\ - b$ Donde: $b = \frac{2a - 1}{2a - 2}$	(2.13)
Exponencial	$t_{cur} = \begin{cases} t_0 + \frac{e^{a.sat}}{b}, & sat \leq sat_{crit} \\ t_0 + \frac{e^{a.sat}}{b} + d.\ sat - sat_{crit}\ , & sat > sat_{crit} \end{cases}$	(2.14)
INRETS	$t_{cur} = \begin{cases} t_0.\frac{1.1 - a.sat}{1.1 - sat}, & sat \leq sat_{crit} \\ t_0.\frac{1.1 - a}{0.1}.sat^2, & sat > sat_{crit} \end{cases}$	(2.15)
Constante	$t_{cur} = t_0$	(2.16)
Lohse	$t_{cur} = \begin{cases} t_0.\ 1 + a.sat^b\ , & sat \leq sat_{crit} \\ t_0.\ 1 + a.\ sat_{crit}\ ^b + a.b.t_0\ sat_{crit}\ ^{b-1}.\ sat - sat_{crit}\ , & sat > sat_{crit} \end{cases}$	(2.17)
Linear bottle-neck	$t_{cur} = \begin{cases} t_0, & sat \leq sat_{crit} \\ 3600.sat, & sat > sat_{crit} \end{cases}$ $sat_{crit} = \frac{t_0}{3600}$	(2.18)

- $a\ y\ b$: parámetros a calibrar
- $sat = \frac{q}{q_{max}.c}$: relación volumen capacidad en condiciones de saturación, esa saturación es

Nombre	Ecuación	
	función de c, entre más pequeño su valor, mayor es la saturación. • q_{max}: Capacidad máxima de la vía (vehículos/intervalo de tiempo) • sat_{crit}: Grado de saturación en el que comienza la sección lineal de la función volumen-demora • t_{cur}: Tiempo de viaje actual *(current)* de un vehículo en la red cargada (s) • t_0: Tiempo de viaje de un vehículo con tiempo a flujo libre (s) • q: Volumen actual de la vía	

Fuente: elaboración propia con base en (PTV AG, 2014b)

Por otra parte, VISUM también evalúa las funciones de impedancia con respecto a las demoras en los giros y nodos, estas funciones son mostradas en la Tabla 2-10.

Tabla 2-10: Funciones de impedancia utilizadas en VISUM

Nombre	Ecuación	
Logística	$t_{cur} = t_0 + \frac{a}{1 + f.e^{\,b-d.sat}}$	(2.19)
Cuadrática	$t_{cur} = t_0 + a + b.sat + d.sat^2$	(2.20)
SIMOIDAL_MMF_NODES	$t_{cur} = t_0 + \frac{a.b + d.sat^f}{b + sat^f}$	(2.21)
SIMOIDAL_MMF_LINKS	$t_{cur} = t_0 \frac{a.b + d.sat^f}{b + sat^f}$	(2.22)
TMODEL_ARCOS	$t_{cur} = \begin{cases} t_0 + a\ .\ 1 + d.\ sat + f^{\ b}, & sat \leq sat_{crit} \\ t_0 + a'\ .\ 1 + d'.\ sat + f'^{\ b'}, & sat > sat_{crit} \end{cases}$	(2.23)
TMODEL_NODOS	$t_{cur} = \begin{cases} t_0 + a\ +\ 1 + d.\ sat + f^{\ b}, & sat \leq sat_{crit} \\ t_0 + a'\ .\ 1 + d'.\ sat + f'^{\ b'}, & sat > sat_{crit} \end{cases}$ Donde a, a´, d y d' son parámetros a calibrar	(2.24)
Akçelik 1	$t_{cur} = t_0 + \frac{3600}{4}.a.\ \ sat - 1\ + \sqrt{sat - 1^{\ 2} + \frac{8.b.sat}{d.a}}$ Dónde: a: duración (h)	(2.25)

Nombre	Ecuación	
	b: parámetro a calibrar d: capacidad del carril por hora	
Akçelik 2	$t_{cur} = 3600.lengt. \frac{1}{v_0} + \frac{a}{4}. \quad sat - 1 + \sqrt{sat - 1^2 + \frac{8.b.sat}{d.a.q_{max}}}$ Dónde: a: duración (h) b: parámetro a calibrar d: 1/cantidad de carriles	(2.26)

Fuente: elaboración propia con base en PTV AG (2014b)

Para las funciones apreciadas en la Tabla 2-9 y Tabla 2-10 el t_0 puede determinarse para la longitud del arco y la velocidad a flujo libre, para giros y nodos. Generalmente en los nodos y giros se les conoce como impedancia.

2.9.2 Calibración de parámetros de las funciones VDF

Uno de los mayores problemas al momento de asignar flujos en la red por medio de la simulación macroscópica es cuando el modelador se encuentra con los parámetros de calibración *e.g.* α y β en las funciones BPR. No hay una metodología o una función que determine de manera directa estos parámetros que apliquen a cada tramo analizado. Esto trae como consecuencias imprecisiones en los resultados de las simulaciones.

Las condiciones del tráfico varia de país a país, de ciudad a ciudad, etc., no es lo mismo conducir un auto en un país desarrollado que en uno en vías de desarrollo, muchas cosas cambian, la infraestructura vial aprovechable y la calidad de esta infraestructura se ve superada por la implementación de tecnología de punta en su construcción y mantenimiento, el comportamiento de los conductores y las políticas para regular la congestión no tienen el mismo grado de efectividad (Pozueta E., 2008).

Por esto, los investigadores se han motivado a realizar estudios para encontrar los parámetros específicos de las curvas flujo-demora para las condiciones imperantes en cada ciudad, por tipo de vía, diferentes velocidades y distintos tipos de vehículos. A continuación se mencionan estudios realizados en diferentes ciudades:

- En EEUU, cuando las funciones BPR fueron propuestas por la desaparecida Oficina Pública de Carreteras (BPR por sus siglas en inglés) hoy en día FHWA, se tomaron como valores estándar $\alpha = 0.15$ y $\beta = 4.00$, con el objetivo de que la capacidad de las vías tuviera nivel de servicio mínimo C (LOS C) al ser diseñada. Esta es una consideración en las primeras ediciones del HCM. Estos valores han sido tomados como valores por defecto en los simuladores macroscópicos. Sin embargo la misma FHWA hizo una comparación de tres funciones VDF (BPR, Spiess y Overgaard) y encontró los parámetros α y β para autopistas y carreteras multicarriles con velocidades variables.

Una comparación de los valores de α y β analizados por la FHWA, para autopistas y vías multicarriles son mostrados en la Tabla 2-11.

Tabla 2-11: Valores de α y β encontrados por la FHWA

Tipo de vía	Velocidad (km/h)	Función BPR		Función de Spiess	Función de Overgaard
		α	β	α	α
Autopistas	110	0.88	9.80	9.80	9.00
	95	0.83	5.50	8.50	4.50
	80	0.56	3.60	7.50	3.30
Multicarril	110	1.00	5.40	7.10	4.30
	95	0.83	2.70	4.00	2.30
	80	0.71	2.10	4.00	1.90

Fuente: elaboración propia con base en FHWA (2014)

- Márquez et al. (2014) en Bogotá, Colombia encontraron el valor de α y β para 6 diferentes vías multicarriles, además compararon los valores estándar utilizados por la FHWA $\alpha = 0.15$ y $\beta = 4.00$ con la función Akçelik con J_A= 0.4.

Los resultados de las estimaciones de α y β obtenidos al evaluar 6 vías multicarriles en la ciudad de Bogotá son observados en la Tabla 2-12, las vías fueron caracterizadas por el sentido de circulación y para diferentes velocidades. En este mismo estudio se hizo una comparación de los ajustes de estas funciones aplicando los valores encontrados para α y β, con los que se utilizan por definición y con la función de Akçelik J_A. La función que mejor se ajustó fue la BPR.

Tabla 2-12: Valores de α y β analizadas para carreteras multicarriles en Bogotá.

Tramo	Velocidad (km/h)	Función BPR		Función de Spiess
		α	β	α
1	104	1.08	2.79	3.09
2	97	1.23	3.18	3.90
3	77	0.50	2.38	-
4	72	0.92	3.10	2.99
5	82	0.47	2.29	-
6	78	0.76	3.14	3.22
7	81	0.87	2.44	2.62
8	80	0.85	2.10	2.59
9	99	1.03	3.51	3.97
10	98	1.39	3.43	4.78
11	87	0.84	2.19	2.91
12	76	0.86	2.30	2.03

Fuente: Márquez et al. (2014)

- Con el objetivo de encontrar los valores de los parámetros de calibración α y β Suh et al. (1990) evaluaron 25 zonas OD en Seúl, calibrando para los niveles de servicio C,

D y E de las vías de estas zonas, los valores iniciales (valores semilla) tomados para el estudio son $\alpha = 0.15$ y β=4 de las BPR y $\alpha = 2.62$ y $\beta = 5$ encontrados en el estudio previo hecho por Steenbrink (1974), los resultados de los valores para α y β son mostrados en la Tabla 2-13. En este análisis se concluyó que los mejores valores para Corea son $\alpha = 2.72$ y β=6.

Tabla 2-13: Valores de α y β evaluados en Seúl, Corea de acuerdo al nivel de servicio de las vías

Función BPR			
Valor Inicial	Nivel de Servicio	Parámetro	Valor
$\alpha = 0.15$, $\beta = 4$	LOS D	α =	0.45
		β =	7.00
	LOS C	α =	0.41
		β =	7.21
	LOS E	α =	1.65
		β =	9.00
$\alpha = 2.62$, $\beta = 5$	LOS D	α =	2.72
		β =	6.00
	LOS C	α =	2.7
		β =	6.00
	LOS E	α =	2.92
		β =	2.00

Fuente: Suh et al. (1990)

- Un algoritmo bi-nivel similar al caso anterior fue formulado por Lim, et al. (2007) en un contexto hipotético, tomando como base la función BPR, el algoritmo consistió en encontrar valores óptimos de α y β (α^* y β^*) para los arcos, estos valores convergen cuando $\alpha = 0.15$ y β=4 después de haberlos usado como valores semilla que fueron los de la izquierda en la Tabla 2-14 (valores iniciales) y los de convergencia, los óptimos de la derecha.

Tabla 2-14: Valores de α y β estudiados en Corea

Arcos observados	Valores Iniciales		Valores óptimos	
	α	β	α	β
4 arcos observados	0.10	3.50	0.06	4.66
	0.18	3.50	0.17	3.62
	0.12	4.30	0.12	4.43
8 arcos observados	0.10	3.50	0.04	4.47
	0.18	3.50	0.17	3.56
	0.12	4.30	0.12	4.31
14 arcos observados	0.10	3.50	0.06	4.26
	0.18	3.50	0.17	3.54
	0.12	4.30	0.12	4.31

Fuente: Lim et al. (2007)

Los estudios anteriores tienen en común el hecho de que toman los parámetros $\alpha = 0.15$ y $\beta = 4$ propuestos inicialmente por la BPR, sin embargo la forma de encontrar estos valores en cada ciudad es diferente. Por tal razón se muestra la Tabla 2-15 considerando el rango encontrado para cada ciudad.

Tabla 2-15: Resumen de Valores de α y β analizados en diferentes ciudades.

Ubicación	Función BPR				Función Cónica		Función Overgaard		Fuente
	α		β		α		α		
	Desde	Hasta	Desde	Hasta	Desde	Hasta	Desde	Hasta	
Bogotá, Colombia	0.5	1.4	2.1	3.5	2.0	4.8	-	-	Márquez et al. (2015)
Medellín, Colombia	1.7	2.9	1.2	2.4	-	-	-	-	Área Metropolitana del Valle de Aburrá, (2007)
Seúl, Corea	0.4	2.9	2.0	9.0	-	-	-	-	Suh et al. (1990)
Estados Unidos	0.6	1.0	2.1	9.8	4.0	9.8	1.9	9.0	FHWA (2014)

Fuente: elaboración propia

Todos los estudios mencionados en la Tabla 2-15 tienen en común la función BPR como base para sus análisis y sus parámetros por defecto; esto se debe a la facilidad en su manejo y que se acoplan mejor a las condiciones de cada sitio, e.g. en el estudio de Bogotá (Márquez et al., 2015) su línea de tendencia fue la que mejor se acomodó en la nube de puntos creada de los tiempos de viaje contra v/c; lo mismo pasó con FHWA (2014), donde su línea de tendencia es la que se aproximó con mayor exactitud a la del método analítico HCM. Sin embargo, esta función tiene deficiencias en esa tendencia cuando los valores de α son muy grandes (Spiess, 1990).

2.9.3 Relación entre teorías de los simuladores VISSIM y VISUM

Ambas teorías tienen en común que las demoras son calculadas de la sustracción del tiempo ideal de un tiempo real. El tiempo real es calculado de diferente forma en ambos simuladores, para el caso de VISSIM utiliza uno de los dos métodos explicados en el ítem 2.8.5 y en VISUM es calculado con las funciones VDF mostradas en el ítem 2.9.1

$$D_{VISSIM} = T_{real} - T_{ideal} \tag{2.27}$$

Donde:

T_{real} Tiempo real de viaje es un proceso iterativo; en la asignación dinámica utiliza los métodos, Método de promedios sucesivos MSA o el de factor exponencial suavizado

T_{ideal} Tiempo deseado de viaje; calculado con la longitud del arco entre velocidad inicial

$$D_{VISUM} = T_{cur} - T_0 \tag{2.28}$$

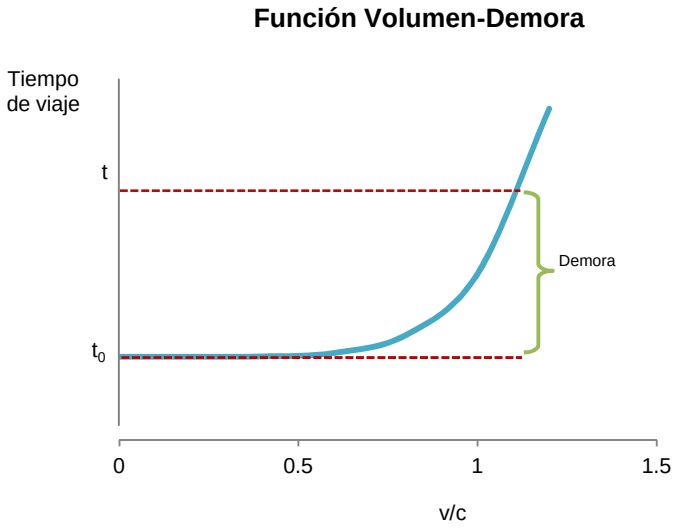
Donde:

T_{cur} Tiempo real: producto de la función VDF utilizada

T_0 Tiempo inicial/deseado: calculado con la longitud del arco entre velocidad inicial

El análisis de las demoras en este trabajo se tomará como se muestra en la Figura 2-7, restando al tiempo de viaje t el tiempo inicial t_0 el cual surge cuando la velocidad utilizada por los vehículos es la deseada, o sea, a flujo libre.

Figura 2-7. Concepto de las demoras en una curva VDF



Fuente: Elaboración propia

Aunque se nombren de diferente forma, el T_{real} de VISSIM equivale a T_{cur} en VISUM, por lo que hay una relación directa entre ambas teorías. Y el principio para el cálculo de las demoras es el mismo de acuerdo al ítem 2.9.3

3. ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Este capítulo incluye la información general que describe el área de análisis con su información secundaria extraída de una serie de estudios realizados en la ciudad de Medellín. Esta información es parte integral del montaje de la red vial en la zona de estudio. La información depurada y analizada alimentará los programas de simulación utilizados en esta investigación (VISUM y VISSIM). La información utilizada es mostrada en la Tabla 3-1, sin embargo, a lo largo del capítulo se ahondará en cada ítem.

Tabla 3-1: Resumen de información secundaria analizada para alimentar los simuladores

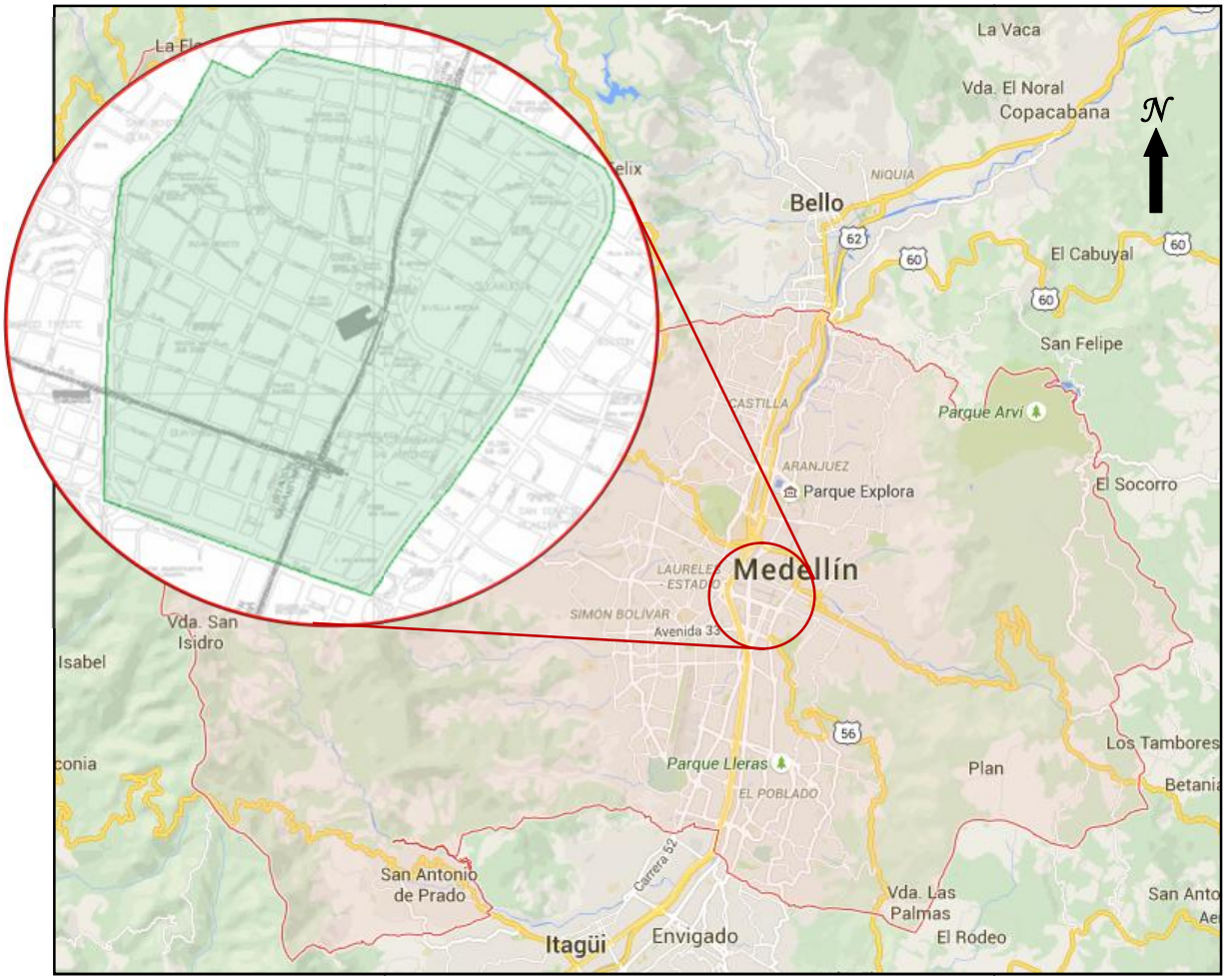
Información	Documento fuente
• Zonificación • Uso de Suelo	Encuesta origen y destino de hogares y de carga para el Valle de Aburrá.(Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2012).
• Características físicas (Geometría, señalización horizontal y vertical)	Google Maps, Street View y mapa aéreo de Medellín.
• Semaforización	Centro de Ingeniería y Operación Semafórica de la Secretaria de Movilidad de Medellín
• Aforos vehiculares • Acopios de Taxis • Acopios de camiones de carga • Inventario de Estacionamientos	Estudio de preinversión de movilidad para determinar la vialidad 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, ejecutado por la empresa TPD INGENIERIA S.A., (TPD, 2014)
• Rutas de buses • Ubicación de paraderos	Transporte Público de Medellín (TpMedellín)
• Matrices O/D para los modos autos, motos, camiones y buses.	Encuesta Origen-Destino a hogares del Valle de Aburrá (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2012)

Fuente: elaboración propia

3.1 Descripción y ubicación

El área elegida es parte del centro de la ciudad de Medellín, el cual se encuentra localizado sobre la coordenada Latitud 6° 15.051'N y Longitud 75° 34.088'O, su superficie es de aproximadamente 2.0 km^2, siendo la ciudad de 105 km^2 en su área urbana. La zona centro está delimitada por la Carrera 57 con Calle 58 al noreste conocida como "Glorieta la Minorista", Carrera 46 con calle 47A al noroeste, Carrera 57 con calle 44 al sureste llamada también "Glorieta de San Juan con Ferrocarril" y la intersección de la Carrera 46 con calle 44 "Ave. San Juan con Ave. Oriental" al suroeste. La Figura 3-1 muestra la ubicación de la zona objeto de estudio.

Figura 3-1. Localización de la zona de estudio



Fuente: elaboración propia con base en Google maps.

La zona elegida es la denominada "Zona Amarilla". El uso de suelo es en su mayoría comercial y ocurre con frecuencia que una gran cantidad de vehículos particulares se estacionan en la calle en espacios no permitidos. El sistema de transporte público de buses de la ciudad es un sistema radial, es decir, que todas las rutas se mueven del

barrio al centro y viceversa, con inadecuadas o inexistentes instalaciones para los paraderos de buses. Existen acopios de taxis, pero los vehículos de carga no cuentan con suficientes sitios de acopio. Aunque hay horarios para carga y descarga, el control es reducido. Hay presencia de vendedores ambulantes que invaden el espacio público. Todos estos son factores que convierten el centro en una de los sectores más cogestionados de la ciudad y por lo tanto el sitio idóneo para ejecutar un análisis de demoras.

El área utilizada para la simulación, deber tener un tamaño adecuado para ser analizada en los dos programas mencionados, debe ser lo suficientemente pequeña para ser modelada en el micro simulador y los suficientemente grande para que pueda ser simulada en el macro simulador. Por las características mencionadas y el tamaño del área del centro de Medellín (2.0 km^2 aproximadamente) se consideró apta para el análisis.

3.2 Zonificación y Uso de Suelo

3.2.1 Zonificación

El Valle de Aburrá, está dividido en 456 Zonas SIT (zonas del Sistema Integrado de Transporte) distribuidas en 29 macro zonas (comunas y corregimientos de Medellín y municipios aledaños a la ciudad) . Las zonas SIT han sido agrupadas tomando como base aspectos como la homogeneidad en el uso de suelo, montañas y afluentes de agua de cada sitio, puntos atractores de viajes, proyección de proyectos futuros, topografía, etc. El municipio de Medellín, está ubicado en el centro del Valle y está divido en 16 comunas, 5 corregimientos en los cuales están ubicadas 351 zonas SIT.

El sector en estudio es el centro de Medellín, el cual está ubicado en la macro zona o Comuna 10, llamada La Candelaria, la cual tiene 35 zonas SIT. Para las simulaciones estas son las zonas tomadas en consideración como zonas internas y que influyen directamente en el estudio. De igual manera se hizo una agrupación de zonas SIT denominadas "Grandes Zonas", con el fin de conocer la cantidad de viajes que se hacen de las zonas externas al centro de la ciudad. Las zonas internas de la Comuna La Candelaria son mostradas en Tabla 3-2.

Tabla 3-2: Zonas SIT de la comuna La Candelaria

Código alfanumérico SIT	Código SIT	Nombre de la zona SIT
1A	11	La Candelaria
1B	12	La Candelaria
2A	21	Jesús Nazareno
2B	22	Estación Villa
3	30	San Benito
4	40	Guayaquil
5	50	Guayaquil
6	60	Colón
7A	71	La Candelaria
7B	72	La Candelaria
8A	81	Villa Nueva

Código alfanumérico SIT	Código SIT	Nombre de la zona SIT
8B	82	Villa Nueva
9	90	Prado
10	100	Prado
11	110	Hospital San Vicente De Paul
12	120	Jesús Nazareno
13	130	El Chagualo
14A	141	San Benito
14B	142	San Benito
15A	151	Corazón De Jesús
15B	152	Corazón De Jesús
16A	161	La Alpujarra
16B	162	La Alpujarra
17	170	Centro Administrativo
18A	181	Calle Nueva
18B	182	Calle Nueva
19	190	Perpetuo Socorro
20	200	Colón
21	210	Las Palmas
22	220	Bombona # 1
23A	231	Boston
23B	232	Boston
24	240	Los Ángeles
51	510	San Diego
52	520	Perpetuo Socorro

Fuente: elaboración propia, con base en Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2012)

Las "Mega Zonas" son agrupaciones de macro zonas, creadas con el objetivo de simular los viajes externos a la zona centro, la Tabla 3-3 muestra las asociaciones correspondientes. En la macro simulación son utilizadas estas 35 zonas SIT y 9 "Mega Zonas" para la asignación del flujo vehicular, por lo tanto las matrices de viajes en VISUM constan de 44X44, es decir 44 filas (origen del viaje) y 44 columnas (destino del viaje).

Tabla 3-3: Códigos de las "Mega Zonas"

Nuevo Código	Macro zonas
4501	Popular
	Santa Cruz
	Manrique
	Aranjuez
4502	Castilla
	12 de Octubre
	Robledo
4503	Laureles-Estadio
	La América
	San Javier
4504	Guayabal

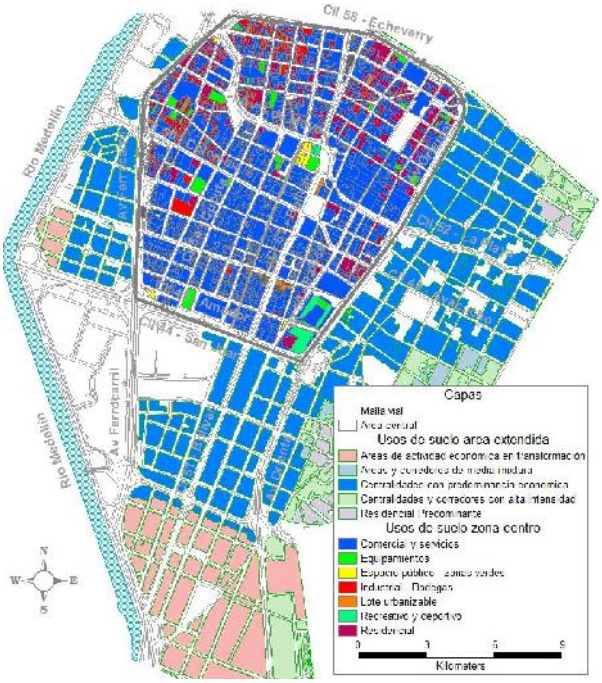
Nuevo Código	Macro zonas
	Belén
4505	El Poblado
4506	Buenos Aires
4507	Villa Hermosa
4508	Envigado
	Itagüí
	La Estrella
	Caldas
4509	Bello
	Copacabana
	Girardota
	Barbosa

Fuente: TPD (2014)

3.2.2 Uso de suelo

En el centro de Medellín están ubicados la mayoría de las oficinas de gobierno, parques, edificios, teatros, sitios de atracción para los turistas, de igual manera es una zona altamente comercial, convirtiéndola en un área atractora y generadora de viajes al resto de la ciudad. La Figura 3-2 muestra el uso de suelo tanto del sector en estudio como de las zonas aledañas, la mayor parte de la superficie es utilizada para el comercio (color azul oscuro), así como también sobresalen las zonas industriales y bodegas y en menor proporción se aprecian zonas residenciales.

Figura 3-2. Uso de suelo del área de estudio y zonas vecinas



Fuente: TPD (2014)

3.3 Características físicas de la red

Este apartado comprende las particularidades tangibles de la red en estudio, con las que se pretende representar la infraestructura por la que circularán los distintos modos de transporte en los dos simuladores. Las propiedades analizadas para esta representación son: la geometría (incluye cantidad de carriles por calzada, el ancho de los carriles, sentido de circulación, giros), la señalización, tanto vertical como horizontal y el control semafórico en las intersecciones.

La nomenclatura usada para los elementos viales es de la siguiente manera:

- CR: cuando se refiere a una carrera
- CL: cuando se refiere a una calle
- Cuando el objeto de análisis es una intersección, siempre se coloca la CR, luego el número de la carrera y CL con su respectivo número; ejemplo (CR51CL45), se refiere a la intersección carrera 51 con calle 45.
- En algunos casos es necesario analizar dos intersecciones consecutivas (e.g. un controlador semafórico que administre los ciclos semafóricos para las dos intersecciones), en este caso, si las intersecciones están comprendidas entre dos carreras y una calle se escribe CR, luego el número de la primera carrera seguido de un guión bajo y el número de la segunda carrera (en orden consecutivo), luego CL con su número, ejemplo: CR50_51CL45, y viceversa.

3.3.1 Geometría y sentidos de circulación

Para el análisis de la geometría se tomó como base el mapa de fotografías aéreas de Medellín y las imágenes disponibles en Street View de Google Maps.

El sector en cuestión cuenta con un anillo formado con las denominadas arterias principales urbanas del centro de la ciudad; Avenida San Juan (CL44), la avenida Ferrocarril (CR57) y la Avenida Oriental (CR46), y en tres de sus cuatro extremos figuran estructuras a desnivel. La infraestructura vial en este anillo tiene doble calzada, con 3, 4 y 5 carriles en cada calzada y doble sentido de circulación.

Las vías internas a este anillo en su mayoría cuentan con dos y tres carriles de circulación en un mismo sentido, sin embargo hay algunas áreas con calles colectoras y locales que tienen doble sentido de circulación.

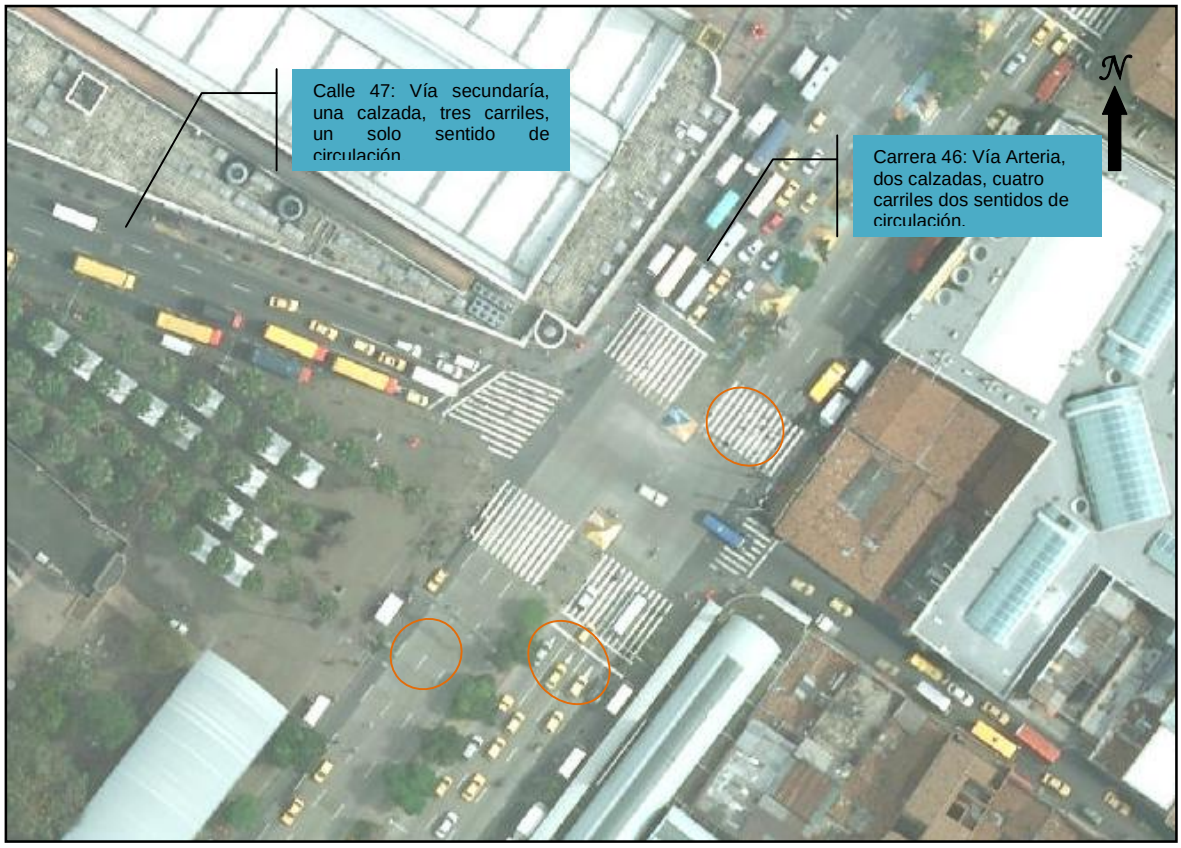
El tamaño de cada carril, varía de acuerdo a la importancia de la vía y van desde 2.5 m en vías locales hasta 4.2 m en vías arterias. Un ejemplo de este último tamaño es la Glorieta San Juan con Ferrocarril, aunque la mayoría de los carriles en esta red mide 3.5 m.

Respecto a los giros, todas tienen el giro que corresponde a los sentidos principales sin discriminar si es giro a izquierda o derecha, es decir que si las vías principales que forman la intersección tienen dirección Norte-Sur (N-S) y la otra Oeste- Este (O- E), los movimientos directos son N-S y O-E los giros principales siguen la dirección de estas corrientes, O-S y N-E. Como se observa el N-E es un giro a izquierda, los hay en todas las direcciones. Cuando la vía es de doble calzada y doble sentido de circulación, los

giros permitidos son a derecha, sin embargo en algunas ocasiones hay giros a izquierda, giros en U no hay, excepto en una intersección (CR51CL54).

En la Figura 3-3 se observa la intersección CR46CL47, cada vía tiene movimientos directos, de N-S y S-N para la CR46 y O-E para la CL47, los giros indirectos son O-S y S-E, en esta intersección no hay giros a izquierda permitidos. Además es visible que cuando los vehículos siguen hacia el Este, la calzada se disminuye de tres a dos carriles.

Figura 3-3: Fotografía aérea de la Avenida Oriental (CR46)



Fuente: Medellín (2015)

3.3.2 Señalización

El centro de Medellín cuenta con señalización horizontal en la mayoría de sus calles, en las intersecciones hay cebras para el paso de peatones y cuenta con flechas direccionales para indicar los movimientos permitidos en la vía. Cabe aclarar que esta señalización se encuentra en las vías arterias principales porque en algunas las secundarias, hay sitios donde no hay señalización ni para peatones ni para conductores y no se tiene claro cuál es el sentido de circulación de la vía. En la Figura 3-3 en los círculos naranja se aprecia los pasos de cebra, la separación de carriles y las flechas direccionales en la intersección CR46CL47. En sectores con influencia significativa de peatones, ciclistas, zonas escolares existen zonas de reducción de velocidad, estas señales frecuentemente están dibujadas en la carpeta de rodadura de las vías.

En cuanto a señalización vertical, se observa el uso de señales informativas, preventivas y reglamentarias. El usuario puede ubicarse fácilmente con el nombre de la carrera y la calle ya que la mayoría están señalizadas, los paraderos también están señalizados, movimientos viales permitidos y no permitidos, gálibos verticales, indicadores de reducción de velocidad, rótulos indicando la dirección de los barrios y carreteras aledañas al sitio de circulación.

Algunos ejemplos de señalización vertical y horizontal presente en las vías del centro de Medellín, indicando a los conductores sentidos de circulación, giros permitidos y/o no permitidos, sitios de estacionamiento prohibido, señales de "Pare" para vías secundarias, etc. son mostradas en la Figura 3-4. En la simulación solamente es usada la señalización horizontal.

Figura 3-4: Señalización horizontal y vertical

Fuente: fotografías tomadas por la autora.

3.3.3 Semaforización

La zona de estudio, tiene 92 intersecciones semaforizadas las cuales son controladas por medio de 61 controladores semafóricos, los cuales son inspeccionados desde la Centro de Ingeniería y Operación Semafórica (CIOS) de la Secretaria de Movilidad de Medellín.

Cada controlador, administra los ciclos semafóricos de una o dos intersecciones, dependiendo de la importancia de la vía y la cantidad de tráfico que por esta fluye. Algunas vías locales cuentan con tres semáforos vehiculares y otras como las glorietas tienen hasta 20 semáforos entre vehiculares y peatonales.

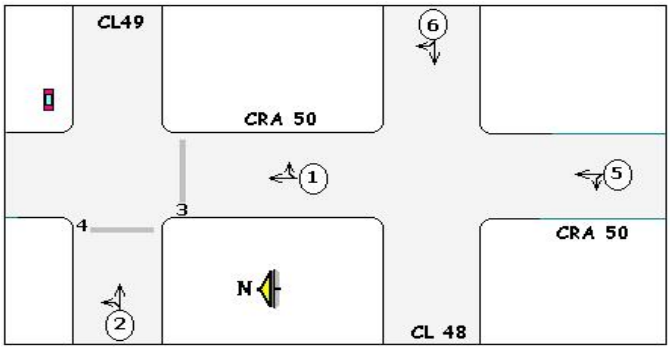
El ciclo de los semáforos está definido por tiempos de verde, de ámbar y de rojo para los pasos vehiculares, mientras que para los pasos peatonales está conformado por tiempo de verde, de verde intermitente y de rojo. Es importante mencionar que hay

intersecciones que en su grupo de señales para el paso vehicular, incluyen también tiempo de verde intermitente antes del ámbar. El sistema cuenta con un tiempo determinado de entreverdes, el cual es la suma del tiempo de todo rojo más el tiempo de ámbar.

Las intersecciones tienen ciclos semafóricos con una duración de 100s, aunque en algunas intersecciones con mayor flujo vehicular contemplan dos ciclos de 100s cada uno, sumando un ciclo completo de 200s.

Los datos de los ciclos semafóricos fueron suministrados por el CIOS de la Secretaria de Movilidad. La Figura 3-5 muestra la interacción de los semáforos tanto vehiculares como peatonales de las intersecciones carrera 50 con calle 48 y carrera 50 con calle 49 , en este caso el controlador administra los grupos de señales de las dos intersecciones consecutivas.

Figura 3-5: Esquema de controlador semafórico (CR50CL48_49)



Fuente: CIOS

En la Figura 3-6 se observa la matriz de entreverdes correspondiente a las intersecciones consecutivas sobre la carrera 50 con las calles 48 y 49. Los números en esta matriz representan el periodo de tiempo de ámbar más el tiempo de todo rojo, es decir desde que se acaba el tiempo de verde e inicia nuevamente.

Figura 3-6: Matriz de conflictos en las intersecciones (CR50CL48_49)

	1	2	3	4	5	6
1		1	0			
2	1			0		
3	1					
4		1				
5						0
6					1	

Fuente: CIOS

El número de las filas y las columnas de la matriz mostrada en la Figura 3-6 corresponde al número de semáforos ubicados en cada controlador, en este caso corresponden al de la Figura 3-5 o sea 6 semáforos (4 vehiculares y 2 peatonales).

La Tabla 3-4 contiene los tiempos de Inicio de verde (IV) y fin de verde (FV), el tiempo de ámbar es de 3 s y el tiempo de verde intermitente varía entre 4 y 5 s.

Tabla 3-4: Tiempos de inicio (IV) y fin de verde (FV) de las intersecciones (CR50CL48_49)

Grupo de Señales	IV (Seg)	FV (seg)
SG01	22	68
SG02	72	18
SG03	71	15
SG04	21	65
SG05	85	50
SG06	54	81

Fuente: CIOS

Estos controles de semáforos son ingresados al micro simulador, incluyendo todos los ciclos semafóricos sin discriminar si es para vehículos o para peatones para no afectar el controlador, sin embargo, en la simulación, cuando los semáforos son ubicados en las vías, solamente se incluye para vehículos, ya que el comportamientos de los peatones no es considerado en esta investigación. Ver Anexo 1

3.4 Análisis de aforos vehiculares

Se hizo el análisis de aforos vehiculares tomando como soporte los ejecutados por la empresa TPD en 2014 y complementados con los históricos realizados por diferentes empresas e instituciones, recopilados por la Universidad Nacional de Colombia, estos últimos fueron ejecutados en diferentes años, por lo que se hizo una proyección a 2014, considerándolo como el año base para este estudio.

Para ingresar estos aforos al micro simulador y que puedan ser empleados de manera óptima, se deben balancear, es decir, que lo que sale de una intersección debe ser igual a lo que entra a su consecutiva. Sin embargo, en la realidad esta suposición no es del todo cierta, debido a que las zonas generan y atraen viajes, desde y hacia estacionamientos. Si el motivo de viaje es el trabajo y el individuo usa su vehículo para realizarlo, al llegar a su destino entra por una intersección, pero no sale por la siguiente, esto mismo sucede en los centros comerciales, centros educativos, etc. Estos factores hacen que el tráfico fluctúe y que exista diferencia en los volúmenes vehiculares de intersecciones inmediatas.

Para que un balance pueda ser representativo, se deberían hacer conteos en todas las intersecciones a estudiar, el mismo día y en el mismo periodo de tiempo, ya que el comportamiento de los conductores no es igual todos los días, tomar en cuenta datos de los estacionamientos que se encuentran entre intersecciones, etc. Pero hacer un estudio tan detallado como este, no es práctico, es complejo y costoso. Frecuentemente el criterio utilizado para realizar los aforos es tomar días típicos y días atípicos, considerando de martes a jueves como días típicos y los demás como días atípicos. Lo cierto es que los conductores no siempre tienen el mismo patrón de viaje, puede ser que uno de los días en el que se hizo el aforo, un conductor tuvo que desviarse de su ruta para hacer una diligencia y pasó por el sitio en el que se programó aforar ese día, ese vehículo es contado, en uno de los días considerados “día típico” en una intersección, pero al siguiente día, que se afora la intersección vecina, ese vehículo no pasó por

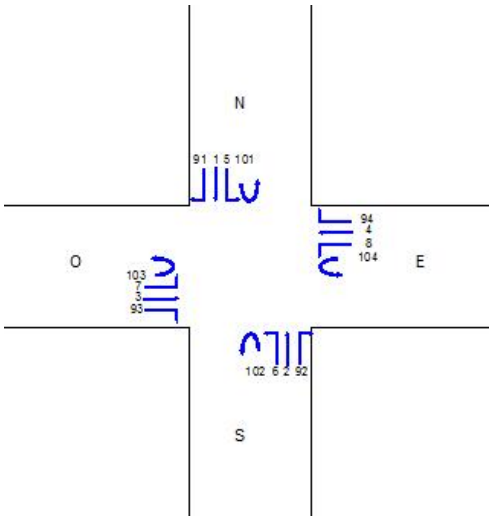
ninguno de los dos puntos, provocando inconsistencias en los flujos. Probablemente los únicos vehículos que tienen un comportamiento "homogéneo" son los buses o vehículos de transporte público, porque tienen rutas definidas.

Determinación de la hora de máxima demanda

Los datos más recientes de aforos vehiculares son los ejecutados por la firma TPD a mediados del año 2014, razón por la cual se tomaron como base para el estudio. Se aforaron 54 intersecciones de las cuales 40 son de interés para la presente investigación. Fueron ejecutados entre el 24 de mayo y el 7 de junio, aforando los días sábado, martes, miércoles y jueves; en horarios comprendidos entre 6:30 a 9:30 horas y de 16:00 a 19:00 horas los días entre semana y de 11:30 a 14:30 los días sábados. Se hizo una caracterización vehicular, es decir que consideraron vehículos livianos, taxis, camiones, buses, motocicletas y bicicletas. Cada intersección fue aforada con sus respetivos movimientos directos y giros principales y secundarios. Estos aforos fueron realizados antes de que iniciaran los cierres por las obras del tranvía de Ayacucho y del plan parrilla de remplazo de tuberías por parte de la empresa de servicios públicos (EPM)

La Tabla 3-5 muestra la nomenclatura o codificación utilizada para aforar cada intersección, igualmente en la columna de la izquierda se observa el esquema de los movimientos directos, giros principales, secundarios y giros en U.

Tabla 3-5: Nomenclatura utilizada para los aforos realizados en el sitio de estudio

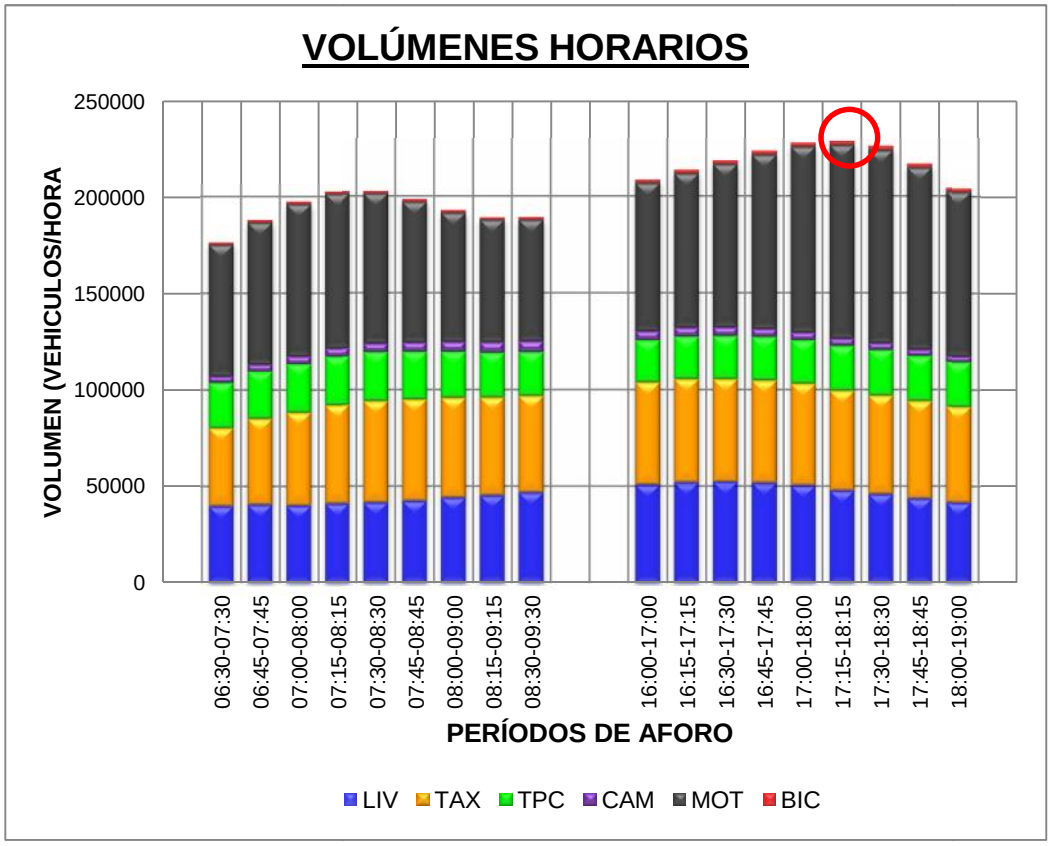
Movimiento	Código	Esquema de movimientos
Norte-Sur	1	
Sur-Norte	2	
Oeste-Este	3	
Este-Oeste	4	
Norte-Este	5	
Sur-Oeste	6	
Oeste-Norte	7	
Este-Sur	8	
Norte-Oeste	91	
Sur-Este	92	
Oeste-Sur	93	
Este-Norte	94	
Norte-Norte	101	
Sur-Sur	102	
Oeste-Oeste	103	
Este-Este	104	

Fuente: elaboración propia, con base en TPD (2014)

Hora de máxima demanda

Se le denomina al periodo de una hora en el que hay mayor demanda de tráfico. Después del análisis de los datos obtenidos de los aforos en campo hecho por TPD (2014), se determinó que la hora de máxima demanda se encuentra entre las 17:15 y 18:15. La Figura 3-7 muestra claramente que el mayor volumen de tráfico ocurrió en dicha hora. El análisis fue ejecutado para cada intersección y en cada periodo analizado, aunque esta figura agrupa todas las intersecciones estudiadas.

Figura 3-7. Evaluación de hora de máxima demanda

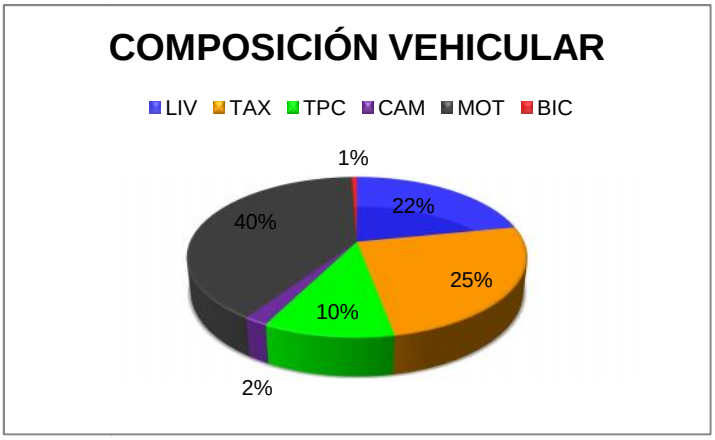


Fuente: TPD (2014)

La composición vehicular está definida por la cantidad de vehículos que pasa por una vía o intersección, discriminándolos por su tamaño. En la hora de máxima demanda quedó distribuida de la siguiente manera:

Los porcentajes ocupados por cada tipo de vehículo en la hora de máxima demanda son indicados en la Figura 3-8, la partición muestra que el mayor porcentaje lo tienen las motos (40%), luego los taxis (25%), vehículos livianos (22%), buses (10%), camiones (2%) y en último lugar la bicicletas (1%). Este comportamiento es similar en todas las intersecciones, exceptuando algunas en las que no hay bicicletas, buses o camiones.

Figura 3-8.Composición vehicular para la hora de máxima demanda



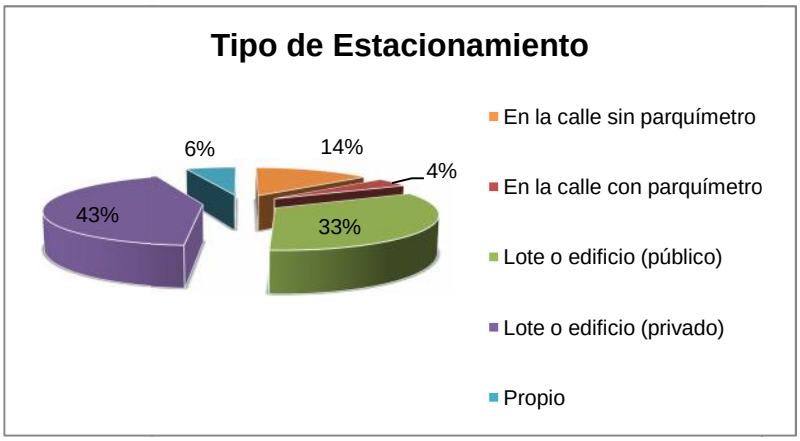
Fuente: TPD (2014)

3.5 Estacionamientos

Al ser una zona atractora de viajes, el centro de Medellín cuenta con estacionamientos para vehículos livianos, camiones y motocicletas. Hay parqueaderos públicos y privados, en lote o edificio, en la vía regulados con parquímetro y cobro y en la vía sin regulación (ilegales).

Tomando como fuente, la información obtenida de la EOD 2012, se hizo una caracterización de la distribución de uso por tipo de estacionamiento y la partición indica que entre los autos: el 6% tiene parqueo propio, el 14% aparca en la vía sin regulación, 4% estaciona con parquímetro (pagando en las zonas ZER y sin pago en las zonas blancas; más adelante se explica la función de estas zonas), el 33% aparca en lotes o edificios públicos pagando y el 43% aparca gratis en edificio o lote. Ver Figura 3-9

Figura 3-9. Distribución de uso de parqueo, por tipo de estacionamiento



Fuente: Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2012)

3.5.1 Estacionamientos públicos y privados

Los estacionamientos públicos y privados, están ubicados en edificios y lotes; en los públicos los usuarios pagan una tarifa por el servicio y este pago puede ser cancelado en diferentes modalidades, ya sea por hora y/o fracción de hora, día, o mes; en los estacionamientos privados, los usuarios no tiene que pagar por utilizarlos, están ubicados en centros laborales, oficinas de gobierno, centros comerciales, clínicas médicas y odontológicas, centros educativos, etc., su uso es parte de los beneficios de adquirir un bien o servicio en el establecimiento o institución que los tenga.

En 2014, la Universidad Nacional de Colombia y la empresa TPD, realizaron un levantamiento de celdas de estacionamientos públicos (vehículos livianos y motocicletas) en el sector de análisis. Así, con ambos inventarios se obtuvo un total de 8344 celdas de aparcamiento para vehículos livianos y 11805 para motocicletas.

Se verificó la cantidad de estacionamientos y por ende la cantidad de celdas por zona sit y se obtuvo los porcentajes de autos y motos en cada zona. La Tabla 3-6 muestra la cantidad de estacionamientos ubicados en la zona Sit 1A, el resto de los estacionamientos se pueden visualizar en el Anexo 2 (parqueaderos por zona).

Tabla 3-6: Celdas de estacionamientos por Zona Sit

Zona Sit	Código Zona Sit	Micro zona	Nombre	Motos	Autos	% Motos	% Autos
1A	11	1101	Motos Colombia	80	0	1,2%	0,0%
			Parqueadero Antaño	200	0	3,0%	0,0%
		1102	Serviteca	20	0	0,3%	0,0%
		1103	La Cascada	30	0	0,5%	0,0%
		1104	Motos Los Cortos	215	0	3,3%	0,0%
		1105	Marpo Motos	38	0	0,6%	0,0%
		1106	Gaviria-motos	200	0	3,0%	0,0%
		1107	Motopark-moto	100	0	1,5%	0,0%
		1108	Sonorama-motos	40	0	0,6%	0,0%
		1109	Continental-motos	200	0	3,0%	0,0%
			Astoria	50	32	0,8%	1,0%
			Unión Plaza	0	300	0,0%	9,7%
			Nutibotero	100	15	1,5%	0,5%
			Juanita	15	40	0,2%	1,3%
		1110	Nutibara1	0	25	0,0%	0,8%
		1111	Nutibara 2	0	25	0,0%	0,8%
			Pr Zona 1A-1	1112	554	16,8%	17,9%
		1112	La Sorpresa	320	0	4,8%	0,0%
		1113	Motos Greiff	70	0	1,1%	0,0%
			El Parqueadero	0	280	0,0%	9,0%
			Autopark	37	98	0,6%	3,2%
			Los Primos-carretas	300	0	4,5%	0,0%
			JM	50	0	0,8%	0,0%
			El Centro	120	0	1,8%	0,0%
		1114	Parking los Primos	80	0	1,2%	0,0%

Zona Sit	Código Zona Sit	Micro zona	Nombre	Motos	Autos	% Motos	% Autos
		1115	Moto Car	70	20	1,1%	0,6%
			Yenny Tatiana	150	14	2,3%	0,5%
		1116	Andrus Motos	30	0	0,5%	0,0%
		1117	Odeón	0	270	0,0%	8,7%
		1118	El Colombiano	100	0	1,5%	0,0%
		1119	Pr Zona 1A-2	895	443	13,6%	14,3%
		1120	Pr Zona 1A-3	880	435	13,3%	14,1%
		1121	Pr Zona 1A-4	1100	544	16,7%	17,6%
Total de celdas de estacionamiento en la zona SIT 1A				6602	3095	100,0%	100,0%

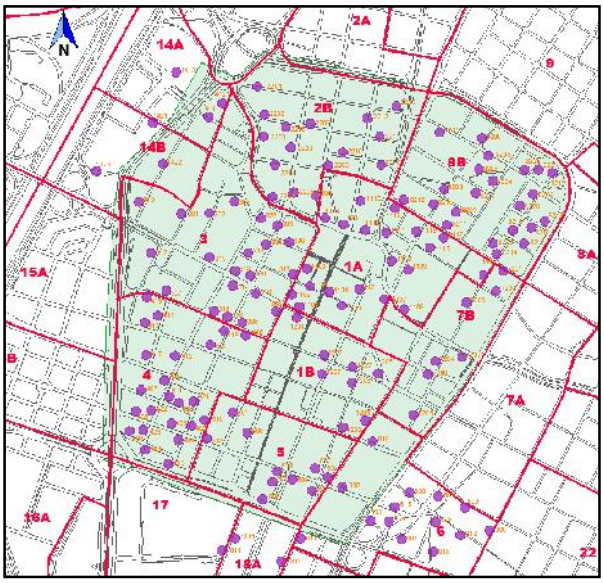
Fuente: elaboración propia

Los porcentajes se calcularon con el fin de dividir las zonas SIT que afectan el área de estudio en micro zonas, es decir subdividir la matriz OD original. Los porcentajes mostrados en la Tabla 3-6, corresponden a la zona Sit 1A, cuyo código es 11, son aplicados a la matriz de viajes de auto privado y motos, no sin antes hacer pequeñas agrupaciones de los estacionamientos ubicados en la misma cuadra. Esta zona 1A quedó subdivida en 21 micro zonas. Las micro zonas se codificaron colocando el código de la zona Sit y enumerando desde 01, (e.g. 1101; zona Sit 11 grupo de aparcaderos 01).

Tomando como base la cantidad de celdas de los estacionamientos para vehículos, en lotes o edificios públicos (8344 autos) y utilizando la proporción mostrada en la Figura 3-9 para este mismo tipo de aparcamiento (33%), se agregaron los estacionamientos privados que acogen al 43% del total de vehículos que ingresan al centro de la ciudad, esto corresponde a 19218 autos. Esta cantidad de celdas fueron distribuidas en las zonas Sit, para la cual se buscó la localización de los estacionamientos privados con la ayuda de Street View y en los sitios donde no se visualizaron, se situaron equitativamente. En las tablas aparecen como Pr Zona + (zona Sit- número correlativo).

La subdivisión de las zonas que afectan el área de estudio son observados en la Figura 3-10 con líneas rojas. Los puntos morados son los aparcamientos analizados como micro zonas en la micro simulación, estos son modelados como parking lot en VISSIM (zona).

Figura 3-10: Ubicación de estacionamientos por zona Sit



Fuente: elaboración propia, con base en inventario de estacionamientos públicos realizado por la Universidad Nacional de Colombia, TPD (2014) y las ayudas visuales de Street View.

Para la micro simulación son utilizadas estas 150 micro zonas, más las restante 23 zonas Sit de la Comuna la Candelaria y las 9 "Mega Zonas" analizadas en la sección 3.2.1, haciendo un total de 182 zonas; por ende el tamaño de las matrices es de 182X182.

3.5.2 Estacionamientos en la vía

Correspondiendo con el tema del uso de la vía pública como estacionamiento, la Secretaria de Movilidad de Medellín cuenta con las Zonas ZER (Zona de Estacionamiento Regulado), ZER-C (Zona de Estacionamiento Regulado para Camiones) y Zonas Blancas. La función principal de ambos tipos de zonas es evitar que los conductores se estacionen en cualquier parte de la vía. En todas se regula haciendo uso de parquímetro y cobrando una tarifa por determinado tiempo de uso.

En las zonas Blancas es permitido estacionarse sin pagar y por un tiempo determinado, estas zonas blancas, habitualmente se ubican alrededor de las zonas ZER.

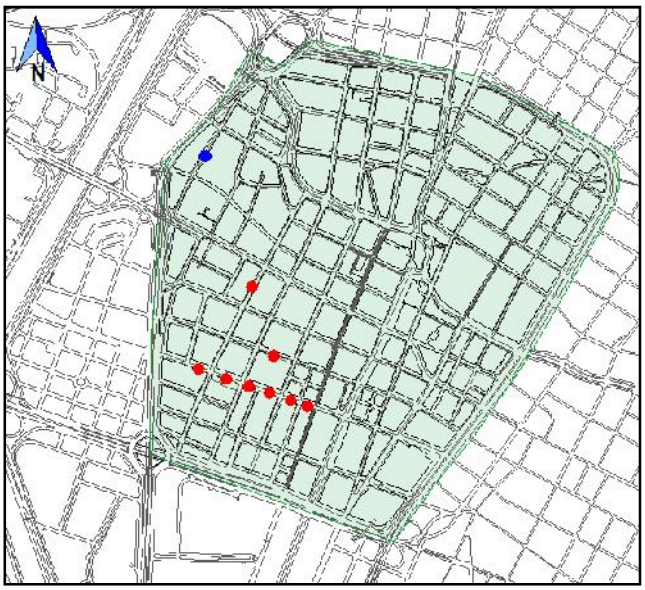
En las zonas ZER y ZER-C el usuario debe hacer un pago previo para poder usar el espacio. (Alcaldía de Medellín, 2010)

El sector en análisis cuenta con cuatro zonas que están reguladas como zonas ZER y ZER-C, están ubicadas en los siguientes sitios: Maturín (CL46), Pichincha (CL48), Tenerife (CR55), San Benito (CR56C).

La Figura 3-11 muestra en azul la zona ZER en San Benito, sobre la CR56C, cuenta con 30 celdas de estacionamiento para vehículos y motocicletas y en rojo las zonas ZER-C de Maturín sobre la CL46, Pichincha sobre la CL48 y Tenerife sobre la CR55, en estas

tres zonas hay 11 bahías para estacionar camiones, cada bahía aloja en promedio 2 camiones. En ninguno de los casos anteriores hay zonas blancas.

Figura 3-11: Localización de las ZER en el área de estudio

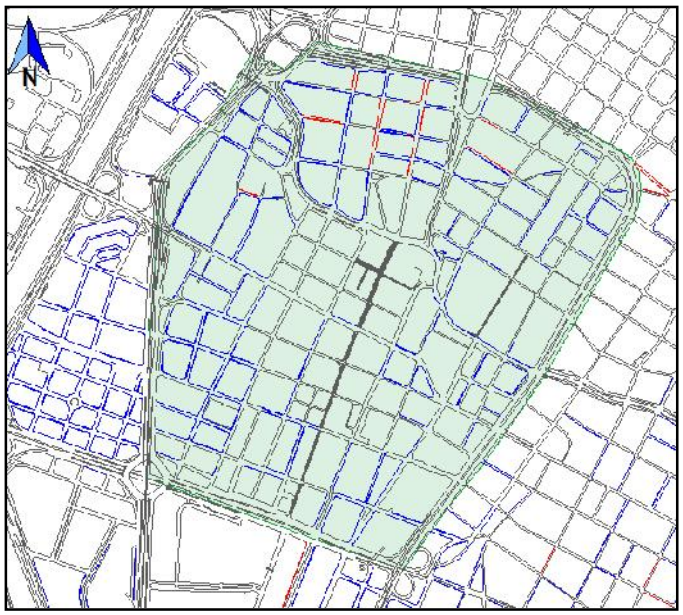


Fuente: TPD (2014)

Según la caracterización del uso de parqueos en el sitio de estudio de la EOD realizada en 2012, alrededor de un 14% de los conductores que ingresan en vehículo privado al centro de la ciudad parquea gratis y en la vía pública.

Los sitios utilizados como estacionamiento en la vía pública y no autorizados, se pueden apreciar en la Figura 3-12, el color azul representa los parqueos en la vía y rojo los parqueos que utilizan tanto en la vía como el andén. Comparando la Figura 3-11 con la Figura 3-12 existe incongruencia entre el espacio regulado para estacionar en la calle y el espacio realmente utilizado.

Figura 3-12: Localización de parqueaderos no regulados en el área de estudio



Fuente: TPD (2014)

3.6 Espacios para acopio de taxis

La ciudad de Medellín cuenta con el Decreto 0756 publicado en la Gaceta Oficial No. 3700, en el año 2010, el cual trata de las modificaciones de otros decretos y de actualización de centros de acopio y otras disposiciones en materia de tránsito en la ciudad de Medellín, en éste se regula el espacio utilizado como acopio de los taxis que circulan en la ciudad, se detalla la ubicación del acopio y la cantidad de vehículos permitida en dicho lugar.

En la Figura 3-13, se puede visualizar la ubicación de los espacios destinados para acopio de taxis según el decreto 0756 de 2010, los que conciernen a esta investigación y los de algunas zonas aledañas. El área de estudio tiene 36 acopios y 300 plazas de estacionamiento.

Figura 3-13: Localización de espacios destinados al acopio de taxis

Fuente: TPD (2014)

3.7 Zona de acopio de camiones

Hay zonas destinadas a la carga y descarga de camiones distribuidores con horarios establecidos para su funcionamiento, generalmente la zona está señalizada en la superficie del pavimento como "Zona Cargue" o "Acopio de camiones" y/o con señalización vertical indicando el horario de cargue y descargue. Sin embargo no todos los centros de comercio e industria de esta área de la ciudad cuentan con acopio para los camiones. Esta falta de infraestructura logística se observa a diario en las calles, pues los camiones se estacionan en los costados de la vía pública. Este hecho corrobora el hallazgo de la encuesta origen desino de carga del 2012 que revelaba que el 70% de los pequeños establecimientos no contaban con bahía para el cargue y descargue. En la Figura 3-14, se muestra la señalización utilizada en el centro de la ciudad para indicar las zonas de cargue y descargue.

Figura 3-14: Señalización vertical en las zonas de carga

Fuente: fotografías tomadas por la autora.

Algunos de estos espacios son regulados por la Secretaria de Movilidad de Medellín, con las denominadas zonas ZER-C, mencionadas en el ítem 3.5, en la sección de estacionamientos en la vía.

Los espacios ocupados como estacionamiento en la vía pública sin regulación, los acopios de taxis y los camiones son agregados como estacionamientos reales en el micro simulador; esto con el fin de simular la situación real a la que están expuestos los vehículos que ingresan al centro de Medellín.

3.8 Transporte público

El Sistema Integrado de Transporte del Valle de Aburrá (SITVA), integra el metro como columna vertebral del sistema, el sistema de Buses Rápidos de Transporte público (BRT, por sus siglas en inglés) denominado Metroplus, rutas alimentadoras y el sistema de teleférico (metrocable) que funcionan en las zonas altas de la ciudad, así mismo cuenta con las rutas de buses urbanas e interurbanas. Al momento de realizar este estudio aún no había iniciado la operación del Tranvía de Ayacucho y sus dos cables integrados. Por tanto, en la zona de estudio sólo interactúan, el metro, metroplús, las rutas urbanas de transporte público colectivo en su mayoría y algunas interurbanas.

Transporte público colectivo

El sistema de transporte público colectivo de la ciudad está diseñado radialmente, es decir que las rutas se mueven del barrio al centro, y viceversa. De acuerdo con TPD (2014) hay 230 rutas y ramales de rutas de transporte entre urbanas y metropolitanas. Sin considerar los ramales que generalmente operan en los barrios, como derivaciones de una ruta, las rutas son unas 127, las cuales junto con las del Metroplus, aparecen en la Tabla 3-7.

Para este estudio se recopiló información relacionada con el intervalo y la frecuencia de las rutas de buses, analizadas en un el estudio de registradoras[1] ejecutado en 2011 por la Universidad Nacional de Colombia.

Tabla 3-7: Rutas de buses introducidas en el micro simulador

Ruta	Intervalo de despacho (s)	Frecuencia (veh/hora)	Ruta	Intervalo de despacho (s)	Frecuencia (veh/hora)	Ruta	Intervalo de despacho (s)	Frecuencia (veh/hora)
Ruta 002	257	14	Ruta 253	300	12	Ruta 067	251	14
Ruta 006	232	16	Ruta 254	424	9	Ruta 068	274	13
Ruta 008	554	7	Ruta 262	167	22	Ruta 072	198	18
Ruta 022	288	13	Ruta 263	343	11	Ruta 088	205	18
Ruta 023M	205	18	Ruta 264	257	14	Ruta 090	180	20
Ruta 024	480	8	Ruta 265	300	12	Ruta 093	355	10
Ruta 031	240	15	Ruta 267	655	6	Ruta 094	314	11
Ruta 037	138	26	Ruta 275A	268	13	Ruta 095	365	10
Ruta 039	171	21	Ruta 280	480	8	Ruta 096	175	21
Ruta 041ª	257	14	Ruta 281	225	16	Ruta 110	300	12
Ruta 041B	240	15	Ruta 282	343	11	Ruta 140	327	11
Ruta 042	257	14	Ruta 283	480	8	Ruta 142	256	14
Ruta 052	218	17	Ruta 284	300	12	Ruta 176	525	7
Ruta 055	379	10	Ruta 285	313	12	Ruta 103	151	24
Ruta 056	300	12	Ruta 288	379	10	Ruta 140	327	11
Ruta 057	554	7	Ruta 289	257	14	Ruta 143	254	14
Ruta 069	300	12	Ruta 290	600	6	Ruta 160	400	9
Ruta 080	240	15	Ruta 402	185	20	Ruta 161	480	8
Ruta 081	300	12	Ruta 200B	800	5	Ruta 170	279	13
Ruta 082	400	9	Ruta 201B	1440	3	Ruta 171	200	18
Ruta 085	257	14	Ruta 203B	424	9	Ruta 172	296	12
Ruta 111	212	17	Ruta 221	450	8	Ruta 173	233	15
Ruta 112	720	5	Ruta 242D	900	4	Ruta 174	195	18
Ruta 130	343	11	Ruta 243M	800	5	Ruta 179M	318	11
Ruta 132	450	8	Ruta 250A	480	8	Ruta 286	370	10
Ruta 133	554	7	Ruta 250M	122	30	Ruta 287	360	10
Ruta 134	1200	3	Ruta 255B	3600	1	Ruta 300	149	24
Ruta 135B	424	9	Ruta 260M	300	12	Ruta 301	152	24
Ruta 136ª	655	6	Ruta 255A	400	9	Ruta 302	124	29
Ruta 190	300	12	Ruta 260B	212	17	Ruta 303	141	26
Ruta 191	313	12	Ruta 261M	218	17	Ruta 304	810	4
Ruta 192	257	14	Ruta 261A	1200	3	Ruta 305	729	5
Ruta 193	379	10	Ruta 270M	248	15	Ruta 308	592	6
Ruta 195	313	12	Ruta 51B	3600	1	Ruta 309	325	11
Ruta 202	514	7	Ruta 60B	195	19	Ruta 311	240	15

[1] El estudio de registradoras consiste en el conteo de pasajeros de una ruta de buses en un recorrido completo y durante un día, se anotan diferentes datos como: el valor de la registradora cuando el bus sale de su terminal y cuando regresa, hora de salida, hora de llegada, intervalos de tiempo entre buses, entre otros. Los principales resultados de este estudio son: cantidad de pasajeros por bus/recorrido y la frecuencia de buses. Es importante mencionar que estos valores son evaluados para ambas jornadas, matutina y vespertina.

Ruta	Intervalo de despacho (s)	Frecuencia (veh/hora)	Ruta	Intervalo de despacho (s)	Frecuencia (veh/hora)	Ruta	Intervalo de despacho (s)	Frecuencia (veh/hora)
Ruta 204	900	4	Ruta 60M	327	11	Ruta 310	268	13
Ruta 220	514	7	Ruta C23	248	15	Ruta 315	183	20
Ruta 221	450	8	Ruta 221B-M	554	7	Ruta 316	180	20
Ruta 223	514	7	Ruta 053	743	5	Ruta 099	103	35
Ruta 240	400	9	Ruta 059	340	11	Linea 1-S-N	210	17
Ruta 241	554	7	Ruta 063B	244	15	Linea 1-N-S	210	17
Ruta 246	450	8	Ruta 063M	279	13	Line 2-S-N	210	17
Ruta 251	400	9	Ruta 064	219	16	Linea 2-N-S	210	17
Ruta 252	424	9	Ruta 065	256	14			

Fuente: Elaboración propia, con base en el estudio de registradoras ejecutado por la Universidad Nacional de Colombia y Transporte Público de Medellín.

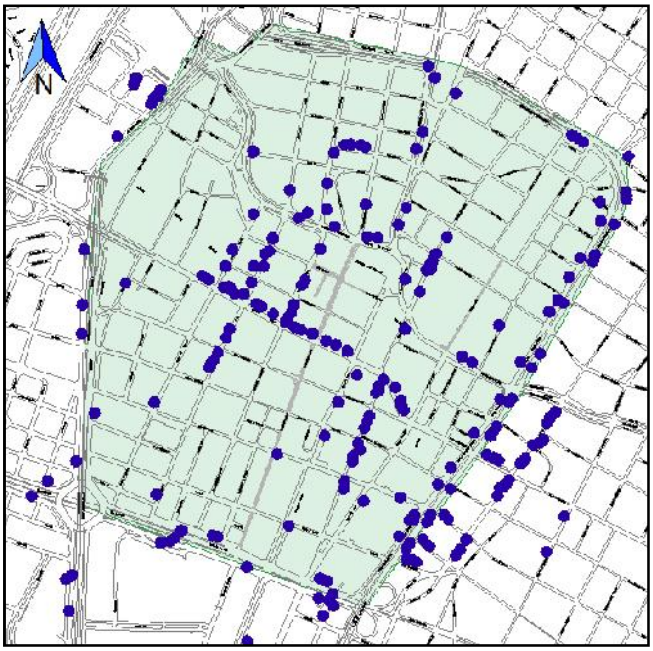
3.9 Ubicación de paraderos de buses

El anillo y las zonas internas estudiadas cuentan con 236 paraderos de buses (incluyendo las estaciones de Metroplús ubicados en la avenida Ferrocarril y en la avenida Oriental). Cabe aclarar que no todos estos paraderos tienen las mismas condiciones, algunos están equipados con instalaciones adecuadas para el ascenso y descenso de pasajeros y para que los buses se estacionen cómodamente (bahías), otros sólo cuentan con una señal vertical indicando que es paradero.

La ubicación de estos paraderos en el micro simulador se hizo con el fin de controlar la cantidad de buses que ingresan al centro, sin embargo, de acuerdo a la ruta, así realizan las paradas. No hay un orden reglamentado en el que se establezca qué paradero utiliza cada ruta, por lo tanto en el micro simulador se colocan siguiendo la secuencia de links y considerando entre 1 y 3 paraderos máximo para cada ruta dentro del centro.

Los paraderos mostrados en la Figura 3-15 corresponden a los paraderos en el centro de la ciudad.

Figura 3-15: Localización paraderos de buses



Fuente: TPMedellin y TPD (2014)

3.10 Demanda de viajes

La forma de introducir la demanda de viajes en las matrices utilizadas por los simuladores es diferente. Para VISUM se utilizan ADEs y para VISSIM se usan vehículos individuales como tal. Las matrices utilizadas son de los modos auto, taxi, moto y camiones.

La demanda total en estos modos es de 38232 ADEs para VISUM. Previamente la demanda de buses, fue introducida como precarga, en vista de que no se simuló transporte público; y de 39,372 vehículos para VISSIM, cabe mencionar que en VISSIM, se simularon 1631 buses en la hora de simulación. La distribución por simulador se pueden apreciar en la Tabla 3-8.

Tabla 3-8: Demanda vehicular utilizadas en los simuladores

Modo	VISUM (ADEs)	VISSIM (Vehículos individuales)
Auto particular	16917	16917
Taxi	9415	9415
Moto	5175	10350
Camión	6725	2690
Buses	Precarga, usando conteos	1631

Fuente: Elaboración propia con base en TPD (2014) y Solarte Portilla (2015)

Los factores de conversión de vehículos individuales a vehículos equivalentes son mostrados en la Tabla 3-9.

Tabla 3-9: Factores de conversión de ADEs

Tipo de vehículo	Factor de conversión
Auto particular	1.0
Taxi	1.0
Moto	0.5
Camión	2.5
Buses	2.0

Fuente: Transportation Research Board (2000)

3.11 Matrices de los diferentes modos de transporte

Entre el año 2011 y 2012 se realizó la EOD a hogares del valle de Aburrá, de la cual se obtuvo información relevante para la ejecución de distintos estudios de movilidad de la ciudad. Parte de esa información es la cantidad de viajes realizados por los ciudadanos en los diferentes modos de transporte disponibles en la ciudad.

De acuerdo al análisis de zonas hecho en los apartados 3.2.1 y 3.5.1 las matrices quedan distribuidas de la siguiente manera: (Ver Anexos 3 y 4 matrices para simulación)

Tabla 3-10: Tamaño de matrices de viajes de acuerdo a cada simulador

Simulador	Tamaño de la matriz
VISUM	44x44
VISSIM	182x182

Fuente: elaboración propia

Debido a que la información fue recolectada y procesada entre el 2011 y 2012 se hizo una actualización a 2014, mediante el uso la función TFLOWFUZZY[2] de VISUM, proceso realizado por (TPD, 2014). Con estas matrices ya actualizadas se realizó la subdivisión de micro zonas para ser utilizadas en VISSIM.

Con toda la información antes analizada y depurada se procede la construcción y calibración de la red en VISUM y VISSIM para el caso 1.

[2] La función TFLOWFUZZY, corrige y actualiza la información de la matriz de demanda, basándose en los aforos vehiculares, realizados en el año al que se hace la actualización.

4. CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE LA RED DE TRANSPORTE

Este capítulo comprende de manera general el proceso de la construcción de la red en los simuladores VISUM y VISSIM con su respectiva calibración. Para ilustrarlo, en este capítulo se presenta el caso de la red del centro de Medellín denominado caso 1, y adicionalmente se ilustrará para un caso hipotético de una red simplificada (Caso 2), el cual puede visualizarse en el capítulo 5.

El presente capítulo sólo menciona aspectos básicos y relevantes para la construcción de la red. Para conocer al detalle el procedimiento para el trazado de cualquier red, ver manuales de VISUM 14 y VISSIM 7.

4.1 Construcción del Modelo en VISUM (caso 1)

En los macro simuladores, una red es representada por medio de grafos G=(N, A); N es el conjunto de nodos y A, el conjunto de arcos. Se hace a través del uso de elementos geométricos como el punto (para representar los N nodos), líneas rectas (para representar los arcos A) y polígonos (para representar las zonas). Es necesario conocer la jerarquía de la vía, las características físicas de la infraestructura y la demanda de viajes en los diferentes modos de transporte.

Los elementos necesarios para representar la geometría de la red a analizar se mencionan a continuación:

- Nodos: representan las intersecciones de la red y los centroides de las zonas y se definen mediante puntos.
- Arcos: representan las calles y son definidas mediante líneas rectas, en ellas se les indica sentido de circulación de las vías.
- Zonas: simbolizan cada una de las zonas de la matriz OD, son representadas por medio de polígonos. A cada zona le corresponde un centroide.
- Conectores: representan mediante líneas rectas la unión entre el centroide de las zonas y las vías, es el medio mediante el cual los viajes llegan a la red.

Las características físicas fueron analizadas desde las ayudas visuales de Google Maps y las fotografías de Google Street View.

Para construir la red se hizo la jerarquización de las vías de acuerdo a la velocidad a flujo libre, capacidad, etc. Este análisis fue hecho por TPD (2014). En la Tabla 4-1 se presentan las capacidades, las cuales ya incluyen el efecto reductor de los semáforos.

Tabla 4-1: Tipos de vía y capacidad analizados para la zona de estudio (caso 1)

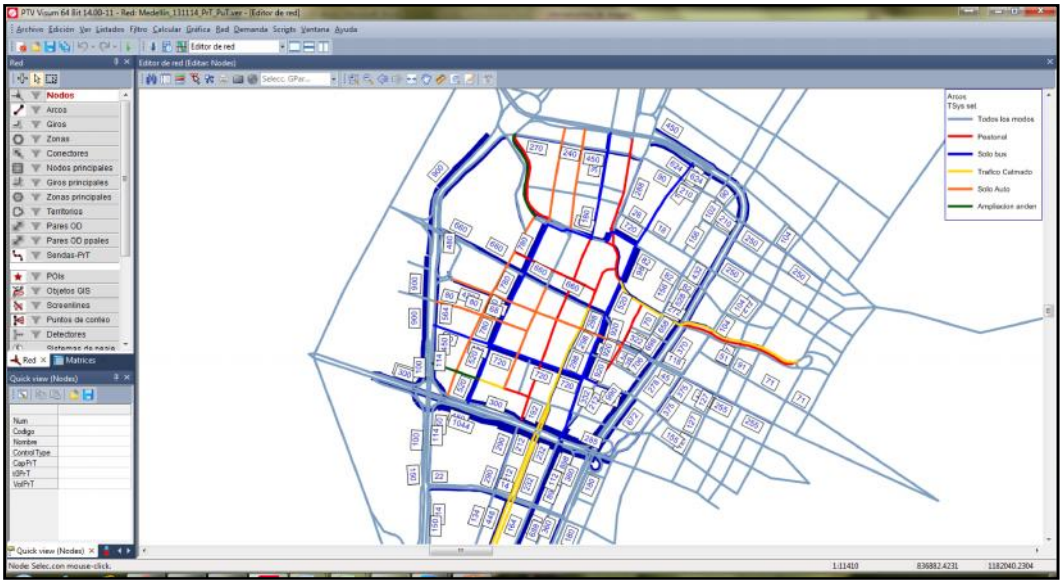
Tipo de vía	Cantidad de carriles	Capacidad (veh/sentido/hora)
1	1	800
2	2	1500
3	3	2200
4	4	2900
5	5	3600

Fuente: elaboración propia

La simulación se programa con una velocidad a flujo libre de 50 km/h en cada arco, considerando los distintos modos de transporte: auto liviano, moto, taxi, camiones y buses.

Después de definir los tipos de vía y sus características se realiza el montaje de la red en el macro simulador. Ubicando los nodos (mediante puntos) en las intersecciones; uniendo los nodos (mediante poli líneas) denominadas arcos para modelar las calles. Con la ayuda de los mapas que por definición pueden ser cargados en el programa o con imágenes adaptadas. Ver Figura 4-1

Figura 4-1: Plataforma de simulación de VISUM.



Fuente: TPD (2014)

4.1.2 Demanda y Asignación utilizada en VISUM (caso 1)

La demanda de viajes se analizó en el ítem 3.2.1. Se tomó en consideración un total de 44 zonas, de la cuales 35 zonas SIT, son las pertenecientes a la Comuna La Candelaria y 9 son zonas externas (Mega zonas) que fueron agregadas con el fin de obtener los viajes externos que tienen como destino el centro de Medellín. Ver Tabla 3-2 y Tabla 3-3.

Para la asignación de transporte privado PrT, VISUM utiliza métodos de asignación estáticos y modelos de asignación dinámicos. En el primero no se considera la variación del tiempo en la elección de la ruta, caso contrario en los métodos dinámicos.

Tabla 4-2: Métodos de asignación en VISUM

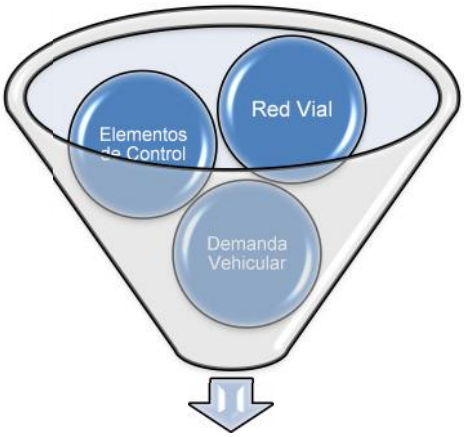
Método	Descripción
Asignación incremental	Utiliza un porcentaje base de la demanda para realizar la asignación de flujos.
Asignación de equilibrio	Hace una distribución de acuerdo al primer principio de Wardrop.
Asignación de equilibrio LUCE (*Linear User Cost Equilibrium*)	LUCE es un algoritmo desarrollado por Guido Gentile, este algoritmo logra convergencia rápidamente, mientras que asigna la demanda de cada par OD en varios caminos a la vez.
Equilibrio_Loshe	Denominado también "proceso-aprendizaje" de los conductores en la red. Inicialmente utiliza un "todo o nada".
Asignación con ICA (*Intersection Capacity Analysis*)	Considera en detalle la asignación por carril, utiliza las funciones flujo-demora para la evaluación de los giros y nodos. Con este método la convergencia mejora significativamente.
Asignación estocástica	Este método asume que los usuarios inicialmente elegirán la mejor ruta, sin embargo, evalúan el resto de las rutas con información diferente e incompleta. Asigna los flujos aleatoriamente haciendo uso de los modelos de distribución (Logit, Kirchhoff, Box-Cox, etc.)
TRIBUT procedure	Fue desarrollado por INRETS, es adecuado para modelar los peajes.
Equilibrio dinámico de usuario	Puede ser utilizado en grandes redes sobre congestionadas, con largos periodos de tiempo.
Asignación dinámica estocástica	Permite asignar las rutas sobre las conexiones disponibles, para cada intervalo de tiempo de salida. Es decir que modela el cambio que existe en el tiempo al elegir la ruta deseada.

Fuente: PTV AG (2014b).

4.2 Construcción del modelo en VISSIM (caso 1)

La construcción de un modelo en VISSIM comprende cuatro etapas interdependientes entre sí, estas son: Geometría y características físicas de la infraestructura vial, elementos de control, demanda vehicular y productos. Un esquema de estas cuatro fases es mostrado en la Figura 4-2.

Figura 4-2: Elementos para la construcción de un modelo en VISSIM



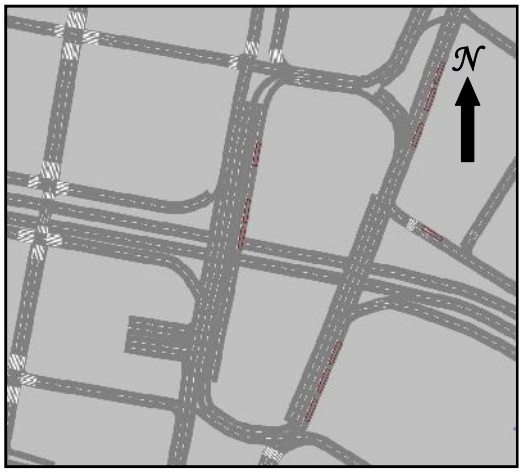
Fuente: elaboración propia con base en PTV AG (2014a)

4.2.1 Geometría y características físicas de la infraestructura vial (caso 1)

Debido a los problemas computacionales que generan los mapas que este simulador tiene por definición (consumen gran cantidad de memoria), se montaron imágenes del MapGis de la Alcaldía de Medellín, (Alcaldía de Medellín, 2015) y con esta base se procede a la construcción de la infraestructura vial.

De acuerdo a la información depurada en los ítems 3.3.1 y 3.3.2 se construye la red, con sus dimensiones, con la debida señalización horizontal y sentidos de circulación. Esta es ejecutada con los comandos de VISSIM llamados links, conectores y señales en el pavimento. De igual manera se construyen los desniveles y pendientes respectivas en los sitios donde se requirió. Los elementos físicos de la red pueden ser observados en la Figura 4-3, señales y los paraderos de buses vinculados a un sector de la malla vial.

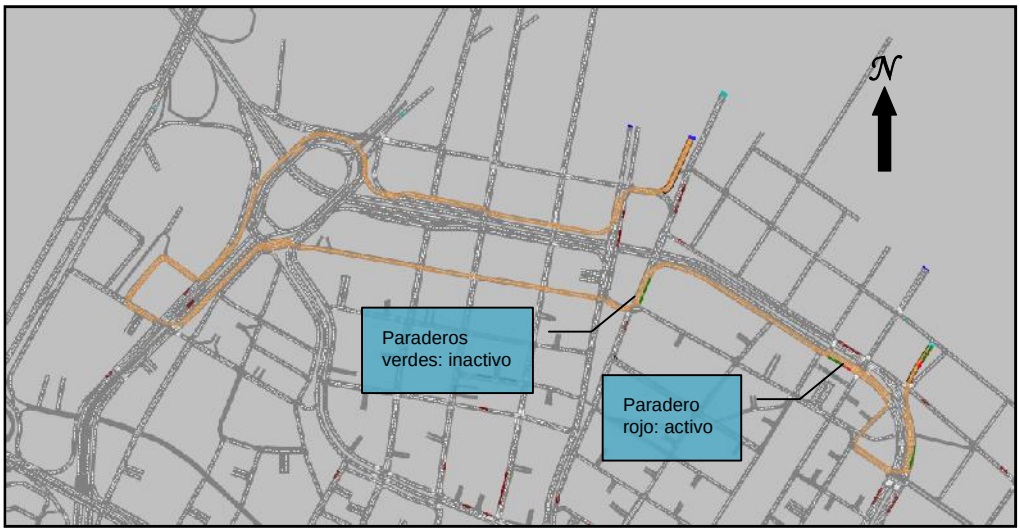
Figura 4-3: Segmento de la red de transporte en VISSIM



Fuente: elaboración propia

La ruta de bus número 57 es presentada en la Figura 4-4, solamente es incluido el tramo que transita en la zona de estudio. En su recorrido la ruta se encuentra con una serie de paraderos, que pueden ser utilizados. Debido a la cantidad de rutas de buses (casi 130), se consideró dejar activas entre uno y tres paraderos por ruta y con la posibilidad de saltarlo si está siendo ocupado por otro bus, asemejándose un poco a lo que hacen los buses en la realidad.

Figura 4-4: Representación infraestructura de transporte público



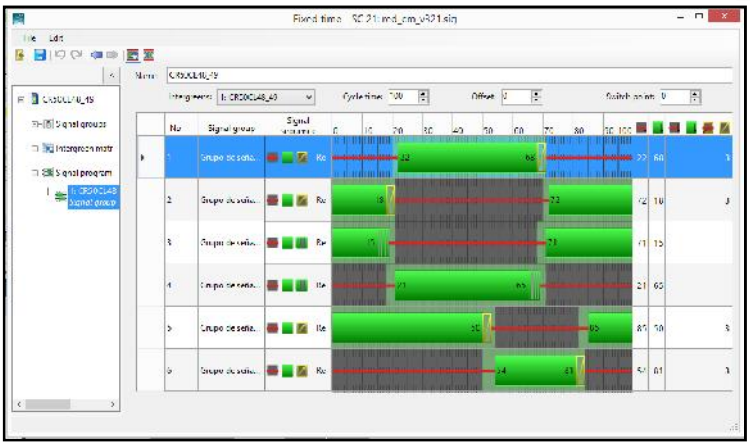
Fuente: elaboración propia

4.2.2 Elementos de Control (caso 1)

Para el control del movimiento de los vehículos en las intersecciones se utilizan los semáforos, con sus ciclos simples verde, rojo y ámbar; para el caso de los semáforos peatonales se utiliza el verde intermitente. Los ciclos semafóricos para este caso fueron proporcionados por CIOS. Ver Anexo 1

Los seis grupos de señales que controlan el tráfico en las intersecciones CR50CL48 y CR50CL49 son mostrados en la Figura 4-5, cada uno tiene de un ciclo de 100s, cuatro de los cuales son para vehículos y dos para peatones.

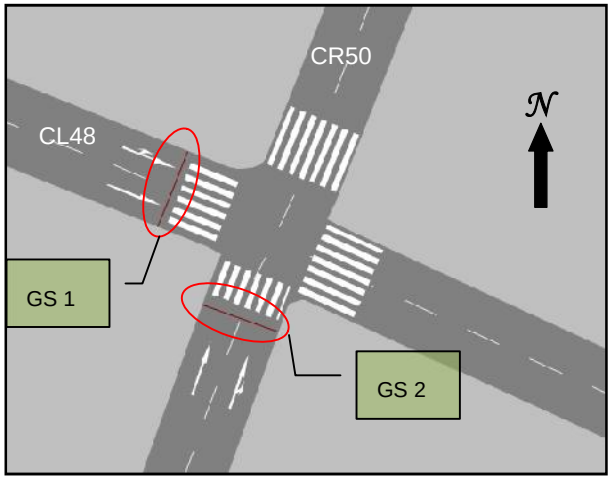
Figura 4-5: Controlador de señales intersecciones CR50CL48_49



Fuente: elaboración propia con base en información proporcionada por CIOS

De acuerdo a la información proporcionada por CIOS en dirección S-N se encuentra ubicada el grupo de señales 1 y en dirección O-E el grupo de señales 2. Cada grupo de señales cumple un ciclo de 100 s. Ver Figura 4-5 y Figura 4-6

Figura 4-6: Ubicación de los grupos de señales 1 y 2 de la intersección CR50CL48



Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Demanda vehicular (caso 1)

Asignación utilizada en VISSIM

VISSIM permite realizar asignación estática y asignación dinámica, la decisión de usar una u otra depende del tamaño de la red a modelar. La diferencia entre ambas radica en que en la estática el modelador le indica al programa la ruta que deben seguir los vehículos y la información de demanda vehicular que alimenta el programa es la que se obtiene de aforos realizados en la zona de estudio. Caso contrario ocurre con la asignación dinámica, en este caso la demanda es introducida a través de las matrices origen y destino, el programa asigna las rutas a través de una función de costos generalizados. Debido al tamaño de la red se optó por hacer asignación dinámica. Eso también permite tener una calibración más realista y no forzada, pero a la vez supone un reto de calibración mayor para que las elecciones de rutas del programa correspondan a las deseadas.

La demanda vehicular utilizada son las matrices OD modificadas con el inventario de parqueaderos. Ver Tabla 3-2 y Anexo 3. La demanda vehicular corresponde a los viajes realizados en vehículos livianos, motos, taxis y camiones.

En este programa las zonas se representan como "parking lot", es decir que un estacionamiento en la vía, elegido como zona, genera y atrae los viajes, los que son asignados en la infraestructura vial construida para viajar a otras zonas.

4.2.4 Productos

Son las representaciones gráficas de los indicadores y los videos que son generados al ejecutar los modelos. Estos son obtenidos después de haber hecho la calibración y validación de los modelos. Parámetros como velocidad de las vías, demoras, tiempo de viaje, capacidad, niveles de servicio pueden ser mostrados es esta etapa de la modelación.

4.3 Calibración de los modelos (caso 1)

El proceso de calibración busca que los modelos simulados estén lo más próximo posible a la realidad. Consiste en la aplicación de diferentes métodos que hacen una comparación entre datos reales (tomados en campo) respecto los valores arrojados por los simuladores. La calibración puede ser hecha con volúmenes vehiculares, velocidades medias y tiempos de viaje, la elección se hará de acuerdo a la información disponible o tomada en campo.

Existen diferentes métodos para la calibración de modelos, entre estos están: el indicador GEH, el error cuadrático medio RMSE (Root Mean Sqaured Error), el coeficiente de correlación o coeficiente de determinación R^2, etc. Debido a que se conocen datos de campo, conteos vehiculare y velocidades, en este trabajo se hace uso del indicador GEH y el R^2.

1. **Indicador estadístico GEH[3]:** Representa la bondad de ajuste de un modelo. Relaciona la diferencia absoluta y la diferencia porcentual entre los flujos

[3] GEH: llamado así en honor a su creador Geoffrey E. Havers.

observados y los modelados. Para un arco se calcula como se muestra en la ecuación (4.1) (Feldman, 2012)

$$GEH = \sqrt{\frac{2\ E - V\ ^2}{E + V}} \qquad (4.1)$$

Dónde:

E: Volumen estimado por el modelo

V: Datos de campo

Los criterios de aceptación para el indicador estadístico GEH, son mostrados en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Criterios de aceptación para el indicador estadístico GEH

Criterio y mediciones (valores modelados versus observados)	Aceptación de criterio
GEH estadístico < 5 para arcos individuales	> 85% de casos

Fuente: Dowling, Skabardonis, & Alexiadis (2004)

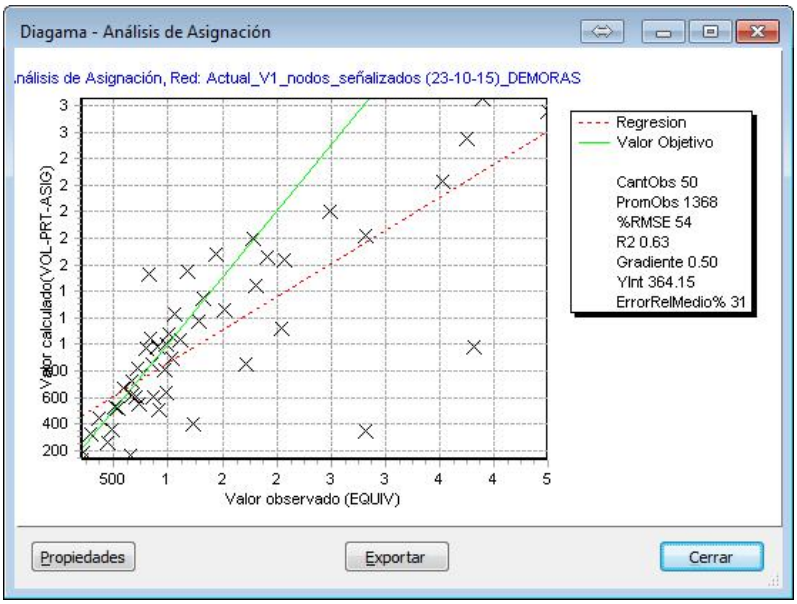
También es práctica común aceptar GEH con valores menores a 10.

2. **Coeficiente de correlación R^2:** Representa el grado de relación lineal entre dos conjuntos de datos, en este caso los observados contra los calculados por el software. Este coeficiente está programado por defecto en las hojas de cálculo y programas que ejecuten análisis estadístico. (FHWA, 2014b)

Calibración de la red en VISUM (caso 1)

Para hacer la calibración se tomaron los vehículos equivalentes, ya que ésta es la medida que utiliza VISUM para hacer sus asignaciones. Los aforos considerados corresponden a la hora pico de la tarde, que se dio entre las 17:15 y 18:15 pm. Ver Figura 4-7

Figura 4-7.Calibración por medio del coeficiente de correlación R^2 del modelo en VISUM (caso 1)



Fuente: Solarte Portilla (2015)

Solarte Portilla (2015) tomó una muestra de 50 arcos, tomando en consideración el flujo abundante de éstos y que tuvieran conteos realizados en campo. El resultado de este análisis de correlación muestra que un R^2.= 0.63 y un GEH de 68% de valores menores a 10, aunque 40% estuvieron por debajo de 5, y un 28% entre 5 y 10. Incluso hay un 8% más con valores entre 10 y 18. Estos valores pueden ser observados en la Figura 4-7 y Tabla 4-4.

Tabla 4-4: Calibración de la red construida en VISUM mediante el indicador GEH

No.	Intersección	Corredor	ID	Tramo	Sentido	Equiv. Aforo	Equiv. Visum	$GEH_{Equiv.}$	Chequeo Equiv.
1	CR51CL44	Bolílvar	CR 51	CL 44 - CL 41	N - S	1317	1307	0.3	OK
2			CR 51	CL 41 - CL 44	S - N	850	910	2.0	OK
3			CR 51	CL 44 - CL 45	S - N	902	960	1.9	OK
4		San Juan	CL 44	CR 50 - CR 51	E - W	3895	3029	14.7	Malo
5			CL 44	CR 52 - CR 51	W - E	3756	2676	19.0	Malo
6	CR51CL45	Amador	CL 45	CR 51 - CR 50	W - E	224	104	9.37	OK
7	CR51CL46	Bolívar	CR 51	CL 46 - CL 48	S - N	1061	937	3.92	OK
8		Maturín	CL 46	CR 51 - CR 50	W - E	652	161	24.35	Malo
9	CR51CL49	Bolívar	CR 51	CL 49 - CL 50	S - N	1443	1401	1.1	OK
10		Ayacucho	CL 49	CR 51 - CR 50	W - E	980	1147	5.1	OK
11	CR51Cl50	Colombia	CL 50	CR 50 - CR 51	E - W	1175	1276	2.89	OK
12	CR54CL45	Amador	CL 45	CR 55 - CR 54	W - E	729	486	9.86	OK
13			CL 45	CR 54 - CL 53	W - E	862	548	11.83	Malo
14	CR54CL46	Maturín	CL 46	CR 54 - CR 53	W - E	981	269	28.48	Malo
15	CR54CL48	Pichincha	CL 48	CR 53 - CR 54	E - W	206	152	4.04	OK
16			CL 48	CR 54 - CR 55	E - W	447	94	21.46	Malo
17	CR54CL49	Cúcuta	CR 54	CL 50 - CL 49	N - S	1803	1144	17.17	Malo
18		Ayacucho	CL 49	CR 55 - CR 54	W - E	2070	1651	9.71	OK

No.	Intersección	Corredor	ID	Tramo	Sentido	Equiv. Aforo	Equiv. Visum	$GEH_{Equiv.}$	Chequeo Equiv.
19	**CR54CL50**	**Cúcuta**	CR 54	CL 51 - CL 50	N - S	1784	1828	1.04	OK
20		**Colombia**	CL 50	CR 54 - CR 55	E - W	2493	2034	9.65	OK
21	**CR47CL52**	**Sucre**	CR 47	CL 53 - CL 52	N - S	1012	1050	1.18	OK
22	**CR50CL52**	**Sucre**	CR 50	CL 50 - CL 52	S - N	800	1082	9.19	OK
23		**Av. La Playa**	CL 52	CR 49 - CR 50	E - W	2041	1097	23.83	Malo
24			CL 52	CR 50 - CR 51	E - W	1912	1521	9.44	OK
25	**CR51CL52**	**Bolívar**	CR 51	CL 53 - CL 52	N - S	539	506	1.44	OK
26			CR 51	CL 52 - CL 53	S - N	968	722	8.46	OK
27	**CR54CL53**	**Cúcuta**	CR 54	CL 54 - CL 53	N - S	913	490	15.97	Malo
28			CR 54	CL 53 - CL 52	N - S	1286	1103	5.29	OK
29	**CR53CL54**	**Caracas**	CL 54	CR 42 - CR 43	E - W	477	366	5.41	OK
30	**CR46CL54**	**Oriental**	CR 46	CL 53 - CL 54	S - N	2818	354	61.87	Malo
31		**Caracas**	CL 54	CR 45 - CR 46	E - W	1035	902	4.27	OK
32			CL 54	CR 46 - CR 47	E - W	592	701	4.29	OK
33	**CR50CL54**	**Palace**	CR 50	CL 53 - CL 54	S - N	720	725	0.19	OK
34		**Caracas**	CL 54	CR 49 - CR 50	E - W	662	759	3.64	OK
35	**CR51CL41**	**Los Huesos**	CL 41	CR 51 - CR 52	E - W	512	753	9.58	OK
36			CL 41	CR 51 - CR 50	W - E	1107	869	7.57	OK
37	**CR51CL37**	**Bolívar**	CR 51	CL 38 - CL 37	N - S	707	549	6.30	OK
38			CR 51	CL 36 - CL 37	S - N	581	674	3.71	OK
39	**CR46CL47**	**Oriental**	CR 46	CL 48 - CL 47	N - S	3529	2246	23.88	Malo
40			CR 46	CL 45 - CL 47	S - N	3819	969	58.25	Malo
41		**Maturín**	CL 47	CR 49 - CR 47	W - E	1224	393	29.23	Malo
42	**CR53CL46**	**Cundinamarca**	CR 53	CL 45 - CL 46	S - N	364	383	0.98	OK
43	**CR50CL49**	**Palace**	CR 50	CL 48 - CL 49	S - N	821	1018	6.50	OK
44	**CR55CL50**	**Tenerife**	CR 55	CL 51 - CL 50	N - S	1517	1222	7.97	OK
45	**CR44CL41**	**Los Huesos**	CL 41	CR 44 - CR 45	E - W	669	642	1.05	OK
46			CR 44	CL 44 - CL 41	N - S	835	1089	8.19	OK
47	**CR55CL45**	**Tenerife**	CR 55	CL 46 - CR 45	N - S	289	179	7.19	OK
48	**CR57CL56**	**De Greiff**	CR 56	CL 55 - CL 57	S - N	2816	1770	21.84	Malo
49			CR 56	CL 57 - CL 58	S - N	4501	2714	29.75	Malo
50		**Glorieta**	CL 57	CL 54 - CL 57	E - W	1720	877	23.39	Malo

Fuente: elaboración propia con base en Solarte Portilla (2015)

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo son presentados los resultados de las demoras analizadas en los simuladores VISUM y VISSIM, con su respectivo análisis. En el primer apartado se presentan los resultados del caso 1, esto es para el centro de la ciudad de Medellín, y en el segundo apartado los resultados para un caso de una red hipotética (caso 2).

5.1 Resultados para el Centro de Medellín (caso 1)

5.1.1 Corredores analizados (caso 1)

La longitud lineal de las vías comprendidas en el área de estudio suma aproximadamente 110 km, jerarquizadas como arterias, colectoras y locales. Para hacer la comparación se decidió tomar 10 de las vías principales en las que hay mayor flujo vehicular, se contabilizó la cantidad de intersecciones semaforizadas, el número de paraderos de buses y la cantidad de carriles por calzada. Las características de los corredores evaluados se encuentran en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1: Resumen de características de los corredores evaluados

Corredor	Desde	Hasta	Longitud tramo (m)	No. de Intersecciones		No. paraderos de buses	No. de carriles	
				No Semaforizadas	Semaforizadas		Desde	Hasta
Cúcuta N-S	CL53	CL45	777	1	7	6	3	3
San Juan O-E (Deprimido)	CR53A	CR50	912	0	3	3	3	6
San Juan E-O (Deprimido)	CR50	CR53A	914	0	3	3	3	6
Carrera 51 S-N	CL44	CL51	722	1	6	6	2	3
Ave. de Greiff E-O	CR51	CR55	365	1	4	2	2	4
Ave. de Greiff S-N	CR55	CR57	393	2	1	0	2	2
Ave. Ayacucho O-E	CR56	CR46	959	1	9	0	2	3
Ave. Colombia E-O	CR56	CR50	623	2	7	12	3	4
Ave. La Oriental S-N	CL45	CL57	1080	0	10	23	4	4
Ave. La Oriental N-S	CL57	CL45	1089	1	10	22	2	4
		Total	7832	9	60	77		

Fuente: elaboración propia

5.1.2 Comparación de las Demoras (caso 1)

Para hacer la comparación de las demoras arrojadas por los dos simuladores, se toman como tramos de prueba los mencionados en la Tabla 5-1. Debido a que los tramos evaluados en toda la red son diferentes, hay sectores en que la sección cambia de tamaño y no pueden ser evaluados como homogéneos, entonces en la macro simulación se les asignó un parámetro de α y β diferente en las curvas VDF elegidas. Estos valores son mostrados en la Tabla 5-2 de acuerdo al tipo de vía, fueron usados en el estudio TPD (2014) y tomados de los diferentes estudios hechos en la ciudad de Medellín y otras ciudades colombianas.

El valor de c=1 indica que se toma la capacidad tal cual fue calculada para cada tipo de vía. Entre más pequeño sea el valor de c, mayor es la relación v/c, se dice entonces que representa un grado de congestión mayor.

Tabla 5-2: Valores de α y β utilizados en la modelación (caso 1)

Tipo de vía	Función	α	β	c
Tipo 1	BPR	0.55	1.95	1.00
Tipo 2	BPR	1.15	2.85	1.00
Tipo 3	Cónica	1.20	3.50	1.00
Tipo 4	Cónica	1.15	4.33	1.00
Tipo 5	Cónica	1.30	2.67	1.00

Fuente: TPD (2014)

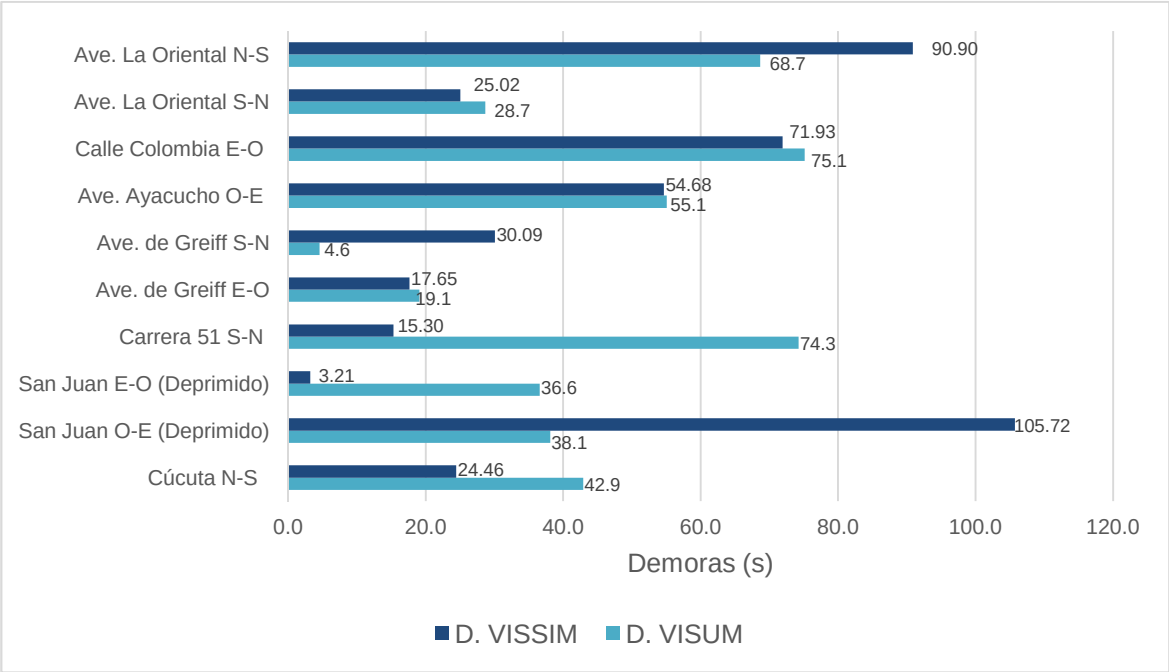
Debido a la forma de asignación de cada software, se pudo observar que VISUM asigna completamente la demanda de viajes en la red construida, sin embargo VISSIM siempre tiene un remanente de esa demanda, llamada “demanda latente”. Demanda latente, es la cantidad de vehículos que por diferentes motivos, no pudo ingresar a la red, al momento de la simulación se apunta a que esta demanda sea pequeña entre un 15% y 30% del total de viajes en las matrices.

Se hizo una serie de pruebas en ambos simuladores y la menor demanda latente que se obtuvo en VISSIM fue del 28%, por lo tanto para tener resultados congruentes en ambos simuladores, se afectaron las matrices de viajes en VISUM, disminuyendo en este porcentaje a estas matrices, se ejecutó de nuevo la asignación con VISUM y con los resultados de estas corridas se hizo la comparación con el VISSIM.

Para redes grandes y complejas como la que se intentó modelar, VISSIM tiene una serie de restricciones como cuando se intentó simular los vehículos estacionados en los costados de las vías y el modelo generaba colas justo detrás del último vehículo estacionado en el espacio destinado para eso. Esto le quitaba capacidad a la vía y por lo tanto genero mayor demanda latente. En las últimas pruebas se decidió quitarla del modelo.

Los resultados de las demoras producidas por ambos simuladores son mostrados en la Figura 5-1, en la que se aprecian pequeñas diferencias entre ambos resultados, no hay una tendencia en la que se pueda afirmar que una de ellas gobierna en los tramos.

Figura 5-1.Demoras calculadas por los simuladores VISSIM y VISUM, caso 1



Fuente: elaboración propia

Las diferencias significativas dependen de la magnitud de los números que se están comparando, se puede decir entonces que estas diferencias fueron mayores, porcentualmente hablando (más del 60%) en cinco tramos como son los de la calle San Juan en ambos sentidos y en el tramo de la Carrera 51 S-N, y en un sentido de la Avenida de Greiff, con diferencia en las demoras entre 30 segundos y un minuto, como se muestra en la Tabla 5-3. En los otros cinco tramos no existen diferencias apreciables.

Tabla 5-3: Resumen de valores de demoras evaluadas en los simuladores (caso 1)

Corredor	Demoras (s)		Diferencia absoluta
	VISUM	VISSIM	
Cúcuta N-S	42,9	24,46	18,47
San Juan O-E (Deprimido)	38,1	105,72	67,61
San Juan E-O (Deprimido)	36,6	3,21	33,40
Carrera 51 S-N	74,3	15,30	58,98
Ave. de Greiff E-O	19,1	17,65	1,44
Ave. de Greiff S-N	4,6	30,09	25,51
Ave. Ayacucho O-E	55,1	54,68	0,38
Calle Colombia E-O	75,1	71,93	3,19
Ave. La Oriental S-N	28,7	25,02	3,65
Ave. La Oriental N-S	68,7	90,90	22,21

Fuente: elaboración propia

5.1.3 Validación mediante prueba Test-t Student (caso 1)

Para hacer una verificación de la significancia que tiene los resultados entre los simuladores se hizo un análisis estadístico; Test-t Student para muestras independientes; que consiste en la comparación de dos muestras independientes, a través del planteamiento de una hipótesis nula y una alternativa. La ejecución de estas pruebas se hizo con el software estadístico "IBM SPSS Statistics", se tomaron en consideración los siguientes pasos y parámetros:

1. Planteamiento de Hipótesis

H_0: No existe diferencia significativa entre las demoras producidas por VISUM y las de VISSIM.

H_1: Existe diferencia significativa entre las demoras producidas por ambos simuladores

2. Nivel de significancia α=0.05, es decir un nivel de confianza del 95%
3. Prueba de normalidad e igualdad de varianzas. Debido a que el tamaño de la muestra es menor de 30 datos para la normalidad entre muestras se aplicó la prueba de Shapiro-Wilk (ver Tabla 5-4) y para la igualdad de varianzas se utilizó la prueba de Levene (ver Tabla 5-5).

Tabla 5-4: Valores obtenidos en la prueba de normalidad entre demoras producidas por los simuladores (caso 1).

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)				
Simulador	**p-valor**		**α**	**Aceptación**
VISUM	0,648	>	0,05	H_0 se acepta
VISSIM	0,186	>	0,05	H_0 se acepta

Fuente: elaboración propia

La comparación en la Tabla 5-4 de p-valor contra α indica que ambas muestras siguen una distribución normal.

Tabla 5-5: Valores de prueba de igualdad de varianzas entre demoras producidas por los simuladores (caso 1).

Igualdad de Varianzas (Levene)			
p-valor		α	Aceptación
0,126	>	0,05	H_0 se acepta (No existe diferencia de varianza)

Fuente: elaboración propia

Los resultados mostrados en la Tabla 5-5 de p-valor contra α indica que ambas muestras tienen varianzas iguales.

4. Cálculo y análisis de test-t Student para verificación de significancia.

Tabla 5-6: Valores de prueba Test-t Student para las demoras producidas por los simuladores (caso 1).

Test-t Student			
p-valor		α	Aceptación
0,975	>	0,05	H_0 se acepta

Fuente: elaboración propia

Después de observar el comportamiento de las muestras en cuanto a normalidad, igualdad de varianza y los resultados de la Tabla 5-6, se dice entonces que se acepta la hipótesis nula, planteada en el paso número 1 de este procedimiento. Se comprueba entonces que no hay una diferencia significativa entre los resultados de demoras arrojados por ambos simuladores.

5.2 Caso hipotético (caso 2)

5.2.1 Construcción de la red hipotética (caso 2)

Se planteó una red sencilla, cuyas calzadas tienen un sentido de circulación, con uno y dos carriles de 3.5 m. y con una demanda hipotética de viajes. Debido a las conversiones que sufren las matrices en ambos simuladores se decidió modelar solamente vehículos livianos y garantizar resultados similares. Un resumen de los aspectos considerados para este caso y en cada simulador son mostrados en la Tabla 5-7.

Tabla 5-7: Parámetros tomados para el (caso 2)

Parámetros	Valor
Tipo de vehículos	Livianos
Cantidad de carriles por calzada	1 y 2
Ancho de carril	3.5
Zonas	4

Fuente: elaboración propia

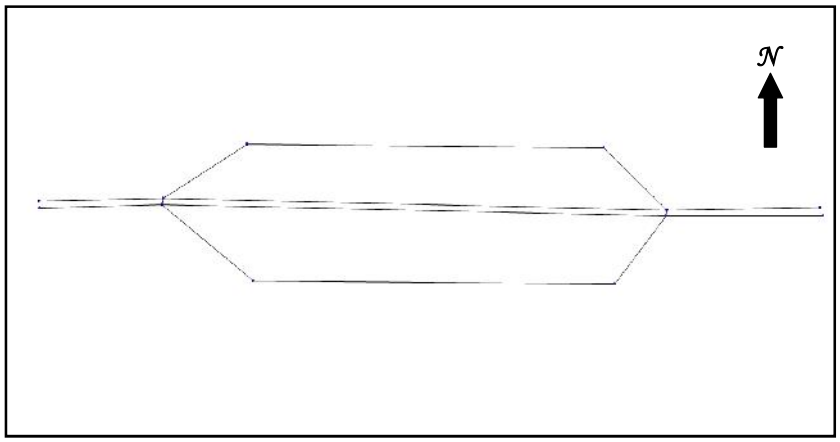
5.2.2 Construcción de la red en VISUM (caso 2)

La red en VISUM es construida como se presenta en la Figura 5-2, consta de 4 zonas, 12 nodos, 14 arcos, todos con un sentido de circulación, cada calzada tienen uno y dos carriles de 3.5m, la velocidad a flujo libre usada es de 45 km/h y la capacidad de 800 veh/hora para calzada con un carril y 1200 veh/hora para calzadas de dos carriles.

Para la determinación de los valores de α y β, parámetros útiles para la calibración de las funciones VDF, se hicieron varias pruebas verificando la variación en los tiempos de viaje

en cada arco. Se decidió utilizar la función BPR con $\alpha = 1$ y $\beta = 2$, que fueron los valores que mejor se adaptaron a la red modelada y también por ser valores que se han usado en ciudades colombianas cuando se tienen vías de un carril por sentido.

Figura 5-2. Red hipotética modelada en VISUM (caso 2)



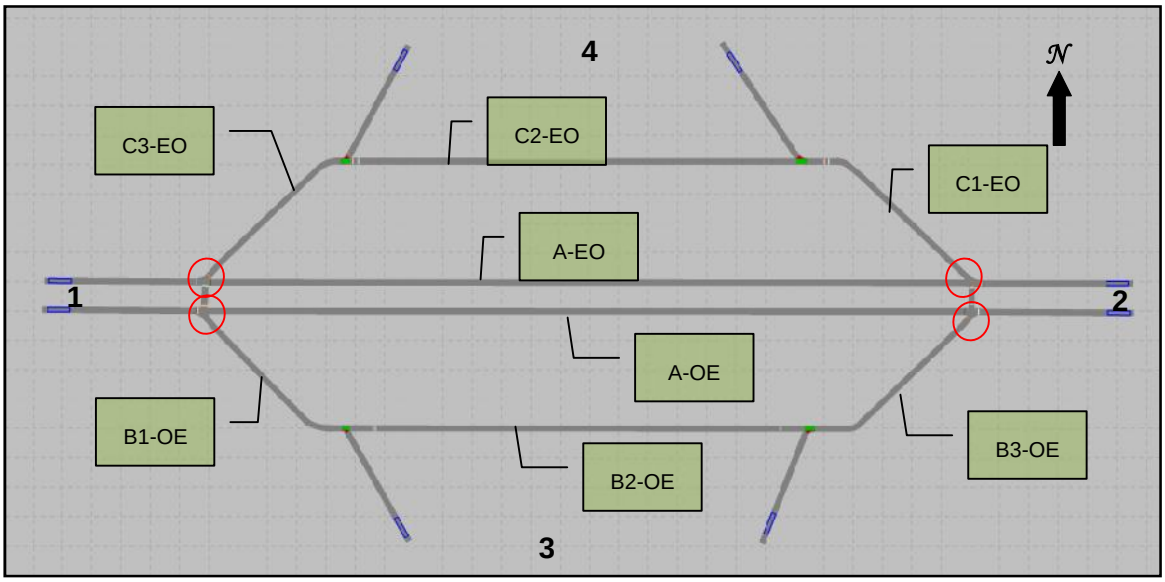
Fuente: elaboración propia

5.2.3 Construcción de la red en VISSIM (caso 2)

En VISSIM se construyó de manera similar que en VISUM, considerando cuatro zonas, 16 nodos, 16 arcos, con sus respectivas conexiones, todos los giros a la derecha son permitido, solamente en dos de los casos es permitido el giro a izquierda (para permitir la conexión a todas las zonas). La red en este caso no está semaforizada, se controlaron las intersecciones con señales de "PARE" y con la definición de áreas de conflicto, dando prioridad a las vías que dan acceso directo a los usuarios.

En la Figura 5-3 se observa la red construida en VISSIM, los círculos rojos, muestran la ubicación de las señales de "PARE". Además se evidencia el nombre de los arcos analizados en este caso. La misma nomenclatura es válida para la red en VISUM.

Figura 5-3. Red hipotética modelada en VISSIM (caso 2)



Fuente: elaboración propia

5.2.4 Demanda, simulación y validación de la red en ambos simuladores (caso 2)

La demanda vehicular para el caso hipotético se muestra en la Tabla 5-8 la cantidad de viajes en auto particular es de 777 viajes en una hora.

Tabla 5-8: Matriz de demanda vehicular (caso 2)

4x4	1	2	3	4
1	0	10	100	200
2	120	0	50	100
3	15	5	0	60
4	12	100	5	0

Fuente: elaboración propia

Para la aplicación de este caso hipotético se realizó la asignación en VISUM por el método del equilibrio con una VDF apropiada. Por ser una red hipotética, la calibración de la red en VISUM se hace con base en los volúmenes de VISSIM que realiza asignación dinámica, por ser más precisa. Se calcula una diferencia porcentual para cada valor de flujo, los mismos que son mostrados en la Tabla 5-9 junto a los flujos vehiculares asignados por los dos software.

Tabla 5-9: Flujos asignados por cada simulador y en cada arco evaluado y diferencia porcentual (caso 2)

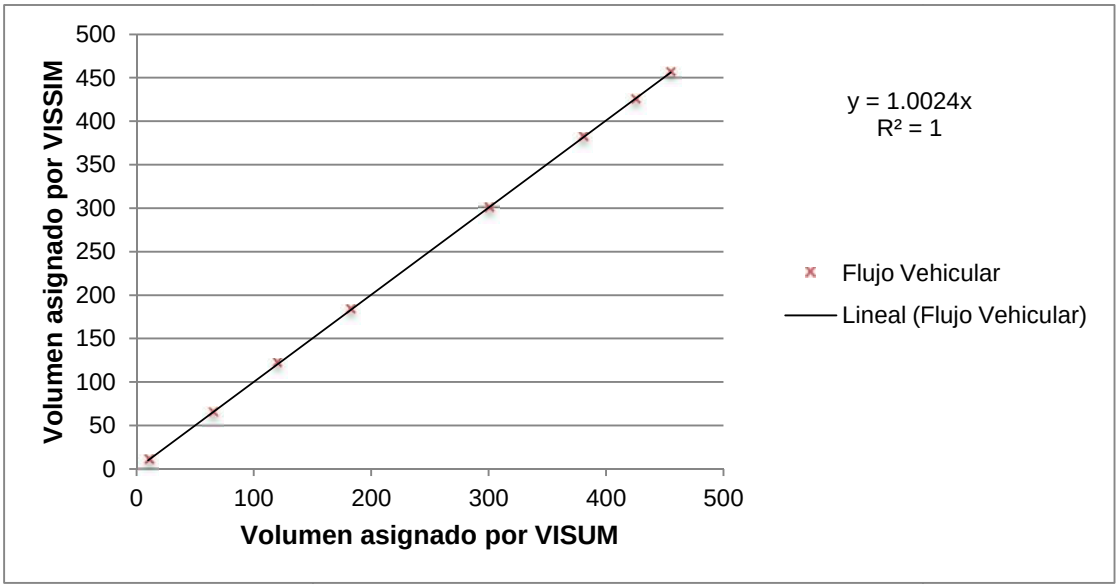
Arco evaluado	Flujo		Diferencia porcentual	GEH
	VISUM	VISSIM		
A-OE	10	10	0%	0,00
A-EO	120	121	1%	0,09
B1-OE	455	457	0%	0,09
B2-OE	300	300	0%	0,00

Arco evaluado	Flujo		Diferencia porcentual	GEH
	VISUM	VISSIM		
B3-OE	380	381	0%	0,05
C1-EO	425	425	0%	0,00
C2-EO	65	65	0%	0,00
C3-EO	182	183	1%	0,07

Fuente: elaboración propia

La gráfica mostrada en la Figura 5-4, evidencia una correlación R^2=1.0 existente entre cada uno de los flujos asignados por VISSIM y VISUM.

Figura 5-4. Correlación entre flujos vehiculares para ambos simuladores (caso 2)



Fuente: elaboración propia

A simple vista se podría afirmar que los flujos son iguales y que por lo tanto los valores son confiables, sin embargo se aplicó una prueba Test-t Student para muestras independientes para hacer esta verificación. Se utilizó el mismo procedimiento usado en la sección 5.1.3 de la que obtuvieron los siguientes resultados:

1. Planteamiento de Hipótesis

H_0: No existe diferencia significativa entre los flujos asignados por VISUM y los asignados por VISSIM.

H_1: Existe diferencia significativa entre los flujos vehiculares asignados por ambos simuladores

2. Nivel de significancia α=0.05, es decir un nivel de confianza del 95%
3. Prueba de normalidad e igualdad de varianzas.

Tabla 5-10: Valores obtenidos en la prueba de normalidad entre volúmenes asignados por los simuladores (caso 2).

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)				
Simulador	**p-valor**		**α**	**Aceptación**
VISUM	0,470	>	0,05	H_0 se acepta
VISSIM	0,483	>	0,05	H_0 se acepta

Fuente: elaboración propia

La comparación en la Tabla 5-10 de p-valor contra α indica que ambas muestras siguen una distribución normal.

Tabla 5-11: Valores de prueba de igualdad de varianzas entre volúmenes asignados por los simuladores (caso 2).

Igualdad de Varianzas (Levene)			
p-valor		α	Aceptación
0,997	>	0,05	H_0 se acepta

Fuente: elaboración propia

Los resultados mostrados en la Tabla 5-11 de p-valor contra α indica que ambas muestras tienen varianzas iguales.

4. Cálculo y análisis de test-t Student para verificación de significancia.

Tabla 5-12: Valores de prueba Test-t Student para validación de volúmenes asignados por los simuladores (caso 2).

Test-t Student			
p-valor		α	Aceptación
0,994	>	0,05	H_0 se acepta

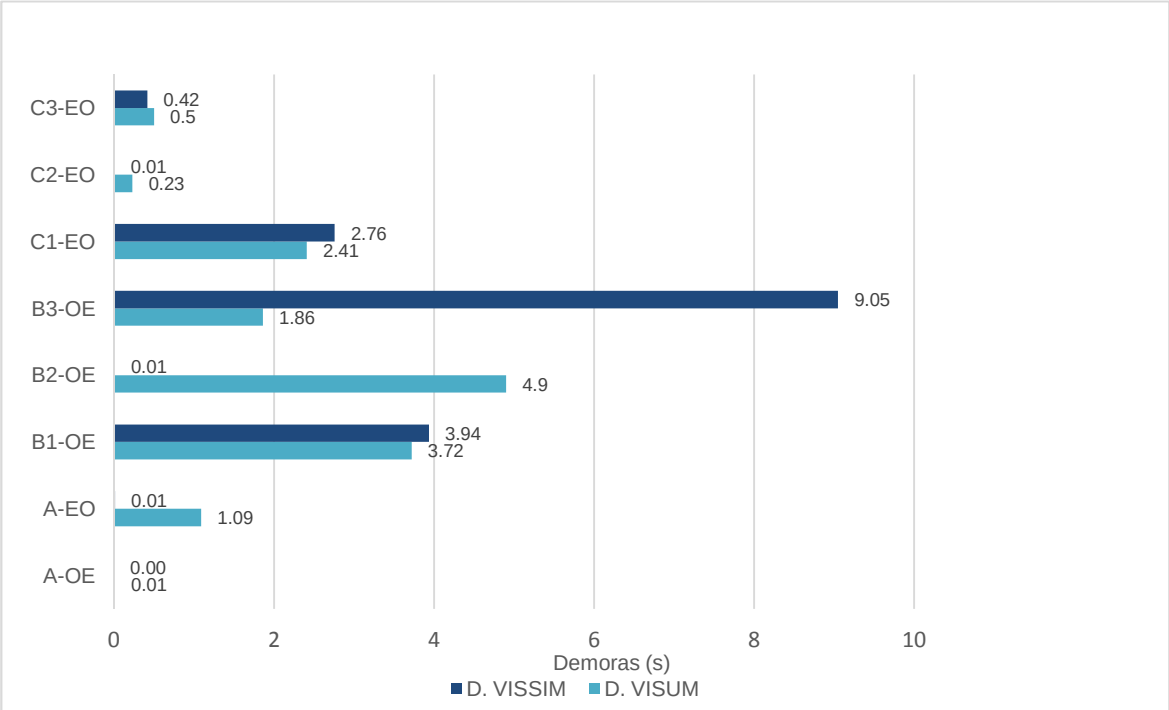
Dado que p-valor es mayor que 0.05 se asume entonces que hay igualdad entre los flujos asignados por ambos programas (ver Tabla 5-12)

5.2.5 Comparación de las Demoras (caso 2)

Los arcos analizados en este caso en ambos simuladores son mostrados en la Figura 5-3. Los arcos tipo A, pertenecen a los movimientos directos desde Oeste a Este en la red y viceversa, los tipo B, son lo que están ubicados en la parte inferior de la figura y los tipo C, se localizan en la parte superior de la red hipotética.

Las demoras arrojadas por cada simulador son mostradas en la Figura 5-5, encontrándose que en cuatro tramos no hay diferencias relevantes entre simuladores.

Figura 5-5.Demoras calculadas por los simuladores VISSIM y VISUM, caso 2



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5-13 se observan las demoras obtenidas de los simuladores, al igual que en el caso 1 no hay una tendencia para afirmar que en todos los tramos evaluados, los resultados de uno de los simuladores predomina sobre el otro.

Tabla 5-13: Demoras obtenidas de los simuladores (caso 2)

Arco evaluado	Demoras (s)		Diferencia absoluta
	VISUM	VISSM	
A-OE	0,0	0,0	0,0
A-EO	1,1	0,0	1,1
B1-OE	3,7	3,9	0,2
B2-OE	4,9	0,0	4,9
B3-OE	1,9	9,0	7,2
C1-EO	2,4	2,8	0,3
C2-EO	0,2	0,0	0,2
C3-EO	0,5	0,4	0,1

Fuente: elaboración propia

Al igual que en el caso 1, hay dos tramos en los que hay dos tramos del corredor B, en las que uno es mayor para los resultados de VISSIM y el otro para los resultados en VISUM.

Analizando la matriz de viajes y la cantidad de viajes que se movilizan en este tramo y la señal de “PARE” que existe en esta calle, es posible explicar las demoras altas en este tramo.

5.2.6 Validación mediante prueba Test-t Student (caso 2)

La validación se hizo uso del procedimiento utilizado en el ítem 5.1.3

1. Planteamiento de Hipótesis

H_0: No existe diferencia significativa entre las demoras producidas por VISUM y las de VISSIM.

H_1: Existe diferencia significativa entre las demoras producidas por ambos simuladores

2. Nivel de significancia α=0.05, es decir un nivel de confianza del 95%
3. Prueba de normalidad e igualdad de varianzas.

Tabla 5-14: Valores obtenidos en la prueba de normalidad entre demoras producidas por los simuladores caso 2.

Prueba de normalidad (Shapiro-Wilk)				
Simulador	**p-valor**		**α**	**Aceptación**
VISUM	0,40	>	0,05	H_0 se acepta
VISSIM	0,44	>	0,05	H_0 se acepta

Fuente: elaboración propia

La comparación en la Tabla 5-14 de p-valor contra α indica que ambas muestras siguen una distribución normal.

Tabla 5-15: Valores de prueba de igualdad de varianzas entre demoras producidas por los simuladores caso 2.

Igualdad de Varianzas (Levene)			
p-valor		α	Aceptación
0,191	>	0,05	H_0 se acepta

Fuente: elaboración propia

Los resultados mostrados en la Tabla 5-15 de p-valor contra α indica que ambas muestras tienen varianzas iguales.

4. Cálculo y análisis de test-t Student para verificación de significancia.

Tabla 5-16: Valores de prueba Test-t Student para las demoras producidas por los simuladores caso 2.

Test-t Student			
p-valor		α	Aceptación
0,888	>	0,05	H_0 se acepta

Fuente: elaboración propia

De los resultados obtenidos en la Tabla 5-14 y Tabla 5-15 en las que se aceptó el comportamiento normas de las muestras y la igualdad de varianzas y complementando con los resultados de la Tabla 5-16 se dice entonces que se puede aceptar la hipótesis nula para el caso 2, asumimos entonces que los datos son similares.

Para ambos casos el comportamiento fue similar, no encontrándose una tendencia clara en el cotejo de resultados entre el par de programas, por esta razón no es posible encontrar un factor de escala que convierta los resultados entre simuladores; dando lugar al **rechazo** de la hipótesis en la que se basó esta investigación.

6. CONCLUSIONES

1. No se encontró un factor de escala entre las demoras de un micro simulador y la de un macro simulador. Las demoras no son significativamente diferentes en forma general, y cuando hay diferencias no siempre las del micro simulador son mayores, como se asumió al inicio de esta investigación.
2. El nivel de ajuste depende mucho de los grados de calibración y validación de cada software, lo cual es todo un reto cuando la calidad de la información de movilidad presenta inconvenientes de sincronía entre matrices, aforos, días de los estudios, y suposiciones de comportamiento de los usuarios.
3. Los aforos vehiculares, tomados en campo, que se utilizan para la calibración del modelo en el micro simulador deben contar con una planificación adecuada al momento de ser ejecutados, tratando de tomar el mismo día la información de las intersecciones con las que se calibrará, ya que el comportamiento del tráfico por diferentes razones no se comporta igual todos los días. De igual manera se debe hacer con la toma de velocidades y tiempos de viaje, si la calibración se hace con estos elementos. Esto mejoraría los grados de ajuste en la calibración y validación de los macro simuladores y micro simuladores.
4. En los modelos de macro simulación es imprescindible calibrar los parámetros de α y β o los parámetros que solicite la función Volumen Demora (VDF) elegida, dado que el cálculo del tiempo de viaje de los tramos es afectado directamente por estos parámetros, y un mal uso de estos provocaría imprecisión en los resultados.
5. Las restricciones en la vía (un semáforo, una señal de “PARE”) afectan considerablemente el cálculo de las demoras en VISSIM, por lo que deben ser cuidadosamente ubicados en el micro simulador.
6. La demanda latente en VISSIM que no se asigna está en torno al 15 a 30% de los viajes, lo cual podría deberse a que las vías fueron modeladas en el caso 1 (real), con las medidas y cantidad de carriles como se encuentran operando en la realidad. Deberá hacerse pruebas en las que en caso de que dos carriles se usen como si fueran tres por parte de los usuarios de la red, se le aumente la cantidad de carriles y observar el comportamiento. Sin embargo, esto no estaría acorde a la realidad legal que es lo que se busca con el uso de los simuladores al momento de implementar acciones o políticas de tránsito y transporte.
7. Es de resaltar la importancia que tiene hacer un adecuado levantamiento de los estacionamientos de una zona céntrica o comercial como la modelada, ya que de ello depende la finura de la determinación de las zonas de producción y atracción de viajes para el modelo de asignación. Asimismo, es importante en la definición de la red de micro simulación el levantamiento de las rutas de buses, su recorrido y paraderos dentro de la zona de estudio.
8. Para la modelación de una red grande, basta con la simulación en el macro simulador y modelar solamente zonas conflictivas en el micro simulador, ya que la información

necesaria para la calibración en este último debe ser precisa y no siempre se cuenta con ella. La cantidad de información necesaria para un micro simulador puede ser de tres a cuatro veces la de un macro simulador y el tiempo de calibración también.

Recomendaciones y trabajos futuros:

Es importante seguir ahondando en la diferencia en las demoras arrojadas por los macro simuladores respecto a los micro simuladores con el fin de tener herramientas capaces de evaluar diferentes políticas a implementar como una nueva política de precios de estacionamientos, la implantación de un carril solo motos o un carril solo bus.

En futuros trabajos es necesario afinar el impacto de la localización de estacionamientos en la vía, ya que su comportamiento es difícil de modelar y requiere de un trabajo previo de campo para determinar el patrón de uso de esos estacionamientos.

También se requiere que en futuros trabajos analizar más en detalle la demanda latente arrojada por los micro simuladores para ajustar en correspondencia las matrices de los macro simuladores con los que se compara.

Se propone en trabajos futuros realizar un análisis de peatones en el modelo de micro simulación ya construido, teniendo en cuenta que el peatón es parte integral del sistema de movilidad de las ciudades.

Se recomienda realizar en ambos simuladores un análisis de emisión de contaminantes que brinde pautas para el control de este problema que tanto daño le causa al ambiente.

Se propone incluir un escenario de red con el tranvía de Ayacucho en el centro de la ciudad de Medellín, ya que por ir a nivel supondrá cambios en el tránsito de las vías adyacentes.

BIBLIOGRAFÍA

Akçelik, R. (1991). *Travel time functions for transport planning purposes: Davidson's function, its time dependent form and alternative travel time function.* Australian Road Research, 21(3), 49–59. Retrieved from http://arrbknowledge.com

Alcaldía de Medellín. (2010). Resolucion 1875 de 2010. *Operación de las Zonas de Estacionamiento Regulado*. Medellín.

Alcaldía de Medellín. (2015). *MapGis.* Retrieved November 15, 2015, from https://www.medellin.gov.co/MapGIS/web/swf/MAPGIS_FLEX.jsp

Anoniou, C., Balakrishna, R., Barceló, J., Ben-Akiva, M., Casas, J., Choudhury, C., … Yang, Q. (2010). *Fundamentals of traffic simulation.* (J. Barceló, Ed.)International Series in Operations Research & Management Science Introduction (Vol. 145). Springer Science+Business Media, LLC 2010. http://doi.org/Doi 10.1007/978-1-4419-1642-6

Arbeláez Arenas, Ó. E. (2015). *Modelación de la elección de la bicicleta pública y privada en ciudades.* Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2007). *Formulación del plan maestro de movilidad para la región del Valle de Aburrá.* Medellín.

Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2012). *Encuesta Origen-Destino a hogares del Valle de Aburrá.*

Babin, A., Florian, M., James-Lefebvre, L., & Spiess, H. (1981). *EMME/2 An interactive graphic method for road and transit planning*. In RTAC Annual Conference Preprints (Vol. 1).

Benekohal, R. F., & Treiterer, J. (1988). CARSIM: *Car-following model for simulation of traffic in normal and stop-and-go conditions.* Transportation Research Record, (1194), 99–111.

Bloomberg, L., & Dale, J. (2000). *A Comparison of the VISSIM and CORSIM Traffic Simulation Models*. Institute of Transportation Engineers Annual Meeting, 98104(August), 1–16.

Boxill, S. A., & Yu, L. (2000). *An evaluation of traffic simulation models for supporting ITS development.* Report No. SWUTC/00/167602-1. Texas.

Braban-Ledoux, C. (2000). METACOR – *A macroscopic modelling tool for corridor application to the Stockholm test site.* Final report. Stockholm. Retrieved from http://www.ctr.kth.se/publications/ctr2000_05.pdf

Brackstone, M., & McDonald, M. (1999). *Car-following: a historical review.* Transportation

Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2(4), 181–196. http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1369-8478(00)00005-X

Branston, D. (1976). *Link capacity functions: A review*. Transportation Research, 10(4), 223–236. http://doi.org/10.1016/0041-1647(76)90055-1

Bureau of Public Roads. (1964). Traffic assignment manual. US Department of Commerce.

Caliper Corparation. (2015). *Transmodeler Introduction.* Retrieved from http://www.caliper.com/transmodeler/descripcion.htm

Castillo, E., Calviño, A., Sánchez-Cambronero, S., & Lo, H. K. (2013). *A multiclass user equilibrium model considering overtaking across classes. Journal of Intelligent Transportation Systems,* 14(2), 928–942. Retrieved from http://ph3xs4fh4h.scholar.serialssolutions.com/?sid=google&auinit=E&aulast=Castillo&atitle=A+Multiclass+User+Equilibrium+Model+Considering+Overtaking+Across+Classes&id=doi:10.1109/TITS.2013.2247041&title=IEEE+transactions+on+intelligent+transportation+sys

Córdoba, J. E., & Jaramillo, G. P. (2012). *Inclusion of the Latent Personality Variable in Multinomial Logit Models Using the 16pf Psychometric Test.* Procedia - Social and Behavioral Sciences, 54, 169–178. http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.736

Daganzo, C. F. (1995). *Requiem for second-order fluid approximations of traffic flow.* Transportation Research Part B: Methodological, 29(4), 277–286.

Davidson, K. B. (1966). *A flow travel time relationship for use in transportation planning.* Australian Road Research Board (ARRB) Conference, 3(1), 183–94. Retrieved from http://trid.trb.org/view/1209266

de Palma, A., Marchal, F., & Nesterov, Y. (1997). *METROPOLIS: Modular system for dynamic traffic simulation.* Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1607, 178–184. http://doi.org/10.3141/1607-24

Del Castillo Granados, J. M. (1994). *Una Teoría de Seguimiento entre Vehículos (A Theory of Car-Fllowing),* PhD Disertation. Universidad de Sevilla.

Deutsche Well. (2012). *Un mundo acelerado.* Retrieved October 8, 2015, from http://www.dw.com/es/un-mundo-acelerado/a-16399649

Dijker, T., & Knoppers, P. (2004). *Fosim 5.0 user manual. Technical Pecification Report,* Delft University of Technology, Transport and Planning Department.

Dowling, R., Skabardonis, A., & Alexiadis, V. (2004). *Traffic Analysis Toolbox Volume III : Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software.* Rep. No. FHWA-HRT-04-040, U.S. DOT, Federal Highway Administration, Washington, D.C, III(July), 146.

Feldman, O. (2012). *The GEH measure and quality of the highway assignment models*. In European Transport Conference, At Glasgow. London: ResearchGate. Retrieved from http://www.researchgate.net/publication/263140653_THE_GEH_MEASURE_AND_QUALITY_OF_THE_HIGHWAY_ASSIGNMENT_MODELS

FHWA, F. H. A. (2003). *Managing travel for planned special events. Washington, D.C.* Retrieved from http://ops.fhwa.dot.gov/publications/fhwaop04010/chapter6.pdf

FHWA, F. H. A. (2004). *Traffic Analysis Toolbox Volume II: Decision support methodology for selecting traffic analysis tools*. Report No. FHWA-HRT-04-039 (Vol. II). Washington, D.C. Retrieved from http://trid.trb.org/view.aspx?id=794928

FHWA, F. H. A. (2014a). *Delay-Volume relations for travel forecasting: based on the 1985 Highway Capacity Manual.* Retrieved from http://www.fhwa.dot.gov/planning/tmip/publications/other_reports/delay_volume_relations/ch04.cfm

FHWA, F. H. A. (2014b). *Travel Model Validation and Reasonableness Checking Manual - Second Edition. EEUU.* Retrieved from http://www.fhwa.dot.gov/planning/tmip/publications/other_reports/validation_and_reasonableness_2010/ch09.cfm

FHWA, F. H. A. (2015). *Highway history.* Retrieved from https://www.fhwa.dot.gov/highwayhistory/interstate.cfm

FONVAL. (2012). *Variación de accesibilidad y movilidad en el Poblado por obras de valorización.* Medellín.

Gao, W., Balmer, M., & Miller, E. (2010). *Comparison of MATSim and EMME/2 on greater Toronto and Hamilton area network,* Canada. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2197), 118–128.

Gazis, D. C., Herman, R., & Potts, R. B. (1959). *Car-following theory of steady-state traffic flow.* Operations Research, 7(4), 499–505.

Helly, W. (1959). *Simulation of bottlenecks in single-lane traffic flow. In In Proceedings of the Symposium on Theory of Traffic Flow.* Research Laboratories, General Motors (pp. 207–238). New York: Elsevier.

Irwin, N. A., Dodd, N., & Von Cube, H. G. (1961). *Capacity restraint in assignment programs.* Highway Research Board Bulletin, (279), 109–127.

Jayakrishnan, R., Mahmassani, H. S., & Hu, T.-Y. (1994). *An evaluation tool for advanced traffic information and management systems in urban networks.* Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2(3), 129–147.

Kikuchi, S., & Chakroborty, P. (1992). *Car-following model based on fuzzy inference system.* Transportation Research Record, (1365), 82–91.

Kometani, E., & Sasaki, T. (1958). *On the stability of traffic flow (report-I).* Operations Research Japan, 2(1), 11–26. Retrieved from http://www.orsj.or.jp/~archive/pdf/e_mag/Vol.02_01_011.pdf

Kwon, E., Kota, R., Coyle, M., Michalopoulos, P., & Song, S. (1997). *Enhancement of the simulation package and database for geometric, planning, operations an traffic management in freeway networks/corridors (Phase III).* Final Report. Minnesota.

Lee, J. J., & Jones, J. H. (1967). *Traffic dynamics: visual angle car following models.* Traffic Engineering & Control, 8(8), 348–350.

Lighthill, M. J., & Whitham, G. B. (1955). *On Kinematic Waves. II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads.* Proceedings of the Royal Society of London A:

Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 229(1178), 317–345. Retrieved from http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/229/1178/317.abstract

Lim, Y., Nam, D., Kang, M., & Choi, C. (2007). *A parameter calibration technique for travel cost function in traffic assignment*. Proceedings of the Eastern Asis Society for Transportation Studies, 6.

Lohse, D., Teichert, H., Dugge, B., & Bachnner, G. (1997). *Ermittlung von verkehrsströmen mit n-linearen gleichungssystemen-Verkerhsnachfragemodellierung.* Scientific Series of Institut Für Verkerhrplanung Und Strabenverkerhr of TU Dresden, 5, 102.

Márquez, L., García, D. E., & Guarín, L. C. (2015). *Funciones volumen-demora BPR y cónica en vías multicarriles de Bogotá.* Revista de Ingeniería. Universidad de Los Andes, 30–39. http://doi.org/http://dx.doi.org/10.16924/riua.v0i41.674

Medellín, A. de. (2015). *MapGIS.* Retrieved from https://www.medellin.gov.co/MapGIS/web/swf/MAPGIS_FLEX.jsp

Michaels, R. M. (1963). *Perceptual factors in car following.* In In Proceedings of the 2nd International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow (pp. 44–59). Paris.

Mosher Jr, W. W. (1963). *A capacity-restraint algorithm for assigning flow to a transport network.* Highway Research Record, (6), 41–70.

Ortúzar, J. D. D., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling Transport. Modelling Transport (Fourth).* John Wiley and Sons, Ltd. http://doi.org/10.1002/9781119993308

Ortúzar, J. de D., & Willumsen, L. G. (2008). M*odelos de Transporte (Español).* Santander, España: Publican-Ediciones de la Universidad de Cantabria.

Overgaard, K. R. (1967). *Urban transportation planning, traffic estimation.* 21(2), 197–218. Retrieved from http://trid.trb.org/view.aspx?id=119965

Patriksson, M. (1994). *The Traffic Assignment Problem: Models and Methods.* Annals of Physics. Linköping. Retrieved from http://www.mendeley.com/research/no-title-avail/\nhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:the+traffic+assignment+problem+-+models+and+methods#0

Pozueta Echavarri, J. (2008). *La experiencia internacional de peajes urbanos.* Cuadernos de Investigación Urbanística, (58), 4–112.

Prevedouros, P. D., & Wang, Y. (1999). *Simulation of Large Freeway and Arterial Network with CORSIM, INTEGRATION, and WATSim.* Transportation Research Record. Honolulu.

PTV AG. (2014a). *PTV VISSIM 7 User Manual.* (PTV AG, Ed.). Karlsruhe, Germany: PTV AG.

PTV AG. (2014b). *PTV VISUM 14 Manual.* Karlsruhe: PTV AG.

PTV Group. (2011). *VISSIM 5.30-05 User Manual (5.3 ed.).* Karlsruhe: Planun Transport Verkehr AG.

Radelat Egües, G. (1994). *Notas sobre simulación pragmatica de tránsito*.

Ramírez Rodríguez, M. (1995). *Algoritmos para la asignación vehículos del transporte urbano.* Ciencias Aplicadas, 2(3), 345–351.

Roda, P., Perdomo, F., & Sánchez, J. (2012). *Conectividad interurbana. Informe final.* Bogotá.

Secretaria de Movilidad de Medellín. (2013). *Sistema Inteligente de Movilidad de Medellín.*

Sheffi, Y. (1985). *Urban transportation networks.* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Sheffi, Y., Mahmassani, H., & Powell, W. B. (1982). *A transportation network evacuation model*. Transportation Research Part A: General, 16(3), 209–218.

Si, B., Zhong, M., & Gao, Z. (2008). *Link resistance function of urban mixed traffic network.* Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 8(1), 68–73. http://doi.org/10.1016/S1570-6672(08)60011-2

Smulick, J. (1961). *A mathematical model for traffic assignment.*

Solarte Portilla, J. J. (2015). *Variación del nivel de servicio de las vías urbanas en una zona con tarifa de cobro por congestión para autos particulares.* Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

Soltman, T. J. (1966). *Effects of alternate loading sequences on results from Chicago trip distribution and assignment model.* Highway Research Record, (114), 122–140.

Spiess, H. (1990). *Conical Volume-Delay Functions.* Transportation Science, 24(2), 153–158. http://doi.org/10.1287/trsc.24.2.153

Steenbrink, P. A. (1974). *Optimization of transport networks.* New York: J. Wiley and Sons Limited.

Steer Daves Gleave. (2011). *Estudio de accesibilidad y movilidad- Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.* Medellín.

Suárez Castaño, L. A. (2007). *Análisis y evaluación operacional de intersecciones urbanas mediante microsimulación*. Universidad Nacional de Colombia.

Suh, S., Park, C.-H., & Kim, T. J. (1990). *A highway capacity function in Korea: Measurement and calibration.* Transportation Research Part A: General, 24(3), 177–186. http://doi.org/10.1016/0191-2607(90)90055-B

Szeto, W., & Lo, H. (2006). *Dynamic traffic assignment: properties and extensions.* Transportmetrica, 2(1), 31–52. http://doi.org/10.1080/18128600608685654

Thomson, I., & Bull, A. (2002). *La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias economicas y sociales.* Revista de La Cepal, 76(10), 109– 121.

Tian, Z., & Urbanik, T. (2002). *Variations in capacity and delay estimates from microscopic traffic simulation models.* … Record: Journal of the …, 1802, 23–31. http://doi.org/10.3141/1802-04

TPD Ingeniería S.A. (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*. Medellín.

Transportation Research Board. (2000). *Highway Capacity Manual 2000*. Transportation Research Board.

TRL. (2015). *TRL our history.* Retrieved from http://www.trl.co.uk/about-us/our-history/

TTS. (2015). *Transportation Simulation Systems.* Retrieved April 24, 2016, from https://www.aimsun.com/aimsun/new-features/

Universidad Nacional de Colombia, & Quibdó Centro Mundial de la Biodiversidad. (2013). *Plan integral de movilidad del municipio de Quibdó, Chocó.* Quibdó.

Universidad Pedagógica y Tecnolólgica de Colombia. (2012). *D. Modelo de transporte. Herramienta de transporte terrestre urbano de pasajeros y carga. Simulación del efecto de proyectos de infraestructura y políticas de transporte.* (p. 70). Tunja. Retrieved from http://tunja-boyaca.gov.co/apc-aa-files/3030656536336137623735373331653 4/d_modelo-de-transporte.pdf

Wardrop, J. G. (1952). *Some theoretical aspects of roads traffic research.* Proceedings of the Intitution of Civil Engineers, Part II(1), 325–362.

Wiedemann, R. (1974). *Simulation des Straßenverkehrsflusses.* Institut Für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe.

Yang, Q., & Koutsopoulos, H. N. (1996). *A Microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management system.* Transport Research-C. Great Britain: Elsevier Science Ltd. http://doi.org/10.1016/S0968-090X(96)00006-X

ANEXOS

Todos los anexos de este trabajo están en formato digital, se listan a continuación:

1. Ciclos semafóricos de la red real (caso 1)
2. Análisis de estacionamientos por zonas Sit.
3. Matrices de demanda de viajes para el macro simulador VISUM
4. Matrices de demanda de viajes para el micro simulador VISSIM