

**ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE UNA RED VANET PARA UN MODELO
DE MOVILIDAD ADAPTADO A LA CIUDAD DE POPAYÁN**



**Javier Eduardo Zúñiga
Wilson Enrique Rodríguez**

**Director
Ing. Víctor Fabián Miramá Pérez**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación de Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitecturas de Telecomunicaciones
Popayán, Marzo de 2014**

**ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE UNA RED VANET PARA UN MODELO
DE MOVILIDAD ADAPTADO A LA CIUDAD DE POPAYÁN**



Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones

**Javier Eduardo Zúñiga Muñoz
Wilson Enrique Rodríguez Álvarez**

**Director
Ing. Víctor Fabián Miramá Pérez**

**Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Línea de Investigación de Gestión Integrada de Redes, Servicios y
Arquitecturas de Telecomunicaciones
Popayán, Marzo de 2014**

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS REDES VEHICULARES	3
1.1. COMUNICACIÓN EN REDES VEHICULARES	3
1.1.1. Componentes	3
1.1.2. Tipos de comunicación	5
1.1.3. Dominios de comunicación en redes vehiculares.....	6
1.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES VEHICULARES.....	7
1.3. TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS EN REDES VANET.....	8
1.3.1. Redes de telefonía celular	8
1.3.2. WIMAX	8
1.3.3. IEEE 802.11 a/b/g.....	8
1.3.4. Acceso inalámbrico en ambientes vehiculares (WAVE, Wireless Access for Vehicular Environment).....	9
1.4. APLICACIONES PARA VANET	11
1.4.1. Aplicaciones de entretenimiento y/o bienestar	11
1.4.2. Aplicaciones de Seguridad.....	11
1.5. CAPACIDAD EN REDES DE COMUNICACIÓN.....	12
1.5.1. Capacidad en redes vehiculares	13
2. CAPÍTULO II. MODELO DE MOVILIDAD	15
2.1. MODELOS DE MOVILIDAD PARA REDES VANET	15
2.2. MODELO DE MOVILIDAD DE KRAUSS	16
2.2.1. Ecuaciones del modelo.....	19
2.2.2. Variables fundamentales en el modelo de Krauss	20
3. CAPÍTULO III. PROCESO DE ADAPTACIÓN DEL MODELO DE MOVILIDAD	21
3.1. ADAPTACIÓN DEL MODELO DE MOVILIDAD DE KRAUSS.....	22
3.1.1. Proceso de observación	22
3.1.2. Elección del sector.....	25
3.1.3. Estudio de Tráfico en el sector.....	27
3.1.4. Adaptación del modelo de movilidad.....	30
4. CAPÍTULO IV. EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
4.1. SOFTWARE PARA LA SIMULACION DE REDES VANET	49
4.1.1. Clasificación de los simuladores para redes VANET.....	49
4.1.2. Herramientas para la simulación de redes VANET	51
4.1.3. Elección del entorno de simulación.....	52
4.2. IMPLEMENTACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO ADAPTADO.....	54
4.3. SIMULACIÓN DE UNA RED VANET EN OMNET++	57
4.4. ESCENARIO DE SIMULACIÓN	58
4.4.1. Construcción de los escenarios de simulación.....	60
4.4.2. Metodología de simulación	61
4.5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN LOS ESCENARIOS	63
4.5.1. Escenario 1.....	66

4.5.2.	Escenario 2.....	68
4.5.3.	Escenario 3.....	70
4.5.4.	Escenario 4.....	72
4.6.	ANÁLISIS DE CAPACIDAD-IMPACTO DE LA ADAPTACIÓN DEL MODELO DE MOVILIDAD.....	73
5.	CAPÍTULO V. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	81
5.1.	CONCLUSIONES	81
5.2.	RECOMENDACIONES	82
5.3.	TRABAJOS FUTUROS.....	84
	REFERENCIAS	85

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Equipo a bordo.....	4
Figura 1.2. Equipo al borde de la carretera.	5
Figura 1.3. Tipos de comunicación en redes VANET.	6
Figura 1.4. Dominios de comunicación en las redes VANET.....	6
Figura 1.5. Estándares WAVE.	9
Figura 1.6. Distribución de canales DSRC.	11
Figura 2.1. Modelos de Movilidad para VANET.....	15
Figura 3.1. Mapa Conceptual propuesto para la generación de un modelo de movilidad.	21
Figura 3.2. Pasos para la adaptación del modelo de movilidad de Krauss.	21
Figura 3.3. Avenida Panamericana entre Calles 18N y 27N.....	27
Figura 3.4. Trayectorias de acceso al sector estudiado en la intersección de la calle 25N.	29
Figura 3.5. Trayectorias de acceso vehicular en la Glorieta Antonio Nariño.....	30
Figura 3.6. Extensión del mapa conceptual propuesto en [3] para la adaptación de un modelo de movilidad vehicular.....	31
Figura 3.7. Indicador de máxima velocidad Universidad Cooperativa sentido norte-sur.....	32
Figura 3.8. Tramo de máxima velocidad en el sector.	34
Figura 3.9. Observador 1 y 2 en cada calzada midiendo el tiempo que toma a los vehículos recorrer la distancia demarcada.....	35
Figura 3.10. Cantidad de vehículos en el tramo según su velocidad.....	37
Figura 3.11. Cantidad de vehículos en el tramo según su velocidad (datos continuos).....	38
Figura 3.12. Ojiva Porcentual de velocidades en el tramo.....	38
Figura 3.13. Cantidad de vehículos en el tramo según su velocidad - 11 intervalos de clase. ..	40
Figura 3.14. Cantidad de vehículos en el tramo según su velocidad (datos continuos).....	41
Figura 3.15. Ojiva Porcentual de velocidades en el tramo.....	41
Figura 3.16. Velocidades alcanzadas por los vehículos en el sector.	42
Figura 3.17. Función de densidad de probabilidad Normal - histograma de frecuencias.	43
Figura 3.18. Función de densidad de probabilidad Rayleigh - histograma de frecuencias.....	43
Figura 3.19. Función de densidad de probabilidad Burr - histograma de frecuencias.....	44
Figura 3.20. Definición de los tipos de vehículo con características de conducción.	46
Figura 4.1. Esquema de funcionamiento de un simulador aislado.....	50

Figura 4.2. Esquema de funcionamiento de un simulador integrado.	50
Figura 4.3. Esquema de funcionamiento de un simulador híbrido.	51
Figura 4.4. Comparación entre simuladores de tráfico.	53
Figura 4.5. Comparación entre simuladores de red.	54
Figura 4.6. Mapa del sector, visto en <i>openstreetmap.org</i>	55
Figura 4.7. Intersección Calle 25N - Avenida Panamericana posterior a la modificación.	55
Figura 4.8. Intersección Calle 25N – Avenida Panamericana en SUMO.	56
Figura 4.9. Simulación de tráfico en SUMO, Calle 25N – Avenida Panamericana.	56
Figura 4.10. Parámetros de configuración 802.11p en INET.	58
Figura 4.11. Vehículos en la red VANET en un instante de simulación.	60
Figura 4.12. Escenarios de simulación propuestos.	60
Figura 4.13. Comparación de longitud entre vehículos.	64
Figura 4.14. Vehículos tipo “automóvil” en el escenario de prueba.	65
Figura 4.15. Vehículos tipo “tractomula” en el escenario de prueba.	66
Figura 4.16. Tasa de Transferencia promedio escenario 1.	67
Figura 4.17. Tasa de Transferencia acumulada en el escenario 1.	68
Figura 4.18. Tasa de transferencia para los vehículos del escenario 2.	69
Figura 4.19. Tasa de Transferencia acumulada en el escenario 2.	70
Figura 4.20. Tasa de Transferencia promedio obtenida escenario 3.	71
Figura 4.21. Tasa de Transferencia promedio acumulada en el escenario 3.	71
Figura 4.22. Tasa de transferencia promedio escenario 4.	72
Figura 4.23. Tasa de Transferencia promedio acumulada escenario 4.	73
Figura 4.24. Número de vehículos obtenidos en cada repetición para los escenarios de simulación 1 y 3.	74
Figura 4.25. Número de vehículos obtenidos en cada repetición para los escenarios de simulación 2 y 4.	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Estándares en Japón, Europa y Estados Unidos.	10
Tabla 3.1. Tipos de vehículos.	24
Tabla 3.2. Definición cantidad de vehículos.	24
Tabla 3.3. Variedad vehicular.	25
Tabla 3.4. Cantidad de colectivos durante 10 minutos.	25

Tabla 3.5. Tabla comparativa entre los sectores observados.....	26
Tabla 3.6. Cantidad de vehículos para todo el sector en hora pico.	28
Tabla 3.7. Cantidad de vehículos promedio para todo el sector en hora pico.....	28
Tabla 3.8. Cantidad de vehículos para todo el sector en hora valle.....	29
Tabla 3.9. Cantidad promedio de vehículos para todo el sector en la hora valle.	29
Tabla 3.10. Cantidad de vehículos de norte a sur en Campanario.	30
Tabla 3.11. Desviación Estándar de acuerdo al área de tránsito y tipo de carretera.	36
Tabla 3.12. Constantes correspondientes al nivel de confianza.	36
Tabla 3.13. Resumen de los datos recolectados en los 5 días de observación.	37
Tabla 3.14. Datos agrupados para las definiciones de velocidad.	40
Tabla 3.15. Características de los vehículos para simulación microscópica de tráfico.	47
Tabla 3.16. Valores de las variables del modelo de Krauss para conductores normales.....	47
Tabla 3.17. Asignación de valores para conductores agresivos.	48
Tabla 4.1. Características del enlace en la comunicación VANET propuesta.....	59
Tabla 4.2. Número mínimo de repeticiones para obtener el intervalo de confianza deseado. ...	62
Tabla 4.3. Número de repeticiones necesarias para obtener un nivel de confianza del 90%.....	63
Tabla 4.4. Tasa de transferencia escenarios de prueba: automóvil – tractomula.	66
Tabla 4.5. Tasa de transferencia promedio alcanzada en el sistema para el escenario 1.	67
Tabla 4.6. Tasa de Transferencia promedio alcanzada en el sistema para el escenario 2.	68
Tabla 4.7. Tasa de transferencia promedio para el escenario 3.	70
Tabla 4.8. Tasa de transferencia promedio alcanzada en el sistema para el escenario 4.	72
Tabla 4.9. Número de vehículos en los escenarios propuestos.....	74
Tabla 4.10. Tasa de transferencia alcanzada en el sistema para los escenarios 1 y 3.....	75
Tabla 4.11. Colisiones para los escenarios 1 y 3.	75
Tabla 4.12. Velocidades en los escenarios 1 y 3.....	76
Tabla 4.13. Número de vehículos en los escenarios 2 y 4.....	77
Tabla 4.14. Tasa de transferencia promedio alcanzada en los escenarios 2 y 4.....	77
Tabla 4.15. Colisiones para los escenarios 2 y 4.	78
Tabla 4.16. Velocidades en los escenarios 2 y 4.....	79

LISTA DE ACRÓNIMOS

AR	<i>Access Router.</i> Enrutador de Acceso.
ARIB	<i>Association of Radio Industries and Businesses.</i> Asociación de Industrias y Negocios Radio.
ASK	<i>Amplitude Shift Keying.</i> Modulación por Desplazamiento de Amplitud.
AU	<i>Application Unit.</i> Unidad de Aplicación.
BSM	<i>Basic Safety Message.</i> Mensaje de Seguridad Básico.
C2C-CC	<i>Car to Car Consortium.</i> Consorcio de Comunicaciones Carro a Carro.
CEN	<i>Comité Européen de Normalisation.</i> Comité Europeo de Normalización.
CSV	<i>Comma Separated Values.</i> Valores separados por comas.
DSRC	<i>Dedicated Short Range Communication.</i> Comunicación Dedicada de Corto Alcance.
EDCA	<i>Enhanced distributed channel access.</i> Acceso al canal mejorado distribuido.
FCC	<i>Federal Communications Commission.</i> Comisión Federal de Comunicaciones.
FHWA	<i>Federal Highway Administration.</i> Administración Federal de Carreteras.
FIFO	<i>First In First Out.</i> Primero en entrar primero en salir.
FreeSIM	<i>Free-Flow Traffic Simulator.</i> Simulador de Libre Flujo de Tráfico.
GloMoSim	<i>Global Mobile Information System Simulator.</i> Simulador de Sistema de Información Móvil Global.
GPRS	<i>General Packet Radio Service.</i> Servicio General de Paquetes Radio.
GPS	<i>Global Positioning System.</i> Sistema de Posicionamiento Global.
GTNetS	<i>Georgia Tech Network Simulator.</i> Simulador de red del Instituto de Tecnología de Georgia.
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol.</i> Protocolo de Transferencia de

IEEE	Hipertexto. <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers.</i> Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
IP	<i>Internet Protocol.</i> Protocolo de Internet.
JARI	<i>Japan Automobile Research Institute.</i> Instituto Japonés de Investigación Automotriz.
JIST	<i>Java in Simulation Time.</i> JAVA en Tiempo de Simulación.
JOSM	<i>Java OpenStreetMap Editor.</i> Editor JAVA de Mapas OSM.
LAN	<i>Local Area Network.</i> Red de Área Local.
LLC	<i>Logical Link Control.</i> Control de Enlace Lógico.
MAC	<i>Medium Access Control.</i> Control de Acceso al Medio.
MANET	<i>Mobile Ad Hoc Network.</i> Red Móvil Ad Hoc.
MITSIMLab	<i>Microscopic Traffic Simulation Laboratory.</i> Laboratorio de Simulación de Tráfico Microscópico.
MOVE	<i>Mobility Model Generator for Vehicular Networks,</i> Generador de Modelos de Movilidad para Redes Vehiculares.
NCTuns	<i>National Chiao Tung University Network Simulator,</i> Simulador de Red de la Universidad Nacional Chiao Tung.
NHTSA	<i>National Highway Traffic Safety Administration.</i> Administración Nacional de Seguridad de Tráfico en Carreteras.
NS-2	<i>Network Simulator 2.</i> Simulador de Red 2.
NS3	<i>Network Simulator 3.</i> Simulador de Red 3.
OBE	<i>On-Board Equipment.</i> Equipo a Bordo.
OBU	<i>On Board Unit.</i> Unidad a Bordo.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing.</i> Multiplexación por división de frecuencias ortogonales.
PDA	<i>Personal Digital Assistant.</i> Asistente Digital Personal.
PHS	<i>Public Hot Spot.</i> Hot Spot Público. Lugar que ofrece acceso a Internet a través de una red inalámbrica.
PSK	<i>Phase Shift Keying.</i> Modulación por Desplazamiento de Fase.

RSE	<i>Road Side Equipment.</i> Equipo al Borde de la Carretera.
RSU	<i>Road-Side Unit.</i> Unidad al Lado de la Carretera.
SAE	<i>Society of Automotive Engineers.</i> Sociedad de Ingenieros Automotrices.
STRAW	<i>Street Random WayPoint.</i>
SUMO	<i>Simulation of Urban Mobility.</i> Simulador de Movilidad Urbana.
SWANS	<i>Scalable Wireless Ad-Hoc Network Simulator.</i> Simulador de Redes Inalámbricas Ad-Hoc Escalable.
TCP	<i>Transmission Control Protocol.</i> Protocolo de Control de Transmisión.
TRANS	<i>Traffic and Network Simulation Environment.</i> Ambiente de Simulación de Tráfico y Redes.
UDP	<i>User Datagram Protocol.</i> Protocolo de Datagrama de Usuario.
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System.</i> Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles.
V2I	<i>Vehicle to Infrastructure.</i> Vehículo a Infraestructura.
V2R	<i>Vehicle to Roadside.</i> Vehículo a Unidad al borde de la carretera.
V2V	<i>Vehicle to Vehicle.</i> Vehículo a Vehículo.
VANET	<i>Vehicular Ad Hoc Network.</i> Red Vehicular Ad Hoc.
VEINS	<i>Vehicles In Network Simulation.</i> Vehículos en Simulación de Red.
VII	<i>Vehicle Infrastructure Integration.</i> Integración de Infraestructura Vehicular.
VISSIM	<i>Verkehr In Städten – Simulation.</i> Simulación de Tránsito en Ciudades.
WAVE	<i>Wireless Access in Vehicular Environments.</i> Acceso Inalámbrico en Ambientes Vehiculares.
WIMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access.</i> Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas.
WSM	<i>WAVE Short Message.</i> Mensaje WAVE corto.
WSMP	<i>WAVE Short Message Protocol.</i> Protocolo de mensaje corto WAVE.

INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de comunicación inalámbrica se han hecho presentes en la actualidad logrando optimizar una gran cantidad de procesos de comunicación, permitiendo la creación de servicios que permiten mejorar la experiencia de los usuarios de la tecnología. En materia de asistencia a los conductores de vehículos en la carretera se presentó la opción de involucrar las tecnologías inalámbricas para estos propósitos; de esta forma nació la idea de las redes vehiculares ad-hoc conocidas como redes VANET (*Vehicular Ad-hoc Network*), con el fin de alcanzar altos niveles de seguridad en la carretera a través de la asistencia informativa a los conductores en las vías.

Las redes VANET son una variedad de las redes móviles ad-hoc MANET (*Mobile Ad-hoc Network*) en donde los vehículos equipados con dispositivos de comunicación inalámbrica son los nodos de la red cuya topología cambia a través del tiempo. A diferencia de las redes MANET, los vehículos pertenecientes a la red VANET tienen su movimiento limitado por la disposición de las vías a lo largo del camino [1]. En cuanto al desempeño de una red VANET, el movimiento aleatorio y la velocidad de los nodos imponen una serie de requerimientos a la red relacionados con la tasa de transferencia, la pérdida de paquetes, el número de colisiones, la utilización del ancho de banda etc. [2], con el fin de que la red pueda soportar comunicaciones de alta fiabilidad.

Iniciativas en todo el mundo, dentro de las cuales participan instituciones gubernamentales y los principales fabricantes en la industria automotriz, muestran el creciente interés por las redes VANET. En Estados Unidos el proyecto de integración de infraestructura vehicular (VII, *Vehicle Infrastructure Integration*) y el Acceso Inalámbrico en Ambientes Vehiculares (WAVE, *Wireless Access in Vehicular Environments*) son ejemplos de iniciativas de investigación en redes vehiculares. En Europa y Japón, entre los diferentes proyectos de investigación en el tema, se crearon el Consorcio para las Comunicaciones Carro a Carro (C2C-CC, *Car to Car Communication Consortium*) y el Instituto Japonés de Investigación Automotriz (JARI, *Japan Automobile Research Institute*) respectivamente [2].

Para lograr implementar los servicios de comunicación en la red VANET es necesario tener en cuenta las características del entorno vial por donde se desplazan los vehículos. Factores como el número de carriles, la velocidad permitida en el sector, las normas de seguridad, el tipo de vehículos involucrados etc., deben ser tenidos en cuenta para lograr un buen desempeño de la red. Los modelos de movilidad vehicular intentan representar, bajo las condiciones de tráfico y movilidad del sector, el desplazamiento de los vehículos [3], con el fin de incrementar el realismo en las simulaciones e incrementar el nivel de confiabilidad en los resultados obtenidos.

En el presente trabajo de grado se analiza la capacidad de una red VANET en un sector de la ciudad de Popayán teniendo en cuenta la tasa de transferencia promedio a nivel de sistema, realizando la adaptación del modelo de movilidad de Krauss, una vez las características de movilidad del sector hayan sido registradas. Para lograr identificarlas se realiza un proceso de observación y medición basado en técnicas de ingeniería de tránsito, con el fin de obtener valores representativos para las variables de tráfico vehicular relevantes en el proceso de adaptación del modelo de movilidad.

Posterior a la adaptación del modelo de movilidad se realizó la simulación de una red VANET en la representación de la zona de estudio, estableciendo una comunicación vehículo a

vehículo (V2V). La transmisión de datos en la red está conformada por el envío de un mensaje *broadcast* basado en un estándar para aplicaciones de seguridad en redes vehiculares; esta transmisión es realizada por cada uno de los vehículos al ingresar al área geográfica de simulación, siguiendo las recomendaciones presentadas en el estándar IEEE 802.11p. De esta forma se creó una red VANET y se analizó su capacidad identificando el impacto de la adaptación del modelo de movilidad de Krauss para el sector escogido en la ciudad de Popayán, con base en la tasa de transferencia promedio alcanzada en el sistema.

Esta información se encuentra de forma detallada dentro de los 5 capítulos que conforman el trabajo de grado, los cuales presentan la siguiente distribución:

Capítulo I. Se presentan las características generales de las redes vehiculares.

Capítulo II. Se realiza una contextualización del concepto de los modelos de movilidad en las redes VANET, y se describen las características del modelo de movilidad de Krauss.

Capítulo III. Se describe el proceso para la elección del sector, el estudio de tráfico en esa zona, y la adaptación del modelo de movilidad de Krauss.

Capítulo IV. Se describe el proceso de experimentación y análisis de resultados, se menciona el software utilizado en la simulación de redes VANET, se elige un marco de simulación y se explica la forma como se implementaron los parámetros de adaptación del modelo de movilidad.

Capítulo V. Se presentan las conclusiones y recomendaciones producto de la ejecución del proyecto, de la misma manera se proponen algunas temáticas, relacionadas con este trabajo de grado, las cuales pueden ser desarrolladas en trabajos futuros en el campo de las redes VANET.

1. CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LAS REDES VEHICULARES

Las redes móviles ad-hoc, también conocidas como MANET (*Mobile Ad-Hoc Networks*) reciben este nombre debido a su naturaleza cambiante. La movilidad de sus nodos determina la topología de la red y la variación de sus características a través del tiempo, funcionando sin necesidad de algún dispositivo de administración centralizado que distribuya la información entre los terminales que componen la red, a diferencia de las redes que tienen una infraestructura definida, por ejemplo las redes LAN (*Local Area Network*).

En los ambientes vehiculares las redes MANET son llamadas redes VANET (*Vehicular Ad-Hoc Network*), por lo tanto, en esta red los nodos son vehículos con capacidad para establecer comunicaciones entre ellos y compartir información. La movilidad de los vehículos hace que este tipo de redes tengan unas características especiales.

Para lograr la comunicación es necesario que los nodos se ayuden mutuamente desplegándose de una forma espontánea dentro de un entorno inalámbrico, esto logra que cualquier paquete llegue a su destino, aunque el nodo destino no sea accesible directamente desde el origen. En una red VANET los nodos que la conforman cumplen varias funciones de acuerdo a la necesidad del momento; dichos nodos pueden transmitir, recibir información o actuar como enrutadores.

Uno de los principales objetivos de las redes vehiculares es aumentar la seguridad vial [4], a través del intercambio de información que permita al conductor reaccionar con suficiente anticipación ante eventos peligrosos o inesperados en la carretera, como por ejemplo un accidente o situaciones de congestión vehicular. La red vehicular también puede ser utilizada para aumentar la sensación de comodidad en los conductores al brindarles información con servicios de valor agregado como acceso a Internet o ubicación de hoteles, restaurantes, estaciones de servicio, entre otros.

1.1. COMUNICACIÓN EN REDES VEHICULARES

En el funcionamiento de una red VANET interactúan elementos, con diferentes funcionalidades y en varios tipos de comunicación, estableciendo dominios en el intercambio de información a través de la red.

1.1.1. Componentes

Una red VANET posee diferentes dispositivos agrupados en unidades funcionales con elementos y características que permiten realizar la comunicación entre vehículos. Estas dos unidades funcionales cuentan con capacidad de procesamiento para el manejo de la comunicación [5] [6].

- **Equipo a bordo (OBE, *On Board Equipment*):** Conjunto de elementos que se encuentran en el vehículo para hacer posible la comunicación con otros vehículos o

con unidades al borde de la carretera, estos elementos se comunican entre sí de forma cableada o inalámbrica dentro del vehículo como se muestra en la figura 1.1.

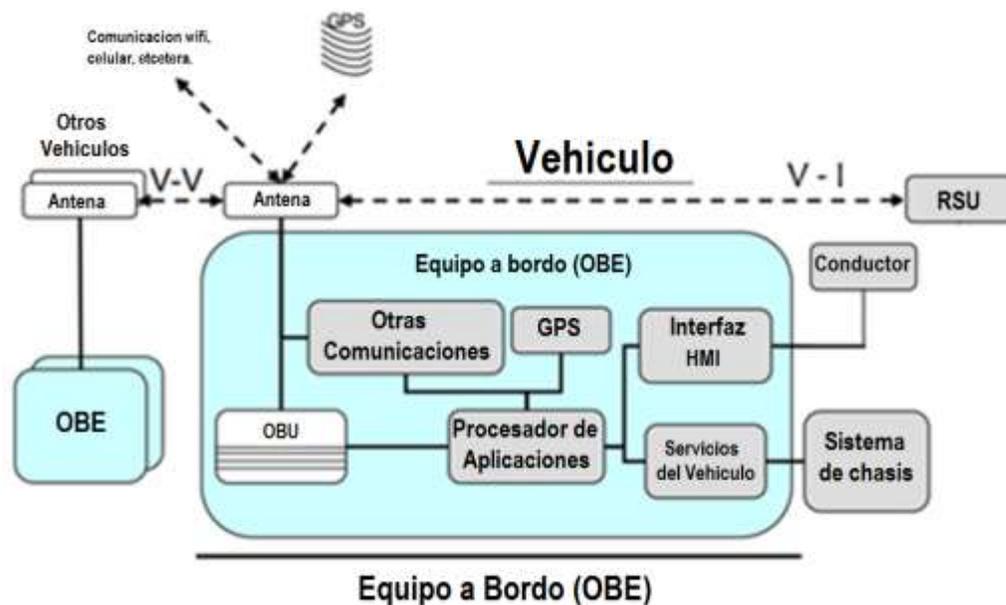


Figura 1.1. Equipo a bordo. Adaptada de [4].

La OBE está conformada por:

- Unidad a Bordo (OBU, *On Board Unit*): Es un transceptor encargado de la comunicación en los vehículos. Maneja los protocolos de acceso y enrutamiento, está conectado a otros elementos como antenas y sistemas de posicionamiento global (GPS, *Global Positioning System*) los cuales facilitan la comunicación inalámbrica con otras unidades. Dependiendo de sus características, la OBU puede tener capacidad para comunicarse directamente con la red de telefonía celular.
- Unidad de Aplicación (AU, *Application Unit*): Es el conjunto de elementos con los que cuenta el usuario para interactuar con la red y acceder a las diferentes aplicaciones para redes VANET, son los elementos que conforman la interfaz con el usuario. Generalmente se les denomina AU a dispositivos como *laptops*, *smartphones*, PDAs o pantallas ubicadas dentro del vehículo y que se encuentran conectados a la OBU.
- **Equipo al borde de la carretera (RSE, *Road Side Equipment*):** Comprende los elementos conectados en una unidad fija ubicada al borde de la carretera que asiste a los vehículos para establecer comunicaciones cuando se necesita un enlace entre ellos, o se requiere un enlace hacia redes externas. La disposición de los elementos de una RSE en el proceso de comunicación vehicular se presenta en la figura 1.2.

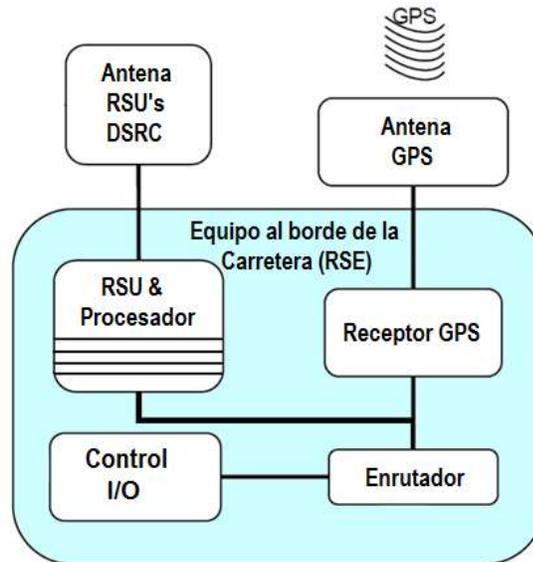


Figura 1.2. Equipo al borde de la carretera. Adaptada de [4].

Una RSE está conformada básicamente por:

- Unidad al borde de la carretera (RSU, *Road Side Unit*): Transceptor que se comunica con las OBU de los vehículos, esta unidad se encuentra conectada a un sistema GPS y a una antena para facilitar la comunicación inalámbrica.
- Enrutador de acceso (AR, *Access Router*): Este dispositivo actúa como pasarela y permite la interacción de la RSU con redes externas para establecer conexión a Internet, en caso de que la OBU no tenga la capacidad para hacerlo.

1.1.2. Tipos de comunicación

Dentro de una comunicación vehicular existen diferentes formas de llevar la información desde un origen hasta su destino, esta información puede originarse en una OBU o en una RSU, por lo tanto los tipos de comunicación que pueden darse en las redes vehiculares se clasifican de acuerdo al tipo de unidades que estén interactuando y a la función que cada una de éstas cumple en un momento determinado [5], [2], [7].

- **Vehículo a Vehículo (V2V, *Vehicle to Vehicle*):** Se refiere a la comunicación entre las OBU de los vehículos y puede realizarse en un solo salto o por medio de múltiples saltos, donde se pueden utilizar como enrutadores otros vehículos que estén en medio del emisor y el receptor. En el proceso de comunicación vehicular del presente trabajo de grado se realizará intercambio de información V2V.
- **Vehículo a Unidad al borde de la carretera (V2R, *Vehicle to Roadside*):** En este tipo de comunicación la OBU se comunica con la RSU con el fin de acceder a otros vehículos fuera de su alcance y recibir asistencia en el camino.
- **Vehículo a Infraestructura (V2I, *Vehicle to Infrastructure*):** Es la comunicación que se realiza entre el vehículo y las redes externas para conectarse a Internet, utilizando la RSU o directamente desde la OBU.

- **Comunicación híbrida:** Se basa en la combinación de la comunicación con unidades al borde de la carretera y la comunicación vehículo a vehículo. En el sistema interactúan las OBU y las RSU, actuando en ocasiones como enrutadores, para diferentes propósitos de comunicación.

Las comunicaciones vehículo a vehículo, vehículo a infraestructura al borde de la carretera y la comunicación híbrida, se presentan en la figura 1.3.

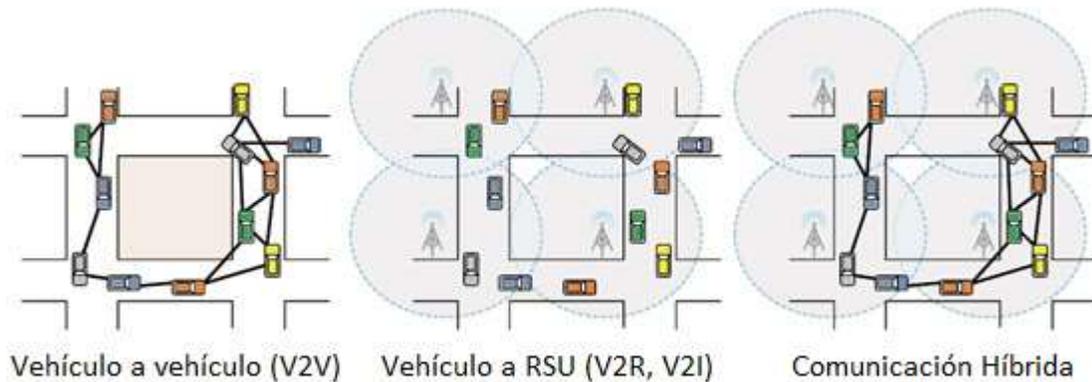


Figura 1.3. Tipos de comunicación en redes VANET. Adaptada de [8].

1.1.3. Dominios de comunicación en redes vehiculares

En las redes VANET, de acuerdo al origen y destino de la comunicación establecida, existen tres dominios en los cuales se realiza la transmisión de información en la red: Dominio en Vehículo, Dominio Ad-Hoc y Dominio Infraestructura [9]. En la figura 1.4 se presentan los dominios de comunicación en redes vehiculares.

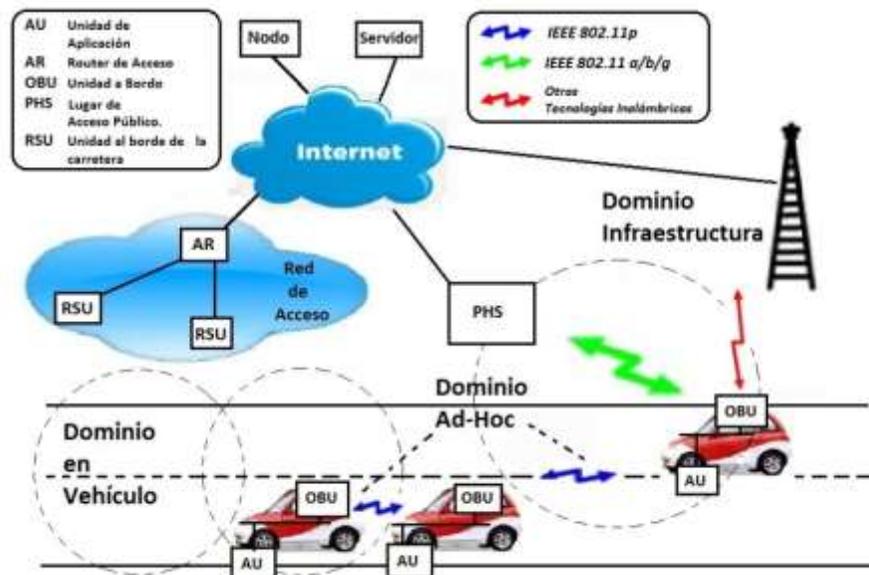


Figura 1.4. Dominios de comunicación en las redes VANET. Adaptada de [9].

1.1.3.1. Dominio en Vehículo

Se refiere a la comunicación que se realiza dentro del vehículo para la conformación de la red local interna. La red local dentro del vehículo tiene como componentes lógicos a la OBU y a la AU, las cuales se conectan por cable o de forma inalámbrica.

1.1.3.2. Dominio ad-hoc

En este dominio la comunicación se realiza exclusivamente entre vehículos con el fin de compartir información relevante según el tipo de aplicaciones implementadas en la red, las OBU realizan el intercambio de información entre ellas. Las RSU facilitan la comunicación entre las OBU gestionando las conexiones entre los vehículos, cuando la situación lo requiera.

En el desarrollo de este trabajo de grado el intercambio de información se realizará bajo este dominio.

1.1.3.3. Dominio Infraestructura

En este dominio las RSU actúan como pasarela para conectarse a las redes de acceso. En ocasiones, las OBU poseen capacidades de comunicación directa con las redes de telefonía celular o para establecer enlaces con otras tecnologías radio y aprovecharlas en la comunicación vehicular.

En este dominio coexisten comunicaciones de vehículo a vehículo y de los vehículos con la red de infraestructura.

1.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES VEHICULARES

Las redes VANET presentan una serie de características que las diferencian de las redes MANET y de otras redes de comunicaciones [10].

- **Suministro “ilimitado” de energía:** Como los nodos de este tipo de redes son vehículos, el suministro de las baterías es suficiente para las necesidades de alimentación energética de los dispositivos VANET.
- **Topología altamente dinámica:** Los nodos están constantemente en movimiento, y en ocasiones, éstos se desplazan con altas velocidades; por lo tanto es difícil describir una topología dado que la comunicación vehicular puede cambiar de dominio rápidamente.
- **Movilidad predecible de los nodos:** En las redes vehiculares el movimiento de los nodos usualmente está limitado a la extensión de las carreteras por donde realicen el desplazamiento, y la información de las vías está disponible a través de sistemas de posicionamiento. Por lo tanto, si se conocen velocidades promedio y las trayectorias de los vehículos es posible predecir, por ejemplo, la posición de un vehículo en una zona donde no existan vías alternas que den la posibilidad para un cambio de dirección.

- **Red potencialmente de gran escala:** En muchas ocasiones la red vehicular involucra gran cantidad de vehículos, y en algún momento, su número puede incrementarse rápidamente debido a situaciones de congestión o de emergencia, lo que aumenta la complejidad en las comunicaciones entre los nodos.
- **Red con desconexiones frecuentes:** Debido a las altas velocidades de los vehículos o la presencia de obstáculos en la vía, la comunicación vehicular puede verse frecuentemente interrumpida. Si se necesita desplegar aplicaciones en la red para las cuales esta característica sea un problema crítico, deben ser insertadas más unidades al borde de la carretera para resolver esta situación.
- **Distintas velocidades en los nodos:** La velocidad de los vehículos puede ser completamente impredecible, cuando la densidad vehicular es baja en una autopista se puede alcanzar una mayor velocidad, a diferencia de momentos de congestión en los cuales la velocidad forzosamente tendrá que ser reducida.
- **Autonomía:** Las redes VANET no necesitan una estación base o un nodo administrador, al ser redes adaptativas y autónomas todos los nodos tienen la capacidad de autoconfigurarse, y de ser necesario, actuar como enrutadores para establecer comunicaciones entre nodos que no tengan conexión dentro de su propio radio de cobertura.

1.3. TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS EN REDES VANET

Existen diferentes tecnologías para realizar comunicaciones inalámbricas que pueden ser utilizadas en redes vehiculares [11], [12], a continuación se mencionan las más importantes.

1.3.1. Redes de telefonía celular

La infraestructura desplegada por los operadores de telefonía celular hace que su uso en la implementación de una red VANET sea una opción a considerar, pero su utilización incrementaría los costos para los usuarios, además la latencia en las comunicaciones celulares es un posible inconveniente en el despliegue de una red vehicular [11].

1.3.2. WIMAX

Interoperabilidad mundial para acceso por microondas (WIMAX, *Worldwide Interoperability for Microwave Access*) puede brindar velocidades de hasta 30 Mbps en un radio aproximado de 48 Km. El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) estableció el estándar 802.16e conocido como *Mobile-WIMAX* el cual brinda portabilidad y capacidad mejorada para clientes móviles utilizando acceso múltiple por división ortogonal de frecuencia (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*). Esta tecnología puede ser utilizada en la comunicación entre vehículos o para proporcionar acceso a Internet a las RSU [11].

1.3.3. IEEE 802.11 a/b/g

Estándares Wi-Fi (*Wireless Fidelity*) pertenecientes al grupo 802.11 que establecen las propiedades para las comunicaciones inalámbricas en las redes de área local (WLAN, *Wireless Local Area Network*). En redes vehiculares pueden ser utilizados dispositivos con

estas características por sus bandas de frecuencia de libre acceso (2.4 GHz, 5 GHz) con un ancho de banda aceptable (de 1 a 54 Mbps) y velocidades hasta los 32 Mbps, permitiendo la comunicación en los dominios ad-hoc e infraestructura [12].

1.3.4. Acceso inalámbrico en ambientes vehiculares (WAVE, *Wireless Access for Vehicular Environment*)

Es el conjunto de estándares IEEE para los ambientes inalámbricos de comunicación vehicular. El objetivo de WAVE es facilitar el desarrollo de las comunicaciones inter-vehiculares en un ambiente que cambia constantemente de topología y con bajos tiempos de conexión; lo que exige el intercambio de información en el menor tiempo posible, para lograr incrementar la seguridad vial y el flujo de tráfico vehicular [13].

1.3.4.1. Estándares que conforman WAVE

WAVE está conformado por distintos estándares que se ejecutan en los niveles de la capa física, control de acceso al medio (MAC, *Medium Access Control*), enlace, red, transporte y aplicación. Estos estándares se especifican a continuación, y su aplicación en cada uno de los niveles del modelo TCP se observan en la figura 1.5.

- IEEE 802.11p: Especifica las funciones de MAC y físicas requeridas por un dispositivo IEEE 802.11 para trabajar en el entorno vehicular de alta variabilidad.
- IEEE 1609.1: Gestor de recursos WAVE, se define en el nivel de aplicación.
- IEEE 1609.2: Servicio de seguridad en WAVE, establece los mecanismos de seguridad, autenticación y confidencialidad.
- IEEE 1609.3: Servicio de enrutamiento WAVE, define las capas de red y transporte, incluyendo enrutamiento, gestión y configuración de direcciones.
- IEEE 1609.4: Operación multicanal en WAVE, se ocupa de la coordinación y gestión de la banda de frecuencias.

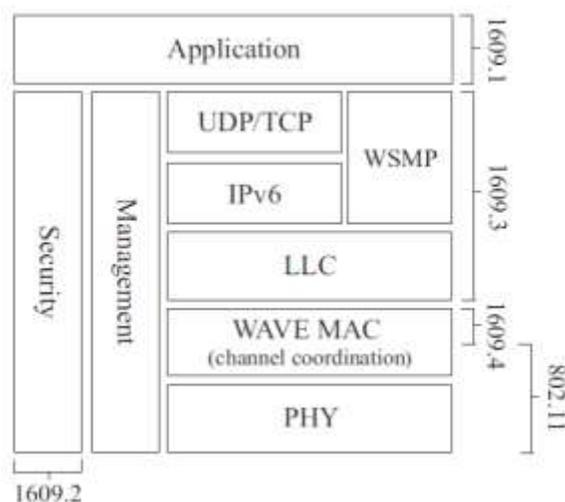


Figura 1.5. Estándares WAVE. Adaptada de [11].

1.3.4.2. Frecuencia de operación

La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, *Federal Communications Commission*) de los Estados Unidos ubicó en 1999 las comunicaciones vehiculares en la banda de 5.9 GHz, dedicando un ancho de banda exclusivo de 75 MHz. En Japón la Asociación de Industrias y Negocios Radio (ARIB, *Association of Radio Industries and Businesses*) definió el espectro para las comunicaciones vehiculares mediante el estándar STD-T75 estableciendo la frecuencia de operación en la banda de 5.8 GHz con un ancho de banda de 80 MHz. En Europa el Comité Europeo para Estandarización (CEN, *Comité Européen de Normalisation*) estableció para el uso de redes VANET 20 MHz de ancho de banda operando en 5.8 GHz [13]. En la tabla 1.1 se presenta las características generales del espectro asignado para comunicaciones vehiculares en Japón, Europa y Estados Unidos.

Según la estandarización en Estados Unidos, las comunicaciones dedicadas de corto alcance (DSRC, *Dedicated Short Range Communications*) hacen referencia a aquellas comunicaciones inalámbricas de mediano alcance que operan en la banda entre 5.850 GHz y 5.925 GHz. El ancho de banda de DSRC utilizado en redes VANET es de 75 MHz para un alcance en línea de vista de 1Km con una velocidad máxima de 140 Km/h [2].

Característica	Japón	Europa	USA
Comunicación	Half_Duplex (OBU)/Full-Duplex (RSU)	Half-Duplex	Half-Duplex
Banda de Frecuencia	5.8 GHz.	5.8 GHz.	5.9 GHz.
Ancho de Banda	80 MHz.	20 MHz.	75 MHz.
Tasa de Transmisión	Down/UpLink = 1 o 4 Mbps	DownLink: 500Kbps UpLink: 250 Kbps	Down/UpLink = 6 – 27 Mbps
Cobertura	30 metros	15-20 metros	1000 metros (máximo)
Modulación	2-ASK, 4-PSK	RSU: 2-ASK OBU: 2-PSK	OFDM

Tabla 1.1. Estándares en Japón, Europa y Estados Unidos. Adaptada de [2].

El espectro de DSRC está dividido en 7 canales de 10 MHz, y la tasa de transferencia va desde los 6 Mbps hasta los 27 Mbps por canal. El canal de control 178 crea la conexión entre la RSU y la OBU, también ayuda a conectar a las OBU entre sí. Los canales 172, 174, 176, 180, 182, 184 son los canales de servicio [4]. En la figura 1.6 se representa el espectro DSRC con los canales de servicio y control.

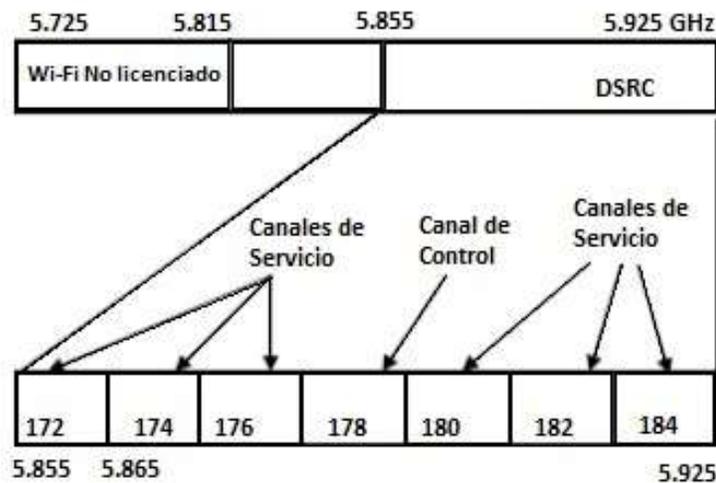


Figura 1.6. Distribución de canales DSRC. Adaptada de [4].

Las RSU al igual que las OBU son incapaces de transmitir mensajes simultáneamente, por lo tanto la comunicación en DSRC es *half-duplex*.

1.4. APLICACIONES PARA VANET

En las comunicaciones vehiculares, las posibles aplicaciones en diferentes ámbitos son innumerables; ya sea para buscar información, brindar seguridad o establecer comunicaciones. De acuerdo a su objetivo principal se realiza la siguiente clasificación de dichas aplicaciones [14].

1.4.1. Aplicaciones de entretenimiento y/o bienestar

También son llamadas aplicaciones no orientadas a la seguridad y buscan la comodidad de las personas durante la conducción, también están encaminadas a mejorar la eficiencia en el tráfico vehicular.

El conductor puede recibir Información del clima, el tráfico, hoteles y restaurantes cercanos a lo largo del camino. El acceso a Internet con todas sus ventajas también puede ser ofrecido por algunas aplicaciones dependiendo de la disposición del escenario VANET en particular.

1.4.2. Aplicaciones de Seguridad

Estas aplicaciones usan las comunicaciones vehiculares con el objetivo de reducir la accidentalidad creando alertas acerca del estado de las vías, la proximidad de los vehículos, posibles violaciones a las normas de tránsito locales, etc. Estas aplicaciones de seguridad se clasifican de la siguiente manera:

- **Prevención de colisiones en intersecciones:** Entre este tipo de aplicaciones se encuentran: advertencia sobre violación de señal de tráfico, advertencia sobre violación a señal de pare, asistencia para girar de forma segura a la izquierda,

advertencia sobre colisión en la intersección, advertencia de puntos con poca visibilidad, advertencia cuando un peatón esté cruzando la carretera.

- **Seguridad pública:** Advertencia sobre un vehículo de emergencia aproximándose, ajuste de las señales de los semáforos para permitir el libre tránsito de los vehículos de emergencia sobre alguna vía, mensajes de SOS en caso de accidente; advertencias posteriores a un accidente para los demás conductores.
- **Extensión de señales:** Busca advertir a conductores desatentos sobre señales en la vía a través del envío de mensajes, entre estas se encuentran: advertencia sobre el límite de velocidad en la vía, sobre la velocidad en una curva y advertencia sobre la proximidad de un puente bajo.
- **Diagnóstico y mantenimiento vehicular:** Estas aplicaciones buscan informar a los conductores acerca del estado funcional de su vehículo con el fin de prevenir accidentes por fallas mecánicas. Además de la advertencia, también pueden suministrar información de los centros de reparación y mantenimiento cercanos.
- **Información de otros vehículos:** Estas aplicaciones facilitan la ayuda entre conductores ante algún evento inesperado en la carretera. Permiten compartir información de puntos ciegos en la vía, obstáculos no identificados que requieran de frenado súbito, asistencia para cambio de carril seguro, entre otros.

1.5. CAPACIDAD EN REDES DE COMUNICACIÓN

El desempeño de una red está determinado por diferentes factores y uno de los más importantes es la capacidad de la red. Esta capacidad expresa de forma global la habilidad de soportar la comunicación para los nodos que la componen; la capacidad disponible tiene gran importancia para conocer las posibilidades de implementación de aplicaciones en cualquier entorno de red [15].

Para expresar la capacidad disponible de una red se realizan estudios analizando indicadores de desempeño, tales como la tasa de pérdida de paquetes, el número de conexiones establecidas, la probabilidad de colisiones y la tasa de transferencia promedio [16], [17], [18]:

- **Tasa de pérdida de paquetes:** En la transmisión de datos algunos de los paquetes que han sido transmitidos no llegan a su destino. La tasa respectiva es la medida del porcentaje promedio de esta pérdida [18], [19].
- **Número de conexiones establecidas:** Es la cantidad de conexiones que se han establecido efectivamente para atender alguna petición [17], [19].
- **Probabilidad de colisiones:** Cuando un nodo transmisor ha agotado su tiempo de espera del mensaje de confirmación del nodo receptor asume que ocurrió una colisión, debido a que se realizó una transmisión al mismo tiempo en el canal. La probabilidad de colisiones determina cuantitativamente la posibilidad de que ocurra este suceso [19], [20].
- **Tasa de transferencia promedio:** Se define como el número de bits que se transmiten efectivamente por unidad de tiempo. En el caso de la comunicación inalámbrica, ésta

depende de la tasa de bit de la tecnología utilizada, el tamaño de los paquetes y la cobertura de los nodos [15]. La tasa de transferencia medida en la capa de transporte para cada nodo es el número promedio de bits con información útil (*payload*) transmitidos exitosamente por unidad de tiempo [21].

Las redes inalámbricas ad-hoc son un tipo de red inalámbrica descentralizada, no tienen una topología predefinida ya que cada nodo puede actuar como enrutador. Esta forma de funcionamiento de los nodos, el tráfico vehicular y el tamaño de la red, entre otros, afectan de manera significativa la posible capacidad de la red. En una red radio, esta capacidad depende de parámetros espaciales y temporales, relacionados con el tamaño de la red, las interacciones en el canal y la movilidad de los nodos [15].

1.5.1. Capacidad en redes vehiculares

Por lo general, las redes vehiculares se despliegan a lo largo de grandes extensiones geográficas involucrando una gran cantidad de OBE y RSE; los vehículos involucrados se mueven de forma impredecible siguiendo el diseño de las vías en un sector [22]. Los vehículos que conforman la red pueden comunicarse utilizando tecnologías radio con diferentes rangos de cobertura.

El número y tipo de vehículos que conforman la red son características importantes del sector analizado, esta cantidad de vehículos establece una topología de red en donde se puede presentar congestión si los usuarios que acceden a determinada aplicación se incrementan. Estos intentos de comunicación son causados por el uso de las aplicaciones disponibles en el entorno de comunicación vehicular, por lo tanto el acceso indiscriminado a esta información simultáneamente también afecta la capacidad disponible de la red.

En [15] se concluye que la capacidad disponible de una red vehicular depende de la(s) tecnología(s) inalámbrica(s) involucrada(s), las aplicaciones a las que acceden los usuarios, el nivel de tráfico vehicular y la movilidad, siendo estas dos últimas determinadas por el modelo de movilidad vehicular en un ambiente de simulación.

1.5.1.1. Capacidad según la tecnología inalámbrica

En cuanto a las tecnologías inalámbricas en [23] se concluye que la tecnología IEEE 802.11p es adecuada para el desarrollo de aplicaciones en términos de retardo promedio de extremo a extremo, pérdidas de paquetes y tasa de transferencia. Por el contrario en [24], se realiza una simulación para comparar el desempeño de las tecnologías 802.11p y 802.16-2004 concluyendo que esta última presenta mejores resultados en términos de tasa de transferencia (capacidad de la red), pérdida de paquetes (porcentaje de información transmitida pero no recibida) y retardo de extremo a extremo (el tiempo necesario para que la información sea entregada del transmisor al receptor). También en [18] se realiza una simulación para probar el desempeño de la tecnología 802.11p en escenarios con alta densidad de tráfico, concluyendo que aunque WAVE está en capacidad de priorizar mensajes, la tasa de transferencia disminuye y el retardo aumenta significativamente, afectando la capacidad total de la red.

1.5.1.2. Capacidad según el nivel de tráfico vehicular

Cuando ocurre congestión vehicular en las vías una gran cantidad de vehículos se ubican en un sector de la carretera, aunque existan aplicaciones para anunciar la congestión a los vehículos con el fin de que éstos tomen vías alternas, en ocasiones la congestión es inevitable. Por lo tanto en esta situación también se presenta congestión en la red VANET, ya que muchos vehículos se establecen en el mismo sector solicitando recursos a la red; los efectos de esta congestión se reflejan en la tasa de transferencia promedio.

1.5.1.3. Capacidad de acuerdo a la movilidad

Aunque los vehículos siguen un camino predeterminado de acuerdo al diseño geométrico de las vías, las constantes variaciones de velocidad hacen que la topología de la red cambie constantemente. En las redes VANET es posible que los vehículos alcancen grandes velocidades, lo que puede producir frecuentes desconexiones, y los usuarios no podrían hacer uso de los recursos que les proporciona la red.

1.5.1.4. Capacidad de acuerdo al uso de las aplicaciones

La sobrecarga en la red cuando alguna aplicación disponible es accedida simultáneamente por una gran cantidad de usuarios, es un factor importante en la capacidad de la red en un momento determinado, como sucede en el *broadcasting* de información de seguridad.

2. CAPÍTULO II. MODELO DE MOVILIDAD

En la representación de la movilidad vehicular de un sector de la ciudad de Popayán se identificaron aquellas situaciones y reglas de movilidad con el fin de lograr una adaptación del modelo de movilidad, realizando el proceso funcional propuesto en [3] donde se plantea un mapa conceptual para generar o adaptar un modelo de movilidad vehicular para cualquier entorno.

Un modelo de movilidad, por definición, se entiende como un conjunto de reglas que unidas entre sí describen el comportamiento espacial de cuerpos durante un periodo de tiempo [25]. Al tener en cuenta vehículos, el comportamiento espacial se refiere a la determinación de parámetros tales como posición, velocidad y aceleración. Dentro de los distintos estudios en cuanto a modelos de movilidad en general, existen diferentes enfoques de acuerdo a los diferentes escenarios y sus propias características.

2.1. MODELOS DE MOVILIDAD PARA REDES VANET

Cuando se requiere analizar el comportamiento de una red VANET en cualquier ambiente, es necesario tener conocimiento del modelo de movilidad con el que se quiere representar el entorno vehicular; factores como la densidad vehicular, su desplazamiento, el comportamiento de los conductores y los mapas topológicos afectan el realismo de la simulación. De acuerdo a [3], el desarrollo de los modelos de movilidad para redes VANET puede ser clasificado en cuatro clases diferentes: modelos sintéticos, modelos basados en simuladores de tráfico, modelos basados en encuestas y modelos basados en trazas, tal como se observa en la figura 2.1.

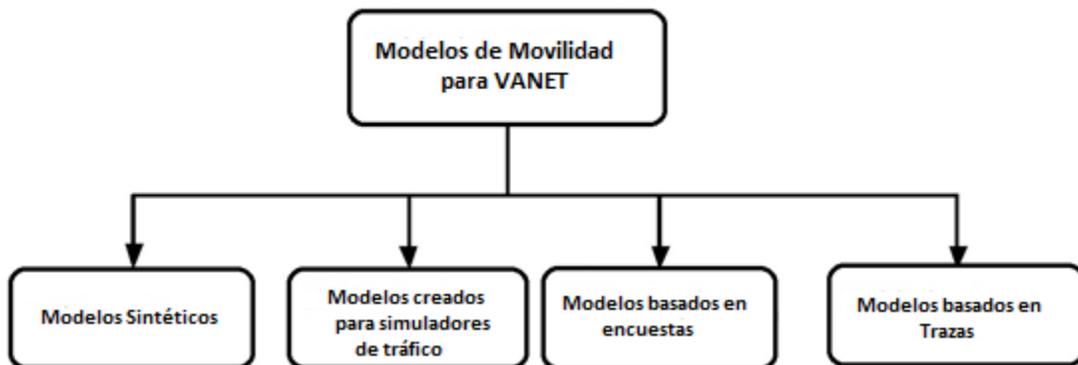


Figura 2.1. Modelos de Movilidad para VANET. Adaptada de [3].

- **Modelos Sintéticos:** Buscan reflejar el comportamiento físico real de los vehículos planteando un modelo matemático, entre ellos se encuentran: los modelos estocásticos donde el movimiento de los nodos es completamente aleatorio (*random-waypoint*, *random-walk*); los modelos de seguimiento entre vehículos (*car-following*) donde el movimiento está condicionado por un vehículo líder; los modelos de flujo de tráfico donde

se considera dicho movimiento como un fenómeno hidrodinámico (modelos macroscópicos, microscópicos); modelos de colas los cuales ubican los vehículos como clientes en una cola FIFO (*First in First Out*), y los modelos de comportamiento que intentan representar características y preferencias de los conductores de acuerdo al entorno social.

- **Modelos creados para simuladores de tráfico:** Por iniciativa de grupos de investigación en el campo de las redes vehiculares y en la ingeniería de tráfico, se han desarrollado diferentes proyectos que incorporan modelos y comportamientos reales para representar la movilidad de los vehículos en el tráfico de una ciudad o sector. Ejemplos de estos proyectos son: PARAMICS, simulador de tráfico microscópico desarrollado por *Quadstone Paramics* [26]; CORSIM (*Corridor Simulation*) desarrollado por el *McTrans Center* de la Universidad de Florida en Estados Unidos [27] y VISSIM (*Verkehr In Städten – Simulation*) que es un simulador de tránsito multimodal¹ desarrollado por la empresa *PTV-Planung Transport Verkehr AG* en Alemania [28].
- **Modelos basados en encuestas:** Son modelos desarrollados a partir de la manipulación de la información obtenida en la observación de las diferentes características sociales relevantes en el contexto de movilidad vehicular de una comunidad.
- **Modelos basados en trazas:** Modelos desarrollados al extraer patrones de movilidad genéricos basados en trazas vehiculares. Su dificultad radica en la utilización de complejos modelos matemáticos para la consideración de aquellos patrones no observables.

Los modelos microscópicos de tráfico² son los más apropiados para la simulación de redes vehiculares, como se especifica en [29]. El modelo de movilidad de Krauss es un modelo de movilidad microscópico dirigido a mantener el sistema libre de colisiones y permite la definición de diferentes tipos de vehículos y características de conducción que pueden ser usados en un proceso de adaptación. Aventaja a otros modelos de movilidad como se menciona en [30], donde se realiza una comparación entre los modelos de Krauss, Wagner y el Modelo de Conducción Inteligente, considerados como los más relevantes entre los modelos de movilidad microscópicos para redes VANET, concluyendo que el modelo de movilidad de Krauss presenta mejores resultados en un escenario de simulación donde se imponen paradas de semáforos, buses y áreas de glorieta en la ciudad de Popayán.

Por los motivos expuestos se elige el modelo de movilidad de Krauss para ser adaptado dentro del proceso de análisis de capacidad, para la simulación de una red VANET en un sector de la ciudad de Popayán.

2.2. MODELO DE MOVILIDAD DE KRAUSS

En los modelos *car-following* el comportamiento de cada unidad vehículo-conductor es descrito con relación a un vehículo líder, y como esta descripción toma cada vehículo como una entidad

¹ La simulación de tránsito multimodal se refiere a diferentes tipos de tránsito vehicular (vehículos particulares, transporte público, peatones, bicicletas).

² Los modelos microscópicos basan su desarrollo en las características particulares del vehículo (velocidad individual, aceleración, criterios para cambio de carril, tiempo de reacción de cada conductor, etc.). Los modelos macroscópicos utilizan propiedades de la totalidad del sistema estudiado, por ejemplo, la densidad y el flujo de tráfico en su totalidad.

independiente, este tipo de modelos pertenecen a la categoría de los modelos microscópicos de tráfico. Los modelos de este tipo determinan la velocidad o aceleración de un automóvil como una función dependiente de factores tales como la distancia que lo separa del vehículo líder, la velocidad propia y la del líder. Un modelo *car-following* establece un conjunto de normas que buscan adaptar la movilidad del vehículo para que evite la colisión con los demás, por ejemplo en el cambio de carril en una carretera, de esta forma logran evitar accidentes controlando la dinámica de cada vehículo de forma individual. El establecer una distancia y una velocidad segura es la estrategia principal para la movilidad libre de colisiones [3].

El modelo desarrollado por Krauss [31] en 1998 es un modelo microscópico *car-following*, en el que un conductor intenta permanecer alejado del vehículo líder a una distancia y velocidad seguras, que le permita reaccionar y maniobrar para adaptarse a los cambios de velocidad del vehículo líder. Este modelo de movilidad representa el movimiento de cada unidad vehículo-conductor donde las variables representan propiedades microscópicas como la posición, ubicación, velocidad y su cambio a través del tiempo.

En el modelo de Krauss se consideran dos tipos de movimiento para un vehículo: el movimiento libre y el movimiento de acuerdo a la interacción con otros vehículos. Con base en lo anterior el autor plantea dos conceptos importantes.

- La principal propiedad del movimiento libre es que la velocidad de un vehículo está limitada por una velocidad máxima $v_{m\acute{a}x}$ mostrada en la expresión 2.1.

$$v \leq v_{m\acute{a}x} \quad (2.1)$$

Esta velocidad se asume como la velocidad deseada por el conductor, o también puede ser adoptada como la velocidad límite establecida por las normas de tránsito locales [31].

- La intención de los conductores es evitar la colisión entre los vehículos sin importar las condiciones caóticas de movilidad en el escenario, de tal forma que el sistema permanezca libre de colisiones. Así, se asume que un conductor siempre escoge que su velocidad no exceda la máxima velocidad segura v_{safe} , como lo muestra la expresión 2.2.

$$v \leq v_{safe} \quad (2.2)$$

En esta velocidad segura intervienen tres factores, presentados en la ecuación 2.3, la velocidad propia del vehículo que persigue v_f , la velocidad del vehículo líder v_l y la distancia entre ellos g .

$$v_{safe} = v_{safe}(v_f, v_l, g) \quad (2.3)$$

El autor considera conveniente definir unos límites para la aceleración negativa y positiva como se muestra en la expresión 2.4.

$$-b \leq \frac{dv}{dt} \leq a \quad , \quad a, b > 0 \quad (2.4)$$

Los conductores de los vehículos intentan obtener la máxima velocidad posible dentro de este rango, producida por una aceleración a .

Para el desarrollo de este modelo Krauss tomó en consideración solamente modelos de movilidad en los cuales la dinámica del movimiento se diera en pasos discretos de tiempo Δt , donde los parámetros restrictivos considerados se muestran en la ecuación 2.5.

$$v(t + \Delta t) \leq \min[v_{m\acute{a}x}, v(t) + a\Delta t, v_{safe}] \quad (2.5)$$

El valor de la velocidad segura v_{safe} es calculado bajo la restricción que se muestra en la ecuación 2.6.

$$v(t + \Delta t) \geq v(t) - b\Delta t \quad (2.6)$$

La ecuación 2.6 fue considerada por el autor como la primera regla de actualización del sistema cada Δt . En este punto se realiza el modelamiento de las interacciones con el fin de completar el modelo de flujo de tráfico. Para este fin el autor consideró dos tipos de vehículos: un líder con velocidad y posición v_l y x_l respectivamente, y un perseguidor con velocidad y posición v_f y x_f , respectivamente. De igual forma definió la variable l como la longitud del vehículo y g como la distancia entre ellos. La ecuación 2.7 muestra la relación entre estas variables.

$$g = x_l - x_f - l \quad (2.7)$$

Debido al propósito general en el modelo de mantener el sistema libre de colisiones, el valor de g siempre es positivo.

El autor define una función $d(v)$ como la distancia de frenado de los vehículos al viajar a una velocidad v . Por lo tanto, la situación es segura si se cumple la condición 2.8.

$$d(v_f) + v_f\tau \leq d(v_l) + g \quad (2.8)$$

El lado izquierdo de la ecuación 2.8 expresa la distancia de frenado del vehículo que persigue incluyendo un tiempo de reacción τ ; por lo tanto, esa distancia debe ser menor que la distancia de frenado del vehículo líder expresada en el lado derecho de la expresión 2.8, la cual comprende también el espacio entre los vehículos.

En el modelo de Krauss también se definen las siguientes ecuaciones.

$$\frac{dg}{dt} = v_l - v_f \quad (2.9)$$

$$g_{des} = v_l\tau \quad (2.10)$$

$$\tau_{des} = \tau_b + \tau \quad (2.11)$$

$$\tau_b = \frac{\bar{v}}{b} \quad (2.12)$$

Donde g_{des} es la distancia deseada, τ_{des} es el tiempo de reacción deseado, y τ_b es el tiempo de reacción teniendo en cuenta la desaceleración que un conductor está en capacidad de aplicar; el autor estableció en la expresión 2.13 la condición de seguridad.

$$v_l - v_f \geq \frac{v_l \tau - g}{\frac{v}{b} + \tau} \quad (2.13)$$

El numerador del lado derecho de la condición 2.13 es la distancia de frenado del vehículo líder y el denominador es el tiempo de reacción deseado; por lo tanto, este lado expresa una velocidad que debe ser menor o igual que la diferencia de velocidades entre el líder y el conductor.

2.2.1. Ecuaciones del modelo

Hasta este paso el autor consideró el seguimiento de los vehículos y el movimiento libre de los mismos solamente en un carril. De esta forma el modelo de Krauss se presenta en las ecuaciones 2.14 a 2.17 constituyendo la actualización del sistema para cada paso de tiempo discreto [31].

$$v_{safe}(t) = v_l(t) + \frac{g(t) - g_{des}(t)}{\tau_b + \tau} \quad (2.14)$$

$$v_{des}(t) = \min[v_{m\acute{a}x}, v(t) + a(v)\Delta t, v_{safe}(t)] \quad (2.15)$$

$$v(t + \Delta t) = \max[0, v_{des}(t) - \eta] \quad (2.16)$$

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v\Delta t \quad (2.17)$$

Para permitir que aparezcan errores en la conducción, con el fin de evitar la homogeneidad en el sistema, el autor incluyó una perturbación aleatoria $\eta > 0$; este término evita que los conductores aceleren tanto como les sea posible, con el fin de mantener la seguridad. De esta forma, se complementó la regla de actualización de velocidad en el sistema, tal como se muestra en la ecuación 2.18.

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a(v)\Delta t - a\epsilon\eta \quad (2.18)$$

En la ecuación 2.18 la variable ϵ se escoge entre $[0...1]$ indicando cuanta perturbación es introducida, mientras η genera números racionales aleatorios uniformemente distribuidos entre $[0...1)$.

Las reglas del modelo de Krauss hasta este punto son aplicables al tráfico en un carril, y las carreteras generalmente tienen dos o más carriles, por lo tanto, el autor extendió el modelo para cubrir las características del tráfico en múltiples carriles. Para la generalización del modelo el autor realiza el paso discreto de tiempo en tres etapas, en la primera etapa se ajustan los carriles, en la segunda se ajustan las velocidades de la misma manera en la que se hace para un solo carril, y en la tercera etapa los vehículos se mueven de acuerdo a su nueva velocidad. El autor para este caso también asignó el carril derecho como el de baja velocidad y el izquierdo es destinado para adelantar a mayor velocidad. Los cambios de carril se realizan bajo ciertas reglas importantes.

- Un cambio de carril es permitido si se realiza de forma favorable y segura.
- El adelantar por el costado derecho solo se realiza si existe congestión vehicular.
- Hay una pequeña probabilidad p_{change} para el cambio de carril en condiciones desfavorables.

Un cambio de carril se considera seguro si se siguen cumpliendo las condiciones de seguridad establecidas para los modelos *car following* en un carril. Después de un cambio de carril es necesario que se mantenga la condición 2.19 en todo el sistema, la cual expresa que la velocidad de cada vehículo en cada paso de tiempo debe ser ajustada de tal forma que siempre sea menor a la velocidad segura, la cual se fija teniendo en cuenta la limitada capacidad de frenado de los vehículos.

$$v(t+1) < v_{safe}(t) \quad y \quad v(t) - b \leq v_{safe}(t) \quad (2.19)$$

2.2.2. Variables fundamentales en el modelo de Krauss

El modelo de Krauss establece pasos de tiempo discretos en los cuales cada vehículo actualiza su posición y velocidad; además determina criterios de seguridad para cambio de carril. La regla de actualización se define en las ecuaciones 2.20 a 2.23 [31].

- Paso 1: Determinar la velocidad segura.

$$v_{safe}(t) = v_l(t) + \frac{g(t) - g_{des}(t)}{\tau_b + \tau} \quad (2.20)$$

- Paso 2: Determinar la velocidad deseada.

$$v_{des}(t) = \min[v_{m\acute{a}x}, v(t) + a(v)\Delta t, v_{safe}(t)] \quad (2.21)$$

- Paso 3: Aleatorización.

$$v(t + \Delta t) = \max[0, v_{des}(t) - \eta] \quad (2.22)$$

- Paso 4: Movimiento.

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v\Delta t \quad (2.23)$$

De los pasos anteriores se identifican las variables fundamentales en la regla de actualización: velocidad, aceleración, desaceleración y tiempo de reacción del conductor. Las demás variables del modelo original de Krauss que intervienen dependen de las mencionadas.

3. CAPÍTULO III. PROCESO DE ADAPTACIÓN DEL MODELO DE MOVILIDAD

En [3], se proponen una serie de características a tener en cuenta en la construcción de un modelo de movilidad vehicular. Estas variables construyen el modelo de acuerdo al ambiente en el que se produzca la interacción de los vehículos. En la figura 3.1 se observa el proceso de generación de un modelo de movilidad para cualquier entorno.

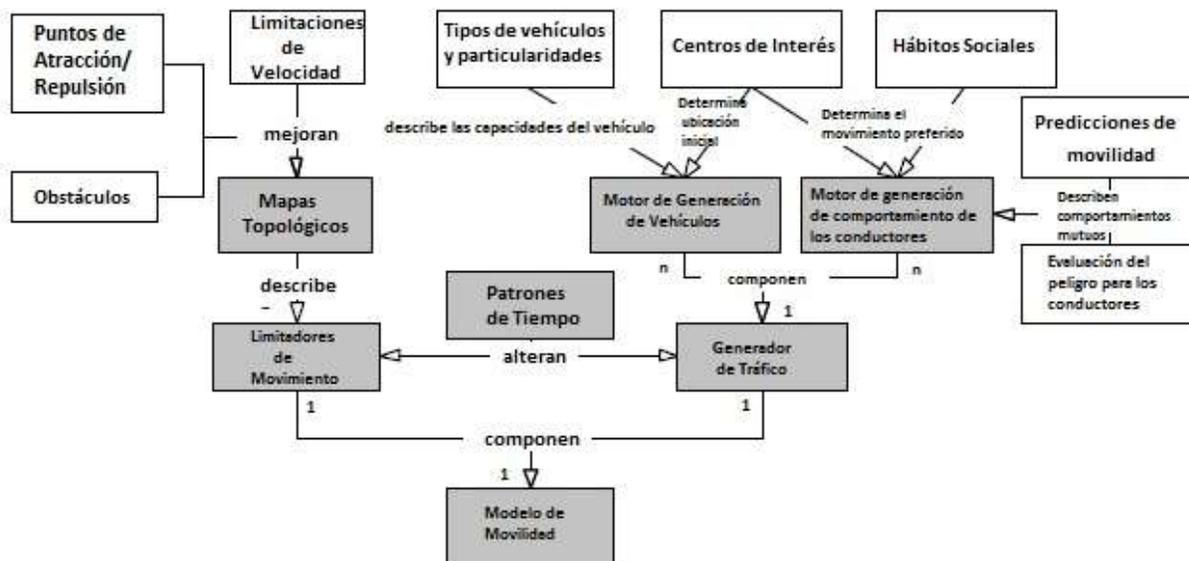


Figura 3.1. Mapa Conceptual propuesto para la generación de un modelo de movilidad. Adaptada de [3].

Al considerar el esquema anterior, la regla de actualización del modelo de Krauss y siguiendo la metodología del modelo en cascada al adquirir consecutivamente los elementos necesarios, se propone la adaptación del modelo de movilidad de Krauss para un sector de la ciudad de Popayán siguiendo los pasos descritos en la figura 3.2

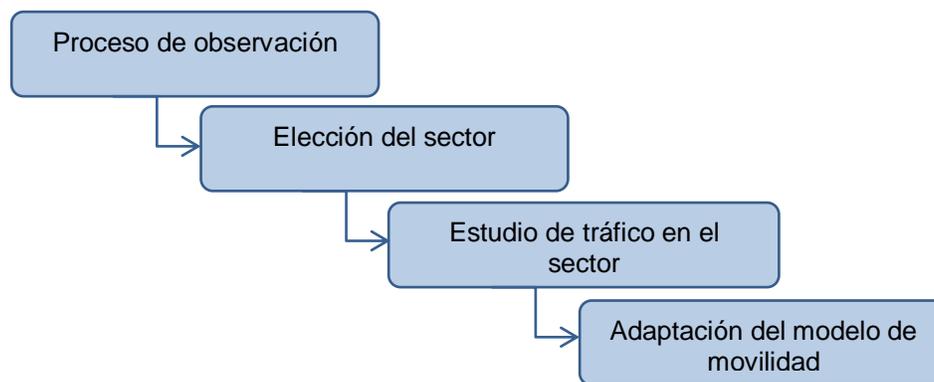


Figura 3.2. Pasos para la adaptación del modelo de movilidad de Krauss. Por los autores.

3.1. ADAPTACIÓN DEL MODELO DE MOVILIDAD DE KRAUSS

El valor de las variables del modelo de movilidad de Krauss está dado por el entorno vehicular del sector estudiado. Por lo tanto, fue necesario adaptar el mapa conceptual de la figura 3.1 y extraer las variables relevantes para la adaptación del modelo de Krauss. En el proceso fue necesario determinar, puntos de atracción y repulsión (semáforos, glorietas, intersecciones, cruces), obstáculos, tipos de vehículos, hábitos sociales, centros de interés (centros comerciales, hoteles, etc.). De acuerdo a estas características se realizó la elección del sector entre diferentes zonas de la ciudad.

Una característica importante en el entorno de movilidad de un sector es el volumen de tránsito, el cual se define como el número de vehículos que pasa por un punto determinado durante un periodo específico de tiempo [32], y para obtener datos como la tasa promedio de vehículos es necesario realizar un conteo vehicular durante extensos periodos de tiempo, con el fin de obtener las variaciones respectivas en las diferentes épocas del año. Por lo tanto, la información recolectada respecto del total de vehículos en la zona de estudio de este proyecto no intentó determinar las medidas de tráfico del sector, ya que no es el objetivo del presente trabajo; esta información se utilizó para crear un escenario de alta y baja congestión vehicular que permitiera simular una red VANET que cuente con características muy cercanas a las observadas en la realidad en el sector de estudio, y a partir de esta simulación, concluir acerca de la capacidad de la red teniendo en cuenta la tasa de transferencia promedio en el sistema.

3.1.1. Proceso de observación

Para la medición de las características de movilidad vehicular, en los sectores de la ciudad considerados adecuados para la simulación de la red VANET, se realizaron observaciones de lunes a viernes durante 2 semanas, desde la 12:10 p.m. hasta las 12:20 p.m. intervalo de tiempo considerado como un horario de congestión (hora pico), y en un horario de libre tránsito vehicular (hora valle) desde las 9:30 a.m. hasta las 9:40 a.m.

El número de vehículos en las vías depende de los horarios en que las personas hagan mayor uso de ellas, por lo tanto ese incremento en la cantidad de vehículos afectará el intercambio de información en una red VANET. En un momento determinado, si una red VANET está conformada por un gran número de usuarios, tendrá mayores requerimientos para lograr un óptimo desempeño. Por este motivo es necesario realizar un proceso de recolección de información vehicular que permita representar los dos estados (hora de congestión y hora de libre tránsito vehicular) en el entorno de movilidad vehicular, y de esta forma determinar el número de posibles usuarios de una red VANET en el sector.

Para obtener una visión general inicial, se propone el siguiente proceso de observación en un sector donde se pretenda realizar una representación del entorno de movilidad vehicular.

- Identificar las características de movilidad vehicular del sector.
- Realizar un estudio de cantidad y variedad vehicular (Determinar los tipos de vehículos en la zona y su cantidad).

3.1.1.1. Características de movilidad vehicular en la elección del sector

Para una selección adecuada se compararon diferentes sectores, teniendo en cuenta sus características de movilidad vehicular, y de acuerdo a esa comparación se eligió el sector para realizar el estudio. Las características determinantes en esta elección se presentan a continuación.

- **Estado de las vías:** Es necesario considerar el estado de las carreteras sobre las que se desplazan los vehículos, el estado de las vías no debe alterar el libre movimiento de los vehículos en la zona.
- **Velocidad de los vehículos en el sector:** Una de las características de las redes VANET es la alta movilidad de los nodos, por lo tanto la velocidad es un aspecto importante a tener en cuenta en la elección de la zona de estudio.
- **Zonas escolares:** La entrada y salida de las instituciones educativas afectan la movilidad del sector, especialmente en las horas de inicio y finalización de la jornada, las cuales coinciden con las horas pico.
- **Transporte público:** Los vehículos de transporte público son un factor importante en la generación de congestión vehicular, por lo tanto se consideró que la zona de estudio debería tener una gran cantidad de rutas de servicio público.
- **Congestión hora pico:** En el análisis propuesto es necesario que exista una diferencia marcada entre las horas pico y las horas valle, con el fin de analizar la capacidad de la red VANET en dos escenarios diferentes.

3.1.1.2. Estudio de cantidad y variedad vehicular

Para identificar el tipo de vehículos que se desplazan en los sectores estudiados, se consideró su tamaño y capacidad. La descripción de los tipos de vehículos se presenta en la tabla 3.1 [33], [34].

TIPO	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
Moto	Vehículo para el transporte de una o dos personas con un tamaño de 2.2 m de largo y 0,75 m de ancho.	
Automóvil	Es el tipo de vehículo familiar, su tamaño promedio es de 4.27 m de largo y 1.7 m de ancho.	 AUTOMOVIL
Pick-up	Automóvil diseñado para llevar poca carga y desplazarse en terrenos irregulares, su tamaño promedio es de 5 m de largo y 1.8 m de ancho.	 PICK UPS

Furgón	Su tamaño es comparable al de la pick up, se diferencia en su compartimiento para llevar carga en la parte trasera; su tamaño promedio es de 5 m de largo y 1.7 m de ancho.	 FURGÓN
Colectivo	Automóvil de transporte público con dimensiones un poco mayores a las del furgón, mucho más pesado y de mayor altura que los anteriores; su tamaño promedio es de 7 m de largo y 2 m de ancho.	 COLECTIVOS
Camión	Vehículo de tamaño similar al colectivo, cuenta una pequeña cabina para dos pasajeros y un tráiler de carga; su tamaño promedio es de 12 m de largo y 2.6 m de ancho.	 CAMION PEQUEÑO
Bus	Vehículo de tamaño muy grande con características similares a las del colectivo pero con dimensiones más grandes; su tamaño promedio es de 14 m de largo y 2.5 m de ancho.	 BUS GRANDE
Tractomula	Vehículo de tamaño muy grande con características similares a las del camión pequeño pero de mayor tamaño; su tamaño promedio es de 18.5 m de largo y 2.6 m de ancho.	 CAMION GRANDE

Tabla 3.1. Tipos de vehículos. Por los autores.

La cantidad vehicular se determinó al realizar un conteo del número de vehículos que pasa por cada uno de los sectores elegibles en un intervalo de tiempo; para este caso se tomaron medidas de un minuto considerando una cantidad baja, media y alta de vehículos como se muestra en la tabla 3.2.

Definición	Cantidad de vehículos por minuto
Baja	De 0 a 10 vehículos
Media	De 11 a 20 vehículos
Alta	Más de 20 vehículos

Tabla 3.2. Definición cantidad de vehículos. Por los autores.

La variedad de vehículos en los sectores se determinó de acuerdo a la observación de los distintos tipos de vehículos que se desplazaron en la zona durante las mediciones. La clasificación que muestra la tabla 3.3 se realizó teniendo en cuenta los siguientes elementos:

- La habitualidad de encontrar cierto tipo de vehículo en los sectores.

- Menor o mayor presencia del tipo de vehículo en la ciudad.

Se estableció una escala de variedad vehicular, en la cual los vehículos que se observen con menos frecuencia en la ciudad definen los valores superiores; de tal modo que un sector en el cual se observen vehículos poco comunes presenta una variedad vehicular más alta.

Los vehículos menos habituales en la observación fueron los buses intermunicipales y camiones grandes (tractomulas), por lo tanto las zonas en las que se registró este tipo de vehículos se consideraron de alta variedad vehicular.

Variedad de Vehículos	Descripción
Baja	Automóviles, motos, pickups y furgones
Media	Automóviles, motos, pickups, furgones y colectivos
Media-Alta	Automóviles, motos, pickups, furgones, colectivos y camiones.
Alta	Automóviles, motos, pickups, furgones, colectivos, camiones, buses y camiones grandes (Tractomulas).

Tabla 3.3. Variedad vehicular. Por los autores.

La cantidad de rutas de transporte público en un sector son un factor importante en la generación de congestión vehicular, por lo tanto se registró cuántos vehículos de transporte público (colectivos, en este caso) transitaron en un periodo de 10 minutos en cada uno de los lugares observados. En la tabla 3.4 se observa la definición de acuerdo a la cantidad de colectivos. El detalle de estas observaciones se presenta en el anexo A.

Definición	Colectivos en (10 minutos)
Bajo	0-10
Medio	11-20
Alto	Más de 21

Tabla 3.4. Cantidad de colectivos durante 10 minutos. Por los autores.

3.1.2. Elección del sector

Para la elección del sector de estudio en la ciudad de Popayán se tuvo en cuenta que los sectores de estudio reunieran características representativas de la ciudad, y en los cuales se pudiera apreciar una marcada diferencia entre la movilidad vehicular en horas pico y horas valle. Se realizaron observaciones de tráfico en los siguientes sectores.

- **Carrera 2 entre calles 10N y 25N:** En este sector existe un notable incremento de vehículos en las horas pico, ya que dentro de este horario se establece la entrada y

salida de instituciones educativas del sector. La ausencia de vías alternas para acceder a estas instituciones y a unidades residenciales del sector es un factor que influye en la congestión vehicular en estos horarios. En este sector transitan principalmente motocicletas, vehículos familiares, y vehículos de transporte público.

Las vías de este sector se encuentran en buen estado, es una carretera de doble vía pero solo permite el desplazamiento por un carril.

- **Carrera 9 entre calle 18N y calle 27N:** Este sector pertenece a la Avenida Panamericana, conectando los extremos norte y sur de la ciudad. Una gran cantidad de vehículos de todo tipo (vehículos familiares, motocicletas, camiones, tractomulas, colectivos, buses, taxis) se desplazan por este sector. Alrededor existen varias zonas residenciales, comerciales y escolares. Esta vía se encuentra en buen estado, es de doble calzada, con buena señalización y es preferida por los conductores para llegar rápidamente al centro de la ciudad.
- **Calle 5 entre carrera 17 y carrera 25:** Sobre esta vía se desplaza una gran cantidad de vehículos, comunica el occidente con el centro de la ciudad. La diversidad vehicular en esta zona es alta, y en horas pico el transporte público tiene varias rutas que pasan por el sector generando congestión vehicular. Es una vía de doble calzada, pero tiene sectores deteriorados en su estructura presentando algunos baches, huecos y grietas.

Para la estimación de la velocidad de los vehículos se realizaron desplazamientos en un vehículo particular en cada uno de los sectores elegibles para el desarrollo del proyecto. De acuerdo a la velocidad registrada, se ubicó cada sector en una categoría determinada por un rango de velocidad. El resumen de las observaciones realizadas en los tres sectores se presenta en la tabla 3.5. Todas estas observaciones fueron realizadas con el propósito de seleccionar el sector adecuado; el estudio de tráfico detallado se desarrolló sobre el sector escogido.

Observación	Carrera 2, Calle 10N- Calle 25N	Calle 18N Calle 27N	Calle 5, Carrera 17- Carrera 39
Cantidad de Vehículos	Medio	Alto	Medio
Variedad de Vehículos	Media-Alta	Alta	Alta
Estado de la Carretera	Bueno	Bueno	Medio
Carriles	Uno	Dos	Dos
Velocidad 0-40 Km/h	✓	✓	✓
Velocidad 40-60 Km/h	✓	✓	✓
Velocidades superiores a 60 Km/h	X	✓	X
Transporte público	Medio	Alto	Alto
Zonas escolares	✓	✓	✓
Zonas de alta congestión vehicular	✓	✓	✓
Congestión hora pico	✓	✓	✓

Tabla 3.5. Tabla comparativa entre los sectores observados. Por los autores.

Para la adaptación del modelo de Krauss y la posterior simulación de la red VANET se seleccionó el sector comprendido por la Avenida Panamericana entre las calles 18N y 27N. Es una de las vías principales de la ciudad y una gran cantidad de vehículos de todo tipo se desplazan en ella para ingresar y salir de la ciudad, como se observa en la tabla 3.5. Además, en sus dos principales intersecciones (Semáforos calle 25N y Glorieta Antonio Nariño) posee importantes centros de atracción, tales como el Centro Comercial Campanario y el Hotel San Martín, que junto a otros establecimientos comerciales, almacenes de cadena, colegios, universidades y otros centros educativos conforman un lugar atractivo para toda la comunidad de la ciudad; además contiene sectores residenciales de gran afluencia lo que influye significativamente en la movilidad vehicular en todo momento. Las vías que componen el sector se encuentran en buen estado, la cantidad y diversidad de vehículos que se desplazan por ella así lo exige.

De acuerdo a lo expuesto este sector reúne una variedad de características que permiten analizar la capacidad de una red VANET en diferentes condiciones. En la figura 3.3 se observa el sector escogido.

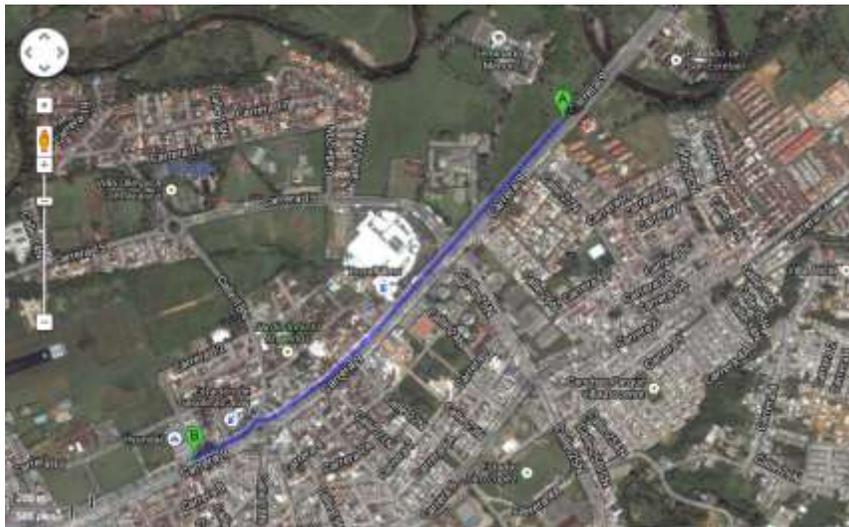


Figura 3.3. Avenida Panamericana entre Calles 18N y 27N. Tomada de Google Earth.

3.1.3. Estudio de Tráfico en el sector

Para representar el tráfico vehicular del sector se tuvo en cuenta la cantidad de vehículos que circulaban en la zona, los tipos de vehículo y las trayectorias de cada uno de ellos. También se buscó representar la influencia que tienen los sitios de atracción en la preferencia de los conductores; esta preferencia se representó en el final de trayectoria en cada uno de los vehículos.

- **Cantidad de vehículos:** El conteo de vehículos se realizó durante 3 semanas desde el 10 de junio hasta el 28 de junio en horarios de alta y baja congestión vehicular (12:10-12:20 p.m. y 9:30-9:40 a.m.). La cantidad total para cada tipo de vehículo durante la hora pico en un periodo de tiempo de 3 semanas, teniendo en cuenta solo los días de lunes a viernes, se presenta en la tabla 3.6 y el promedio en la tabla 3.7.

Fecha	Tipo de Vehículo							
	Moto	Automóvil	Furgoneta	Pickup	Colectivo	Bus	Camión	Tractomula
10/06	436	593	22	66	65	6	25	5
11/06	449	639	23	55	74	10	29	7
12/06	460	648	23	59	69	8	29	6
13/06	435	632	28	69	76	10	33	7
14/06	470	621	20	67	74	8	26	6
17/06	460	648	23	59	69	8	29	6
18/06	449	639	23	55	74	10	29	7
19/06	464	605	22	61	73	8	28	7
20/06	451	641	18	54	69	8	30	6
21/06	460	648	23	59	69	8	29	6
24/06	460	648	23	59	69	8	29	6
25/06	435	632	34	69	76	10	22	7
26/06	473	661	23	56	74	8	31	6
27/06	451	641	16	54	69	8	30	6
28/06	435	632	30	69	76	10	33	7

Tabla 3.6. Cantidad de vehículos para todo el sector en hora pico. Por los autores.

Tipo de Vehículo	Cantidad Promedio	Desviación Estándar
Moto	453	13
Automóvil	635	18
Furgoneta	23	4
Pickup	61	6
Colectivo	72	3
Bus	9	1
Camión	29	3
Tractomula	6	1

Tabla 3.7. Cantidad de vehículos promedio para todo el sector en hora pico. Por los autores.

En la tabla 3.8 se observa el total de vehículos registrado por cada tipo durante los 15 días de observación en la hora valle, en la tabla 3.9 se presenta el promedio respectivo.

Fecha	Tipo de Vehículo							
	Moto	Automóvil	Furgoneta	Pickup	Colectivo	Bus	Camión	Tractomula
10/06	278	409	13	30	38	5	17	3
11/06	280	376	16	33	37	3	13	2
12/06	286	412	17	33	38	5	17	3
13/06	236	376	19	38	42	4	13	2
14/06	278	409	13	30	38	5	17	3
17/06	286	412	17	33	38	5	17	3
18/06	271	413	9	36	39	4	18	3
19/06	280	376	16	33	37	5	13	2
20/06	280	376	9	33	37	4	11	2
21/06	280	376	16	33	37	5	13	2

24/06	280	376	16	33	37	5	13	2
25/06	280	376	11	33	37	5	12	2
26/06	278	409	13	30	38	3	17	3
27/06	281	348	23	35	39	5	13	2
28/06	278	409	13	30	38	5	17	3

Tabla 3.8. Cantidad de vehículos para todo el sector en hora valle. Por los autores.

Tipo de Vehículo	Cantidad Promedio	Desviación Estándar
Moto	277	12
Automóvil	390	21
Furgoneta	15	4
Pickup	33	2
Colectivo	38	1
Bus	5	1
Camión	15	2
Tractomula	2	1

Tabla 3.9. Cantidad promedio de vehículos para todo el sector en la hora valle. Por los autores.

- **Rutas:** Se identificaron diferentes trayectorias³ que pueden ser elegidas por los conductores en el sector, algunas de ellas se presentan en la figura 3.4 y 3.5. Para cada trayectoria se registraron los diferentes tipos de vehículos y su cantidad durante el tiempo de observación.



Figura 3.4. Trayectorias de acceso al sector estudiado en la intersección de la calle 25N. Tomado de Google Earth.

³ La trayectoria de los vehículos comprende su origen y las vías seleccionadas por el conductor para llegar a su destino.



Figura 3.5. Trayectorias de acceso vehicular al sector estudiado en la Glorieta Antonio Nariño. Tomado de Google Earth.

En la tabla 3.10 se presenta el promedio del conteo realizado en una de las rutas del sector durante la hora pico, el total de trayectorias determina el flujo vehicular en el sector. Las trayectorias consideradas se describen en detalle en el anexo A3.

Tipo de Vehículo	Cantidad promedio hora pico
Moto	106
Automóvil	131
Furgoneta	5
Pickup	14
Colectivo	35
Bus	5
Camión	11
Tractomula	3

Tabla 3.10. Cantidad de vehículos de norte a sur en Campanario. Por los autores.

3.1.4. Adaptación del modelo de movilidad

Una vez identificadas las variables del modelo de movilidad de Krauss y seleccionado el sector en la ciudad de Popayán, se adaptó el mapa conceptual propuesto en [3] para la generación de modelos de movilidad, tomando los aspectos relevantes en la representación de las características de movilidad vehicular del sector.

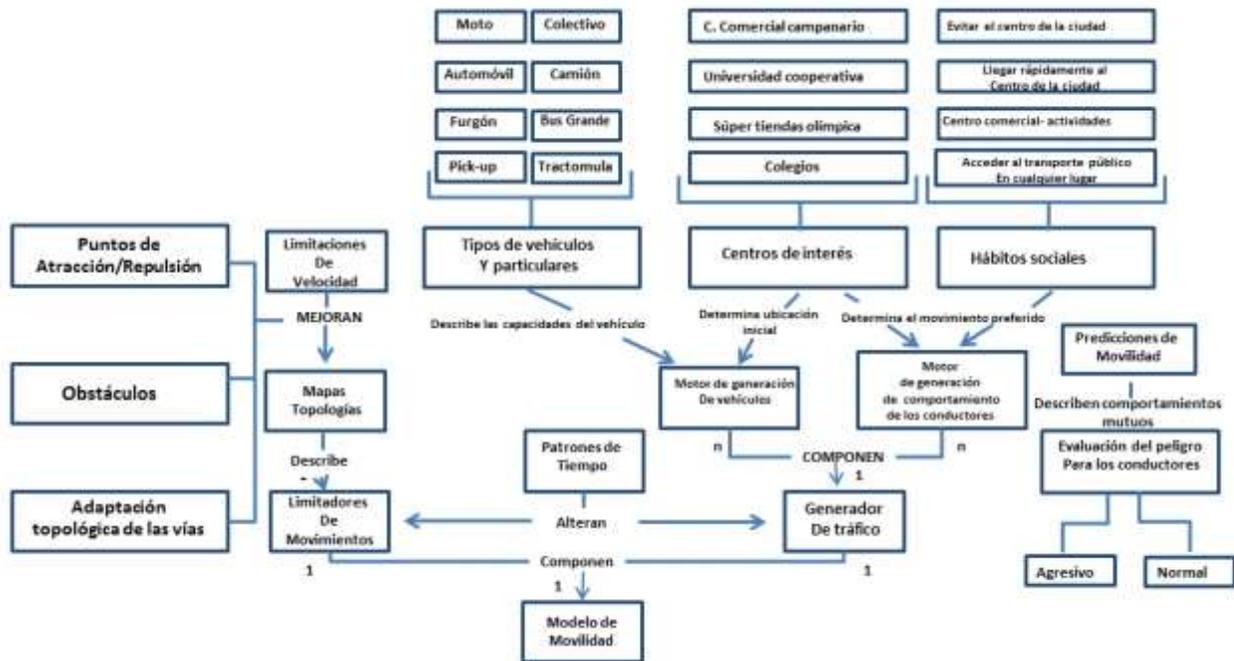


Figura 3.6. Extensión del mapa conceptual propuesto en [3] para la adaptación de un modelo de movilidad vehicular. Por los autores.

En la figura 3.6 se presenta la adaptación propuesta para el esquema de generación de modelos de movilidad, la cual consiste en la extensión funcional del mapa conceptual visto, de esta forma se buscó generar un modelo de acuerdo a características propias del entorno de movilidad. Las adaptaciones realizadas basadas en la extensión mencionada se presentan a continuación, obteniendo al final de este proceso una definición de los parámetros de configuración y las trayectorias para cada tipo de vehículo.

3.1.4.1. Limitaciones de Velocidad

A pesar de que dentro del perímetro urbano de la ciudad de Popayán los vehículos no deben circular a más de 60 Km/h (Artículo 106 Código Nacional de Tránsito de Colombia) y en el sector existen señales indicando la reducción de velocidad en diferentes tramos, tal como se muestra en la figura 3.7, en el sector se registraron velocidades superiores; por lo tanto, este aspecto legal no se consideró como una limitación de velocidad, pero se incluyó esa velocidad límite en el diseño de la carretera.



Figura 3.7. Indicador de máxima velocidad frente a la Universidad Cooperativa sentido norte-sur.

3.1.4.2. Puntos de Atracción y Hábitos Sociales

En la adaptación del mapa conceptual se decidió unir estos dos aspectos, ya que cuando se habla de puntos de atracción se quiere mostrar aquellos lugares a los cuales los conductores prefieren dirigirse y para hacerlo también tienen una trayectoria preferida, que está determinada por los hábitos sociales [3]. En la ciudad de Popayán los conductores escogen esta vía para llegar rápidamente al centro de la ciudad, también se utiliza esta autopista precisamente para evitar pasar por el centro de la ciudad en el caso de un desplazamiento entre norte y sur.

El Centro Comercial Campanario es uno de los puntos de atracción principales de la zona. Los habitantes de sectores residenciales cercanos, y en general de toda la ciudad, ven en este centro comercial el lugar propicio para diferentes actividades; por lo tanto, el número de vehículos que circulan en el sector aumentó en el momento en que el centro comercial inició sus actividades; de sus instalaciones entran y salen vehículos, especialmente camiones, vehículos particulares y motocicletas.

La sede de la Universidad Cooperativa, Súper Tiendas Olímpica y los colegios del sector (Salesianas, Seminario, Gimnasio Moderno y algunos centros prescolares) son otros puntos de atracción importantes en el sector.

En el caso de los vehículos de transporte público se observa que la presencia de los puntos de atracción mencionados y la falta de regulación en cuanto a la organización de parqueaderos en el sector hace que los peatones quieran acceder en cualquier lugar de la zona a los vehículos de servicio público; aunque en ocasiones prefieren realizarlo en una de las salidas peatonales del Centro Comercial Campanario y en los paraderos demarcados frente al colegio Sagrado Corazón de Jesús (Salesianas).

El modelo de movilidad adaptado debe contemplar el origen y el destino de los vehículos en el sector, representar el efecto de las paradas de los vehículos de servicio público; y siguiendo los hábitos sociales descritos anteriormente, complementar la construcción del motor de generación de vehículos y completar el generador de tráfico mostrado en la figura 3.6 (extensión del mapa conceptual para generación de modelos de movilidad).

De acuerdo a lo anterior y a la extensión del mapa conceptual de la figura 3.6, la adaptación topológica de las vías, la determinación de los puntos de atracción y repulsión, y la ubicación de los centros de interés que describen los limitadores de movimiento están contempladas en el proceso de construcción del mapa del sector. Teniendo en cuenta la ubicación de estos puntos de atracción, la influencia de los mismos en los hábitos sociales y en el incremento de la densidad vehicular en la zona, se representaron las trayectorias de acceso a estos sitios, definidas en el generador de tráfico. Estas trayectorias constan de un flujo de vehículos que representa el incremento en densidad vehicular generado por los puntos de atracción en el sector, adaptándose de esta forma al comportamiento real en la zona que se pretende reflejar en la adaptación del modelo de movilidad.

3.1.4.3. Velocidad máxima en el sector

De acuerdo a la clasificación de vías descrita en [35], una vía como la Avenida Panamericana entre calles 18N y 27N conserva unas características similares en cuanto a geometría y concentración de peatones, pero las velocidades de los vehículos cambian a medida que se acercan a la Glorieta Antonio Nariño y a los semáforos de la intersección en la calle 25N.

El modelo de movilidad adaptado se encarga de establecer la velocidad de los vehículos en cada paso de tiempo discreto durante el tiempo de simulación, pero es necesario definir un límite de velocidad máximo para todos los tipos de vehículo con el fin de completar toda la información necesaria en el cálculo de la velocidad y distancia segura. La zona de estudio presenta un sector en el cual los vehículos alcanzan su máxima velocidad precisamente por hallarse más alejados de los semáforos y la glorieta; por lo tanto, durante 5 días de observación adicionales se registraron las diferentes velocidades alcanzadas por los vehículos en ese sector. En la figura 3.8 se observa en color rojo el tramo de máxima velocidad.



Figura 3.8. Tramo de máxima velocidad en el sector. Tomada de Google Earth.

De acuerdo a la recomendación presentada en [36], se debe registrar la velocidad con una muestra representativa de vehículos que permita obtener la velocidad para el percentil⁴ 85 si se quiere encontrar la velocidad máxima, segura y cómoda adoptada por la mayoría de conductores. De este estudio se obtuvo la velocidad de punto⁵ en el tramo considerado de máxima velocidad en el sector, de acuerdo a las observaciones realizadas durante el conteo de vehículos.

- **Longitud del tramo:** Siguiendo la recomendación presentada en [36] y [37] para velocidades esperadas entre 40 y 65 Km/h se demarcó un tramo de 50 m para realizar las mediciones. La ubicación de los puntos de referencia se determinó conduciendo un vehículo en la zona de estudio durante un horario de libre tránsito vehicular para determinar el sector en donde se lograba la mayor velocidad (método del vehículo flotante [38]).
- **Método de medición:** Se realizó una medición manual en la zona previamente demarcada, con el fin de registrar las velocidades cronometrando el tiempo empleado por los vehículos en recorrer la distancia entre dos postes de referencia. Un observador en cada calzada registró el tiempo para los vehículos, como se observa en la figura 3.9, buscando obtener una mayor cantidad de datos respecto del tamaño de la muestra mínima calculada con el fin de corregir el error debido a la menor percepción del punto opuesto. De acuerdo a [32], es conveniente tener en cuenta realizar la medición sobre el primer vehículo en un grupo y evitar el muestreo de una proporción muy alta de vehículos que viajen a altas velocidades.

⁴ Percentil son números que dividen en 100 partes iguales un conjunto de datos ordenados. Por tanto, el percentil k es el valor debajo del cual se encuentra el k% de las observaciones [39].

⁵ La velocidad de punto es la velocidad V_i al paso de un vehículo por una determinada sección transversal de una carretera [36]



Figura 3.9. Observador 1 y 2 en cada calzada midiendo el tiempo que toma a los vehículos recorrer la distancia demarcada. Por lo autores.

- **Horario de medición:** Para encontrar la velocidad máxima a la que pueden viajar los vehículos en el tramo de estudio, las mediciones se realizaron entre las 9:30 a.m. y las 10:30 a.m. por ser un horario de libre tránsito vehicular y cumplir con los horarios recomendados en [37].

Para determinar una velocidad máxima representativa de los vehículos en el tramo donde se realizó la medición con la certeza de que los valores obtenidos contengan únicamente errores tolerables [36], se estableció una muestra significativa de esa población utilizando una cantidad mínima de datos dada por la ecuación 3.1 [36].

$$N = \frac{\sigma^2 \cdot K^2 \cdot (2 + U^2)}{2 \cdot E^2} \quad (3.1)$$

Donde:

N : Tamaño mínimo de la muestra (cantidad de vehículos).

σ : Desviación estándar estimada de la muestra.

K : Constante correspondiente a un nivel de confianza deseado.

E : Error permitido en la estimación de velocidad.

U : Constante correspondiente a la velocidad estadística deseada.

Para el valor de la desviación estándar en [35] y [37] se recomienda tomar el valor de 8 Km/h con base en los valores estimados en los estudios viales para diferentes tipos de carreteras y áreas de tránsito presentados en la tabla 3.11.

Área de Tránsito	Tipo de Carretera	Desviación Estándar Media (Km/h).
Rural	2 carriles	8.5
Rural	4 carriles	6.8
Intermedio	2 carriles	8.5
Intermedio	4 carriles	8.5
Urbana	2 carriles	7.7
Urbana	4 carriles	7.9
Valor Redondeado		8.0

Tabla 3.11. Desviación Estándar de acuerdo al área de tránsito y tipo de carretera [32].

Según [32], $K = 2$ es un valor comúnmente utilizado para determinar velocidades de punto con un nivel de confianza del 95.5%. Se utilizó el valor $K = 1.96$, por ser el valor usado en el sector analizado en una vía de similares características en Ibagué [36] para obtener un nivel de confianza del 95%. En la tabla 3.12 se presentan valores adicionales para K .

Constante K	Nivel de Confianza (%)
1.00	68.3
1.50	86.6
1.64	90.0
1.96	95.0
2.00	95.5
2.50	98.8
2.58	99.0
3.00	99.7

Tabla 3.12. Constantes correspondientes al nivel de confianza [32].

Se tomó el valor de +/- 2 Km/h como error permitido en la estimación de velocidad de acuerdo a la recomendación presentada en [36]. Para la velocidad estadística deseada U se tomó el valor de 1.04 correspondiente al percentil 85 [36].

De acuerdo a estos valores el tamaño mínimo de la muestra está dado por la ecuación 3.2.

$$N = \frac{8^2 \cdot (1.96)^2 \cdot (2 + 1.04^2)}{2 \cdot (2)^2} \approx 95 \quad (3.2)$$

En cada periodo determinado para la recolección de la información (una hora) los dos observadores registraron 95 muestras de velocidad, utilizando el método descrito, pero estas se extendieron durante toda la semana en el mismo horario buscando un mayor nivel de certeza en la información obtenida. Los valores más representativos encontrados son:

- Valor máximo de velocidad obtenido: 91,84 Km/h.
- Valor mínimo de velocidad: 36,14 Km/h.
- Tamaño de la muestra: 950 vehículos.

En la tabla 3.13 se presenta el resumen de datos obtenidos, donde:

N_i: Clase (Intervalo de datos numéricos, obtenido con base en el valor máximo y mínimo de velocidad registrados).

L_i: Límite inferior del intervalo de clase.

V_i: Marca de clase, en este caso la velocidad puntual.

f_i: Frecuencia.

f_i%: Frecuencia expresada en porcentaje.

F_i: Frecuencia acumulada.

F_i%: Frecuencia acumulada expresada en porcentaje.

Ni	Intervalo de Clase		Vi (Km/h)	fi	fi (%)	Fi	Fi (%)
	Li	Ls					
1	35,99	43,99	39,99	27	2,84210526	27	2,84210526
2	43,99	51,99	47,99	354	37,2631579	381	40,1052632
3	51,99	59,99	55,99	304	32	685	72,1052632
4	59,99	67,99	63,99	97	10,2105263	782	82,3157895
5	67,99	75,99	71,99	72	7,57894737	854	89,8947368
6	75,99	83,99	79,99	56	5,89473684	910	95,7894737
7	83,99	91,99	87,99	40	4,21052632	950	100
TOTAL				950	100		

Tabla 3.13. Resumen de los datos recolectados en los 5 días de observación. Por los autores.

En el histograma de frecuencias de la figura 3.10 se muestra la cantidad de vehículos que se desplazaron por el sector a una velocidad determinada, y en el polígono de frecuencias de la figura 3.11 se muestra esa información de manera continua.

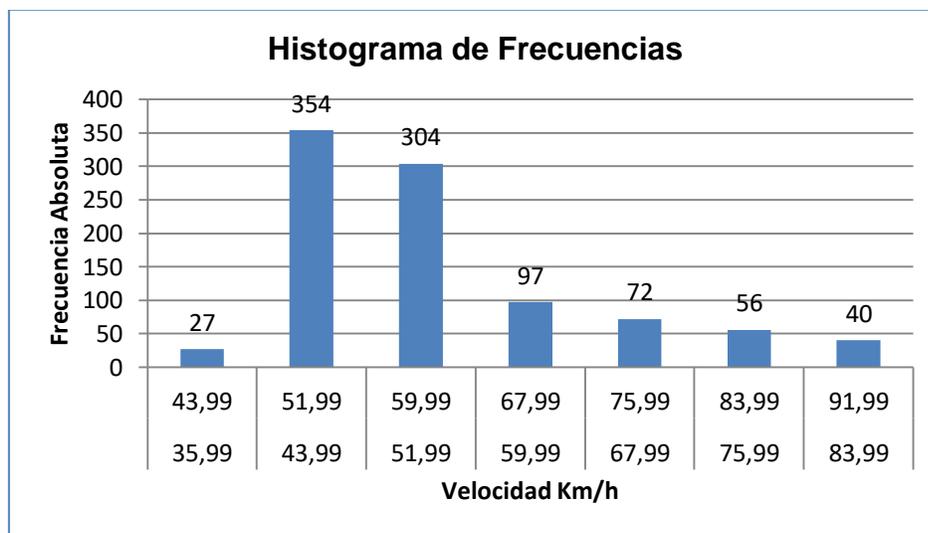


Figura 3.10. Cantidad de vehículos en el tramo según su velocidad. Por los autores.

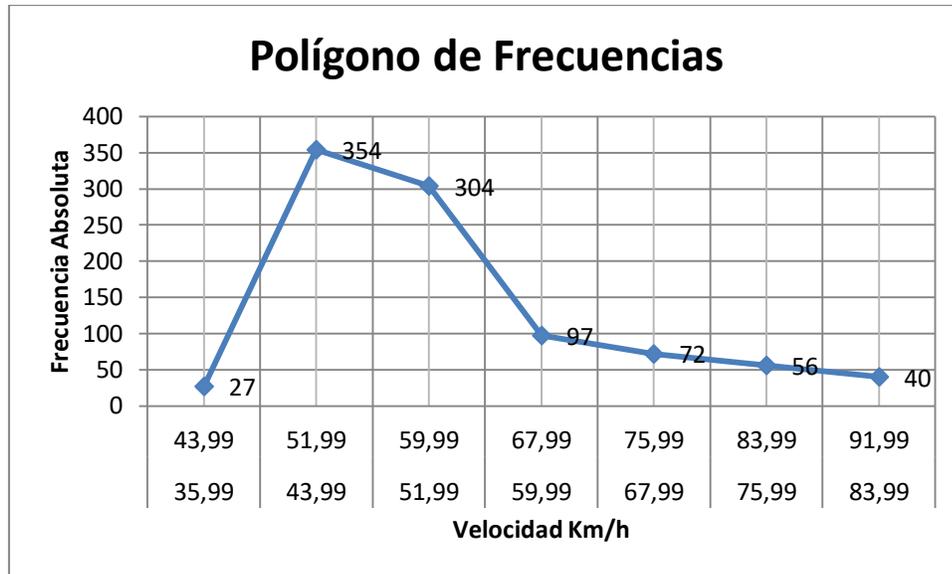


Figura 3.11. Cantidad de vehículos en el tramo según su velocidad (datos continuos). Por los autores.

Para visualizar el percentil 85 se construyó la ojiva porcentual de la figura 3.12 que indica el porcentaje de vehículos viajando respecto de cierta velocidad.

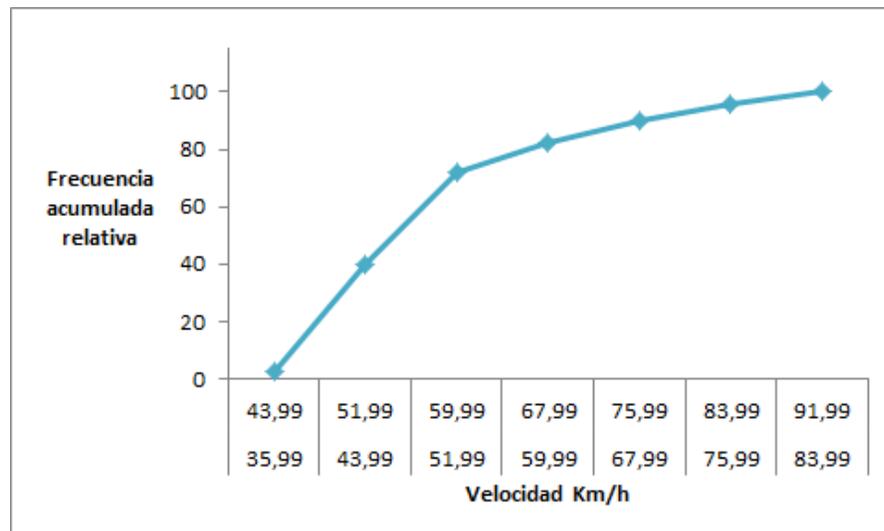


Figura 3.12. Ojiva Porcentual de velocidades en el tramo. Por los autores.

Los valores del percentil 85, la media y la desviación estándar fueron obtenidos siguiendo la información para cálculos de estadística descriptiva de [39], en el caso del percentil 85 se usó la ecuación 3.3 para datos agrupados.

$$P_k = L_k + \frac{k\left(\frac{n}{100}\right) - F_k}{f_k} * C \quad (3.3)$$

Donde:

$$k = 1, 2, 3, \dots, 99$$

L_k : Límite inferior.

n : número de datos.

F_k : Frecuencia acumulada de la clase anterior.

f_k : Frecuencia de la clase.

C : Longitud del intervalo.

Por lo tanto, el percentil 85 viene dado por.

$$P_{85} = 67,99 + \frac{85 \left(\frac{950}{100} \right) - 782}{72} * 8 = 70,82 \frac{Km}{h}$$

El valor de la media se obtuvo utilizando la ecuación 3.4.

$$\bar{V} = \frac{\sum(V_i \cdot f_i)}{n} \quad (3.4)$$

$$\bar{V} = \frac{54478,50}{950} = 57,35 \frac{Km}{h}$$

Para conocer la variación de las velocidades observadas respecto a la media se calculó la desviación estándar utilizando la ecuación 3.5.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\bar{V} - V_i)^2 * f_i}{n}} \quad (3.5)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\bar{V} - V_i)^2 * f_i}{n}} = \sqrt{\frac{125677,74}{950}} = 11,5 \frac{Km}{h}$$

De acuerdo a los resultados obtenidos, el valor de la media se interpretó como la velocidad máxima a la que un conductor que desee desplazarse rápidamente debe limitarse en ese sector. Pero en el proceso de generación de la velocidad segura en el modelo de movilidad de Krauss es necesario establecer la velocidad máxima que los conductores desean alcanzar en ese tramo, y de acuerdo a [36] la velocidad aceptada por el 85% de los conductores representa ese valor. El modelo de movilidad adaptado realizará los ajustes necesarios en cada instante de tiempo para reducir o aumentar esa velocidad de acuerdo a los límites de velocidad de la vía y teniendo en cuenta el estudio de comportamiento de los conductores. Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones se extendió el número de intervalos de clase en los datos agrupados, buscando un mayor nivel de certeza para el dato del percentil 85 a utilizar en la adaptación de las ecuaciones del modelo de movilidad de Krauss. Se realizó el mismo análisis estadístico previo, basado en la información de la tabla 3.14 utilizando 11 intervalos de clase.

Ni	Intervalo de Clase		Vi (Km/h)	fi	fi (%)	Fi	Fi (%)
	Li	Ls					
1	30,99	36,99	33,99	1	0,10526316	1	0,10526316
2	36,99	42,99	39,99	8	0,84210526	9	0,94736842
3	42,99	48,99	45,99	207	21,7894737	216	22,7368421
4	48,99	54,99	51,99	323	34	539	56,7368421
5	54,99	60,99	57,99	153	16,1052632	692	72,8421053
6	60,99	66,99	63,99	72	7,57894737	764	80,4210526
7	66,99	72,99	69,99	65	6,84210526	829	87,2631579
8	72,99	78,99	75,99	45	4,73684211	874	92
9	78,99	84,99	81,99	50	5,26315789	924	97,2631579
10	84,99	90,99	87,99	25	2,63157895	949	99,8947368
11	90,99	96,99	93,99	1	0,10526316	950	100
TOTAL				950	100		

Tabla 3.14. Datos agrupados para las definiciones de velocidad. Por los autores.

En el histograma de frecuencias de la figura 3.13 se muestra la cantidad de vehículos que se desplazaron por el sector a una velocidad determinada, en los nuevos intervalos de clase definidos para este análisis. En el polígono de frecuencias de la figura 3.14 se observa esta información de manera continua.

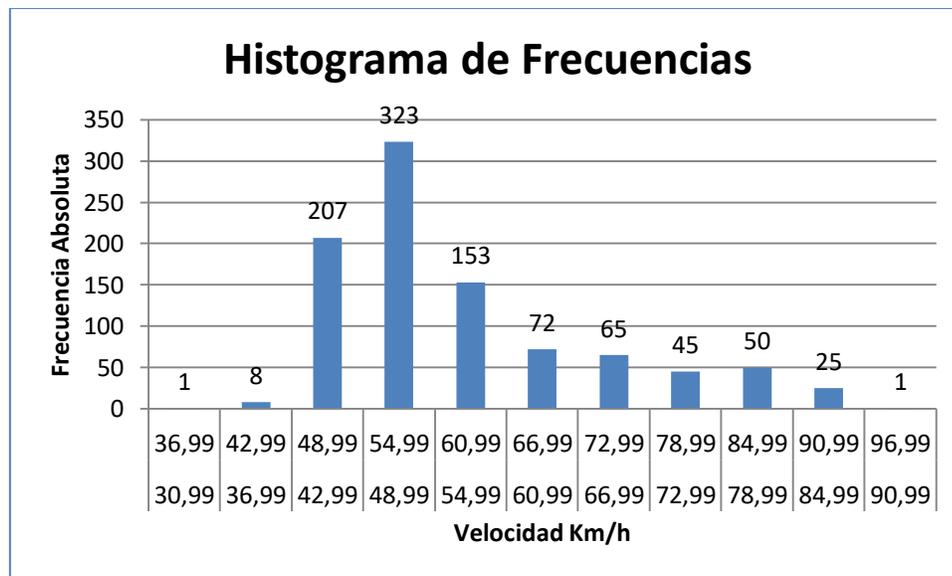


Figura 3.13. Cantidad de vehículos en el tramo según su velocidad para 11 intervalos de clase. Por los autores.

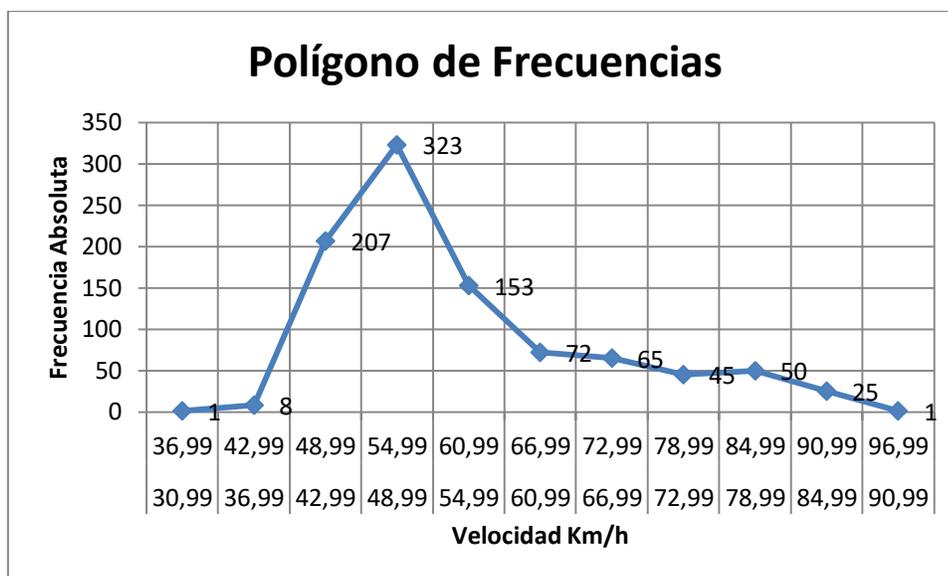


Figura 3.14. Cantidad de vehículos en el tramo según su velocidad (datos continuos). Por los autores.

Para visualizar el percentil 85, siguiendo la tabla 3.14, se construyó la ojiva porcentual de la figura 3.15 que indica el porcentaje de vehículos viajando a cierta velocidad.

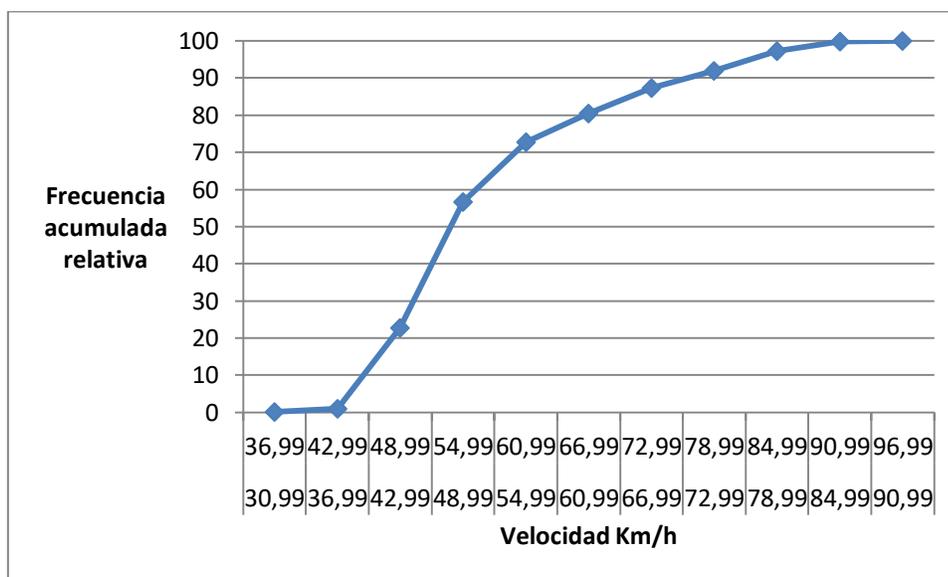


Figura 3.15. Ojiva Porcentual de velocidades en el tramo. Por los autores.

Los valores del percentil 85, la media y la desviación estándar fueron obtenidos siguiendo la información para cálculos de estadística descriptiva en la misma forma que en el caso anterior; para el percentil 85 se obtuvo el siguiente resultado utilizando nuevamente la ecuación 3.4 para datos agrupados.

Por lo tanto, para $k=85$, se obtuvo.

$$P_k = L_k + \frac{k \left(\frac{n}{100} \right) - F_k}{f_k} * C = 66,99 + \frac{85 \left(\frac{950}{100} \right) - 764}{65} * 6 = 71,01 \frac{Km}{h}$$

El valor de la media y desviación estándar, para esta nueva tabla, fue de 57,38 Km/h y 11,4 Km/h respectivamente.

$$\bar{V} = \frac{\sum(V_i \cdot f_i)}{n} = \frac{54478,50}{950} = 57,38 \frac{Km}{h}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(\bar{V} - V_i)^2 * f_i}{n}} = \sqrt{\frac{123375,45}{950}} = 11,4 \frac{Km}{h}$$

Como la velocidad es uno de los parámetros relevantes en el proceso de actualización del sistema en el modelo de movilidad de Krauss, se propone la adaptación de las ecuaciones del modelo teniendo en cuenta las observaciones de velocidad realizadas, las cuales son influenciadas por las características del sector contempladas en el esquema funcional adaptado para la generación de modelos de movilidad. Los valores para la velocidad expresada en el percentil 85, la velocidad media y la desviación estándar se establecieron en m/s para utilizar las unidades en las que trabaja el modelo de movilidad de Krauss, por lo tanto:

$$V_{m\acute{a}x} = P_{85} = 71,01 \frac{Km}{h} = 19,7 \frac{m}{s}$$

$$\bar{V} = 57,38 \frac{Km}{h} = 15,9 \frac{m}{s}$$

$$\sigma = 11,4 \frac{Km}{h} = 3,2 \frac{m}{s}$$

Los histogramas y los polígonos de frecuencia representan los valores representativos de velocidad en el sector. En la figura 3.16 se muestran estas representaciones superponiendo el polígono de frecuencias sobre el histograma respectivo.

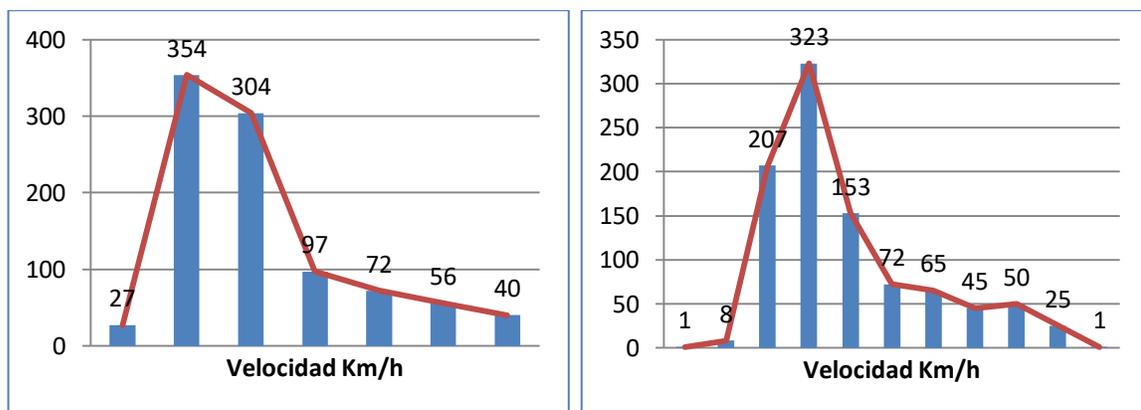


Figura 3.16. Velocidades alcanzadas por los vehículos en el sector durante los 5 días de observación. Por los autores.

En el proceso de adaptación se relacionó la curva descrita por la velocidad con alguna función de densidad de probabilidad establecida, para poder mostrar a través de una variable aleatoria, el comportamiento característico de las velocidades observadas en las ecuaciones de actualización del modelo de movilidad de Krauss. En las figuras 3.17, 3.18 y 3.19 se presenta la comparación entre las curvas de las funciones de densidad de probabilidad Normal, Rayleigh y Burr con el histograma de frecuencias para los datos de velocidad registrados en el sector.

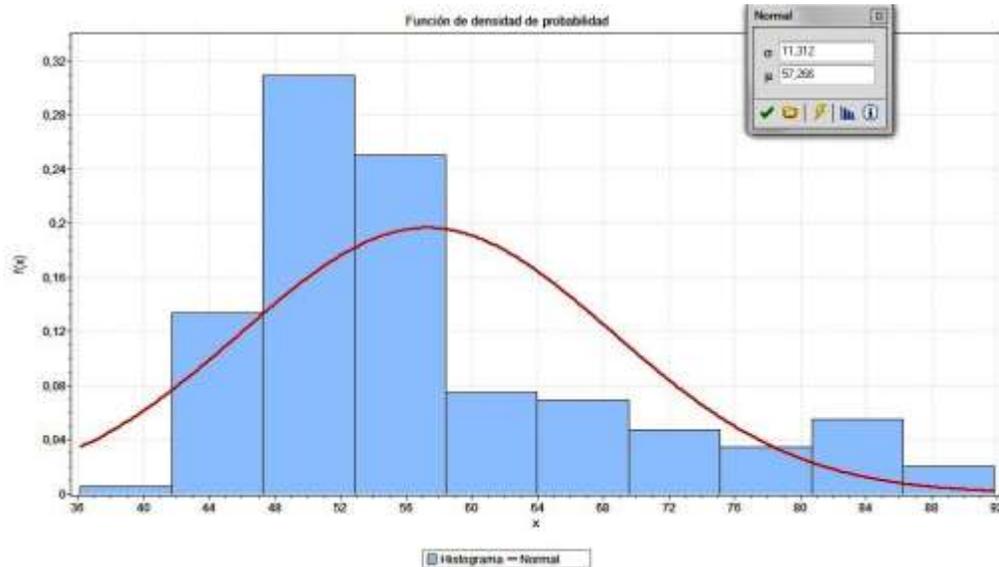


Figura 3.17. Función de densidad de probabilidad Normal sobre el histograma de frecuencias. Tomada de “Easy Fit Professional”⁶ Versión 5.5.

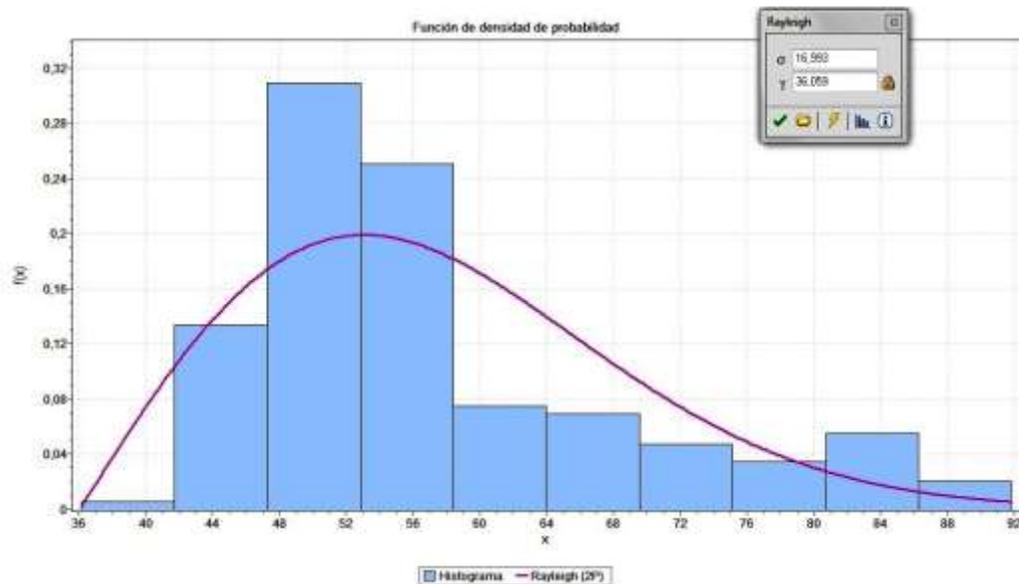


Figura 3.18. Función de densidad de probabilidad Rayleigh sobre el histograma de frecuencias. Tomada de “Easy Fit Professional” Versión 5.5.

⁶ Easy Fit Professional versión 5.5 es un software propiedad de MathWave Technologies, en versión de prueba, que permite la comparación entre un grupo de datos y diversas funciones probabilísticas.

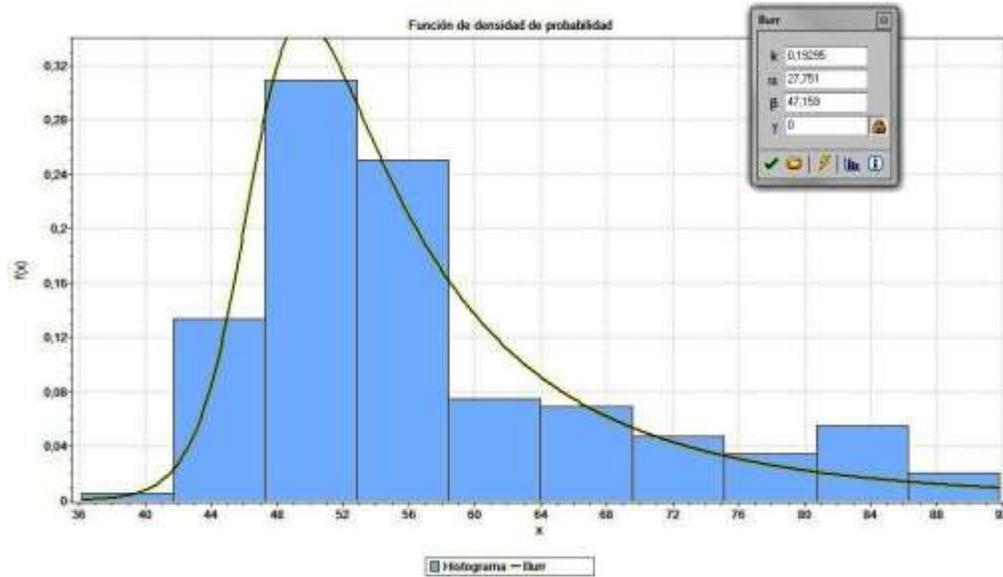


Figura 3.19. Función de densidad de probabilidad Burr sobre el histograma de frecuencias. Tomada de “Easy Fit Professional” Versión 5.5.

De las 3 figuras anteriores se observa que la función de densidad de probabilidad de Burr es la que mejor se ajusta al comportamiento de la velocidad mostrado en el histograma. Esta función, en la teoría de la econometría⁷, es una distribución continua para un valor no negativo de la variable aleatoria, se conoce también bajo el nombre de distribución de Singh-Maddala [40]. Su función de densidad de probabilidad viene dada por la ecuación 3.6.

$$f(x) = c \cdot k \frac{\left(\frac{x}{\beta}\right)^{c-1}}{\beta \left[1 + \left(\frac{x}{\beta}\right)^c\right]^{k+1}} \quad x \geq 0 \quad (3.6)$$

Los parámetros c y k son parámetros de forma y β es un parámetro de escala; se utilizó el software de ajuste para determinar estos parámetros en la función de densidad que caracteriza el comportamiento de la velocidad en el sector, por lo tanto se define una variable aleatoria W con función de densidad $f_W(w)$ expresada en la ecuación 3.7.

$$W \sim f_W(w) = 27,80(0,19) \frac{\left(\frac{w}{47,16}\right)^{27,80-1}}{47,16 \left[1 + \left(\frac{w}{47,16}\right)^{27,80}\right]^{0,19+1}}$$

$$f_W(w) = 5,28 \frac{\left(\frac{w}{47,16}\right)^{26,80}}{47,16 \left[1 + \left(\frac{w}{47,16}\right)^{27,80}\right]^{1,19}} \quad (3.7)$$

Por ser una variable aleatoria continua, al integrar la función de densidad es posible determinar la probabilidad de que un vehículo, al desplazarse por el sector, obtenga una velocidad entre un intervalo de valores, por ejemplo entre 30 y 50 km/h.

⁷ La econometría realiza el análisis cuantitativo de fenómenos económicos basándose en las matemáticas, la inferencia estadística y la teoría económica.

Teniendo en cuenta el estudio de tráfico, el cual entregó los resultados que permitieron la determinación del comportamiento de la velocidad alcanzada por los vehículos en el sector y la velocidad máxima, se propone la adaptación de las ecuaciones del modelo de movilidad de Krauss al involucrar estos dos factores en los pasos discretos de actualización para la posición y la velocidad en cada instante de tiempo. Las ecuaciones 3.8 a 3.11 presentan el cambio mencionado.

$$v_{safe}(t) = W + \frac{g(t) - g_{des}(t)}{\tau_b + \tau} \quad (3.8)$$

$$v_{des}(t) = \text{mín} \left[v_{máx} = P_{85} = 19,7 \frac{m}{s}, W + a(v)\Delta t, v_{safe}(t) \right] \quad (3.9)$$

$$v(t + \Delta t) = \text{máx} [0, v_{des}(t) - \eta] \quad (3.10)$$

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v\Delta t \quad (3.11)$$

Donde W es una variable aleatoria Burr con media 15,9 m/s y desviación estándar 3,2 m/s.

3.1.4.4. Estudio de comportamiento en los conductores

El comportamiento de los conductores en la vía no solo depende de la capacidad física de cada individuo, sino que también está relacionado con sus perfiles psicológicos. Teniendo en cuenta la consideración de la administración general de seguridad vial de Estados Unidos (NHTSA, *National Highway Traffic Safety Administration*), donde se define la conducción agresiva cuando “*un individuo comete una combinación de maniobras infractoras que pone en peligro a otras personas o propiedades*” [41], se definen dos tipos de conductores en las vías con base en su conducta al conducir: agresivo y normal.

- **Conductor Agresivo:** Ubicando en el contexto local la definición de la NHTSA se establecieron conductas típicas para identificar conductores agresivos:
 - Desplazarse a velocidades muy altas, respecto de los otros vehículos en el sector.
 - Acelerar y frenar de forma violenta.
 - Manejar muy cerca a otros vehículos.
 - Frenar bruscamente.
 - No respetar los semáforos en rojo.
 - Cambio de carril de manera peligrosa.
- **Conductor Normal:** Conducen tranquilos y se adaptan con facilidad a las condiciones y situaciones del camino, estos conductores respetan las normas de tránsito de cada lugar.

Como parte del proceso de adaptación del modelo de movilidad se propone representar este comportamiento humano extendiendo la definición para cada uno de los tipos de vehículos existentes en el entorno de movilidad del sector. Un vehículo tipo “automóvil” ahora tendrá, además de las características definidas previamente (velocidad máxima,

tamaño), la representación del comportamiento humano para cada tipo de conductor de acuerdo a la clasificación anterior. En la figura 3.20 se presenta el esquema que involucra el comportamiento humano en las definiciones para los tipos de vehículo.



Figura 3.20. Definición de los tipos de vehículo incluyendo las características de conducción. Por los autores.

Algunas de estas características están relacionadas con los aspectos técnicos de los vehículos, pero se propone utilizar algunas de ellas relacionándolas al comportamiento de los conductores. De esta manera, los conductores, y sus maniobras agresivas, serán representados en la simulación de tráfico, considerándolos como unidades vehículo-conductor. Por lo tanto, el entorno de movilidad será diferente respecto del establecido con los valores típicos definidos en el modelo de Krauss original, en donde se fija el mismo valor de tamaño, aceleración, velocidad máxima y tiempo de reacción para todos los vehículos involucrados.

3.1.4.5. Asignación de valores a los parámetros escogidos

Según las recomendaciones para implementar simulaciones de tráfico microscópico presentadas en [42] de la Administración Federal de Carreteras (FHWA, *Federal Highway Administration*) las características de los vehículos involucrados en la simulación pueden extraerse de una tabla de valores estándar presentada en el documento en ausencia de documentación oficial del instituto de transporte local. En el desarrollo del modelo de tráfico utilizando VISSIM para el centro de la ciudad de Wokingham en Inglaterra se usó este procedimiento [43].

En la Secretaría de Tránsito Municipal no se obtuvo un estudio con todas las características necesarias para la adaptación del modelo de movilidad, y teniendo en cuenta que no se tenían los recursos necesarios para llevar a cabo un estudio completo para determinar las características técnicas de todos los vehículos que circulan por el sector, se utilizaron los valores de la tabla 3.15 que complementan los estudios realizados de velocidad, variedad vehicular y comportamiento de los conductores.

Tipo de Vehículo	Longitud (m)	Aceleración máxima (m/s ²)	Desaceleración máxima (m/s ²)
Motocicleta	2,2	3,05	4,58
Automóvil	4,27	3,05	4,58
Furgoneta	5	3,05	4,58
Pick-up	5	3,05	4,58
Colectivo	7	1,52	4,58
Bus	14	1,52	4,58
Camión	12	0,92	4,58
Tractomula	18,5	0,61	4,58

Tabla 3.15. Características de los vehículos para simulación microscópica de tráfico. Adaptada de [42].

Retomando la clasificación propuesta en la figura 3.14, para conductores normales y agresivos, se establecieron los valores de las variables del modelo de Krauss utilizadas en el proceso de adaptación en todos los tipos de vehículo con características de conducción normales, las cuales se consignan en la tabla 3.16

La velocidad máxima se determinó en el estudio de velocidad puntual y se asignó a los dos tipos de conductores. El tiempo de reacción de los conductores τ es determinante en el modelo de movilidad de Krauss para definir el espaciamiento deseado entre vehículos, como se mostró en la siguiente ecuación 2.10 del segundo capítulo.

El valor de esta variable fue establecido de acuerdo a un estudio experimental del tipo *car-following* realizado en una vía de dos carriles en Australia⁸ la cual presentaba características muy similares a las de la vía seleccionada para el desarrollo del trabajo de grado [44]. El valor que representa la imperfección del conductor (σ) se mantuvo en el valor por defecto presentado en el desarrollo del modelo de Krauss ante la dificultad de establecer un valor que represente la habilidad de un conductor tan solo con el proceso de observación del tráfico vehicular.

Tipo de vehículo	Aceleración (m/s ²)	Desaceleración (m/s ²)	Sigma	Longitud (m)	Velocidad Máxima (m/s)	Tau (s)
Moto	3,05	4,58	0,5	2,2	19,7	0,92
Automóvil	3,05	4,58	0,5	4,27	19,7	0,92
Furgoneta	3,05	4,58	0,5	5	19,7	0,92
Pick-up	3,05	4,58	0,5	5	19,7	0,92
Colectivo	1,52	4,58	0,5	7	19,7	0,92
Bus grande	1,52	4,58	0,5	14	19,7	0,92
Camión	0,92	4,58	0,5	12	19,7	0,92
Tractomula	0,61	4,58	0,5	18,5	19,7	0,92

Tabla 3.16. Valores de las variables del modelo de Krauss para conductores normales. Por los autores.

⁸ Se utilizó esta información porque no fue posible obtener esta información para los conductores locales en las instituciones de tránsito de la ciudad.

Para los conductores agresivos se asignó un incremento del 20% en los valores de aceleración y desaceleración, de acuerdo a la contextualización de conducción agresiva de la NHTSA. Los valores del tiempo de reacción τ y de la imperfección del conductor σ se definen de la misma forma en que se hizo para el conductor normal. En la tabla 3.17 se presenta el resumen de los valores de las variables de adaptación para los conductores agresivos.

Tipo de vehículo	Aceleración (m/s ²)	Desaceleración (m/s ²)	sigma	Longitud (m)	Velocidad Máxima (m/s)	Tau (s)
Moto	4,11	5,5	0,5	2,2	19,7	0,92
Automóvil	4,11	5,5	0,5	4,27	19,7	0,92
Furgoneta	4,11	5,5	0,5	5	19,7	0,92
Pick-up	4,11	5,5	0,5	5	19,7	0,92
Colectivo	1,82	5,5	0,5	7	19,7	0,92
Bus grande	1,82	5,5	0,5	14	19,7	0,92
Camión	1,10	5,5	0,5	12	19,7	0,92
Tractomula	0,73	5,5	0,5	18,5	19,7	0,92

Tabla 3.17. Asignación de valores a las variables de adaptación para conductores agresivos. Por los autores.

Finalmente la adaptación del modelo de movilidad de Krauss para un sector de la ciudad de Popayán contempló los siguientes procesos:

- Se construyó el mapa del sector el cual contiene el esquema vial que limita el movimiento vehicular contemplado en la generación de un modelo de movilidad de este tipo.
- Se identificaron las trayectorias que siguen los vehículos dentro del entorno, las cuales están influenciadas por los centros de interés y los hábitos sociales, que finalmente se representan en la definición de las rutas que siguen los vehículos en la simulación.
- Se realizó el cálculo de la velocidad puntual para el sector estableciendo un límite máximo siguiendo procesos y métodos de medición contemplados por la ingeniería de tráfico vehicular, posteriormente se definió una variable aleatoria que representa el comportamiento de la velocidad en el sector. Estos dos aspectos modificaron las ecuaciones del modelo adaptándolas al sector estudiado.
- Se identificaron los diferentes tipos de vehículo que se desplazaron en el sector y se combinaron sus detalles técnicos con las variables de comportamiento para involucrar en la adaptación la característica de conducción (agresiva y normal).
- De los puntos anteriores se obtienen los factores (generación de vehículos y generación de comportamiento de los conductores) que conforman el generador de tráfico, que junto a las limitaciones de movimiento, rutas y velocidad registradas componen el modelo de movilidad adaptado.

4. CAPÍTULO IV. EXPERIMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se describe el diseño del escenario de simulación propuesto en el sector escogido para la simulación de la red vehicular (Avenida Panamericana entre calles 18N - 27N), utilizando el modelo de movilidad de Krauss adaptado para dicho sector, sobre el cual se analizó la capacidad de la red vehicular teniendo en cuenta la tasa de transferencia promedio alcanzada en el sistema. De acuerdo al análisis de capacidad descrito en la sección 1.5.1 se realizó la simulación utilizando la tecnología 802.11p en la transmisión vehículo a vehículo en el dominio ad-hoc de un paquete de información, con un tamaño definido por el estándar J2375 de la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE, *Society of Automotive Engineers*) para el desarrollo de aplicaciones de seguridad; teniendo en cuenta el nivel de tráfico vehicular proporcionado por la adaptación del modelo de movilidad de Krauss.

4.1. SOFTWARE PARA LA SIMULACION DE REDES VANET

En el campo de la investigación en redes de telecomunicaciones los simuladores son parte fundamental del proceso, ya que permiten realizar pruebas a un bajo costo y en repetidas ocasiones. En el caso de las redes VANET los simuladores brindan la oportunidad de realizar pruebas en diferentes aspectos de la tecnología involucrada (protocolos, escenarios, características de la red, velocidad de transmisión, etc.) sin el riesgo y el costo de una implementación real en un ambiente vehicular.

La movilidad y el canal radio son dos aspectos fundamentales en la simulación de redes vehiculares. El simulador de tráfico realiza la representación de la movilidad vehicular implementando un modelo de movilidad. Para la representación del canal radio los simuladores de red son utilizados en las distintas pruebas de la tecnología involucrada en la comunicación que se desee simular.

A continuación se presenta una clasificación de los simuladores más utilizados para redes VANET y los simuladores de red externos, que en algunos casos, apoyan el proceso de simulación.

4.1.1. Clasificación de los simuladores para redes VANET

Un simulador para redes vehiculares debe contemplar características que le permitan reflejar el comportamiento real de la movilidad de los vehículos y la capacidad de adaptación de la red de datos a esos cambios.

4.1.1.1. Simuladores Aislados

Son simuladores de red con la capacidad de tomar como entrada modelos de movilidad que deben ser generados con anterioridad, como se observa en la figura 4.1. El principal inconveniente de este tipo de simuladores es que no existe ninguna clase de interacción entre la movilidad y el funcionamiento de la red, ya que se diseñan por separado [45]. Escenarios donde la comunicación vehicular altera la movilidad, y donde la movilidad

tendría efecto en las capacidades de la red hacen que este tipo de simuladores tengan poca utilidad en el análisis de redes vehiculares.

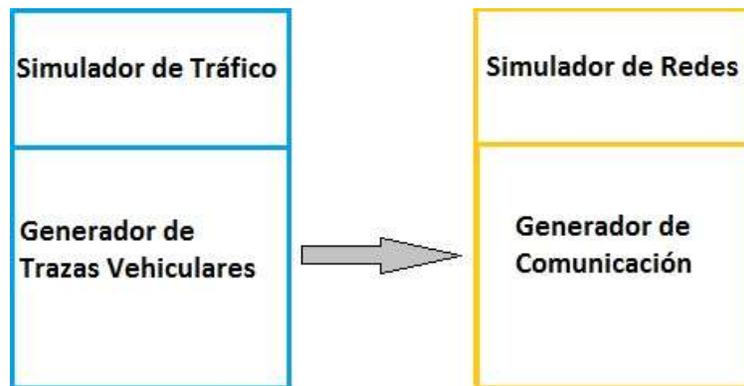


Figura 4.1. Esquema de funcionamiento de un simulador aislado. Adaptada de [45].

4.1.1.2. Simuladores Integrados

Este tipo de simuladores busca unir eficientemente la simulación de tráfico y la simulación de la red [45], buscando la interacción funcional mostrada en la figura 4.2, para que pueda representar, de una manera cercana a la realidad, el comportamiento de los nodos (vehículos).

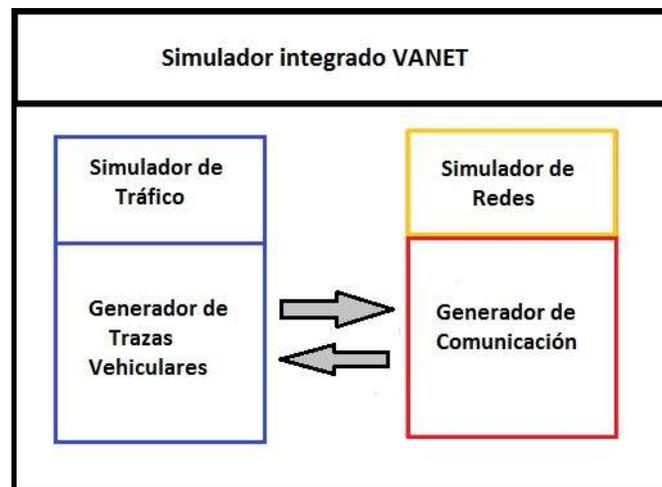


Figura 4.2. Esquema de funcionamiento de un simulador integrado. Adaptada de [45].

4.1.1.3. Simuladores Híbridos

Los simuladores híbridos proporcionan el funcionamiento en paralelo del simulador de tráfico con el simulador de red [45]. Se unen mediante una interfaz y establecen la unión híbrida interactuando dinámicamente entre sí, como se observa en la figura 4.3. Este tipo de simuladores requiere para su funcionamiento equipos que posean suficientes capacidades para soportar la carga computacional que implica el funcionamiento de los dos simuladores simultáneamente.

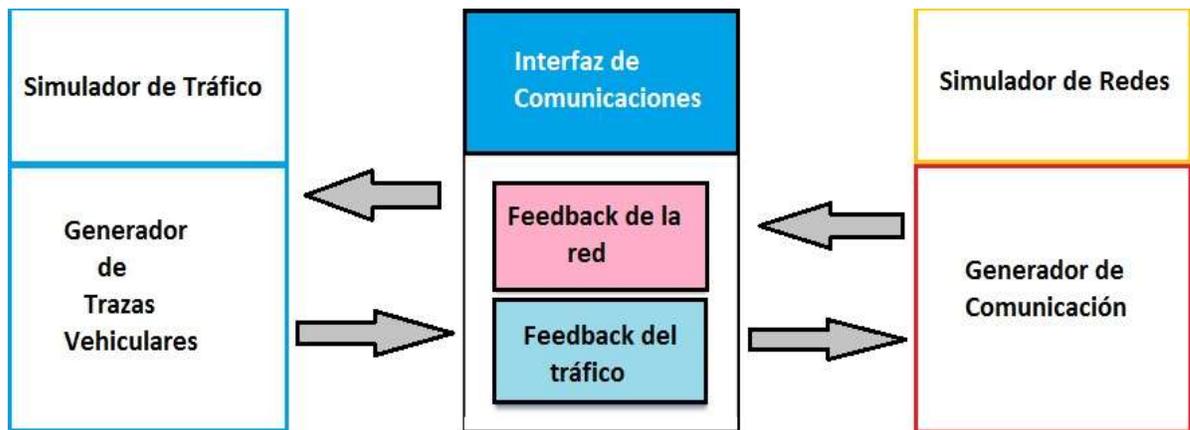


Figura 4.3. Esquema de funcionamiento de un simulador híbrido. Adaptada de [45].

4.1.2. Herramientas para la simulación de redes VANET

En las herramientas de simulación para redes VANET enmarcadas dentro de la clasificación anterior se encuentran.

4.1.2.1. Simuladores de Tráfico

Los simuladores de tráfico en un principio fueron diseñados para el análisis del tráfico vehicular en el entorno microscópico y macroscópico sin pensar en una posible interacción con algún tipo de red de telecomunicaciones, ya que su uso estaba destinado a otras áreas. Posteriormente su utilidad se extendió y comenzaron a desarrollarse simuladores de tráfico que pudieran acoplarse a los simuladores de red. A continuación se presentan algunos simuladores utilizados para redes VANET y su descripción se complementa en el anexo B.

- Texas Model.
- SUMO.
- SmartPath Traffic Simulator.
- FreeSim.
- STRAW.
- VanetMobiSim.
- STRAW.
- CityMob.
- MITSIMLab.
- VISSIM.
- Mobitools.
- Vergilius.
- Translite.
- Microsimulation of Road Traffic Flow Tool.

4.1.2.2. Simuladores de red

Estos simuladores permiten representar redes de telecomunicación, el enrutamiento que se da entre ellas, la calidad del servicio, eficiencia de la red, velocidad de transmisión [46] [45], etc. Algunos simuladores de red permiten la interacción con ciertos simuladores de tráfico con el fin de representar el movimiento de los nodos, entre ellos se encuentran.

- NS-2
- NS-3
- Omnet++.
- Opnet.
- QualNet.
- SWANS.
- GloMoSim.
- JIST-SWANS.
- GNetS.
- SNS.

4.1.2.3. Simuladores Integrados para VANET

Estos simuladores tienen internamente uno o más modelos de movilidad vehicular que cumplen las funciones de generación de trazas de movilidad los cuales funcionan internamente junto al simulador de red integrado, algunos ejemplos son:

- GrooveSim.
- NCTUns.
- NS-3.

4.1.2.4. Simuladores Híbridos VANET

Son simuladores para redes VANET conformados al unir de manera bidireccional simuladores de red y de tráfico; de esta forma se aprovecha su extensa funcionalidad en la simulación de redes vehiculares, permitiendo observar los efectos de la movilidad vehicular en la red de comunicación. Entre ellos se encuentran.

- TRANS (*Traffic and Network Simulation Environment*): Hace uso de SUMO (*Simulation of Urban Mobility*) y de NS-2 (*Network Simulator 2*).
- MobiReal: Adiciona modelos de movilidad al simulador de redes GNetS (*Georgia Tech Network Simulator*).
- VEINS (*Vehicles in Network Simulation*): Marco de simulación basado en Omnet++ (utiliza entornos de trabajo como INET y MiXiM para VANET [47]) y el generador de tráfico vehicular microscópico SUMO [45].

4.1.3. Elección del entorno de simulación

Para la elección del simulador se consideraron dos aspectos importantes para redes VANET, la movilidad y la interconexión de red. En la movilidad se tuvo en cuenta las

características de adaptación del *software* para el modelo de Krauss y en la interconexión de red se tuvo en cuenta la capacidad para la simulación de escenarios VANET con las tecnologías inalámbricas más utilizadas en despliegues reales. Entre las diferentes clases de simuladores VANET (aislados, integrados, híbridos), los simuladores híbridos cumplen fácilmente con los requerimientos funcionales para una simulación de redes vehiculares, ya que logran aprovechar al máximo las capacidades tanto del simulador de red como del simulador de tráfico.

En [48] se presenta una estadística que muestra una proporción de documentos científicos en donde se utilizan diferentes generadores de tráfico vehicular. En la figura 4.4 se puede observar la preferencia en el uso de SUMO, VanetMobiSim, VISSIM y otros simuladores utilizados para la generación de tráfico.

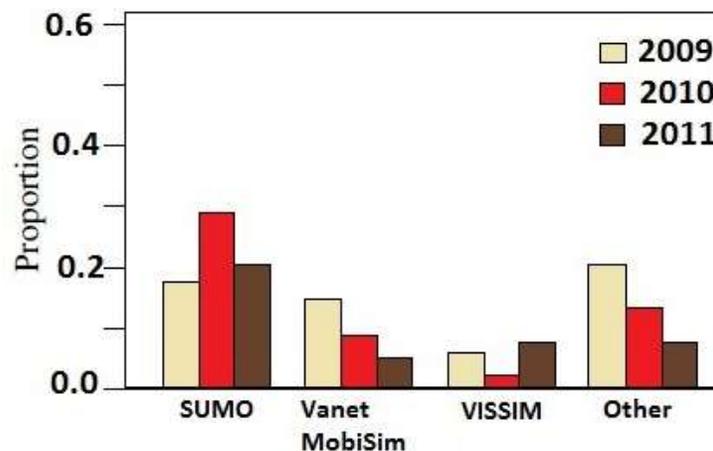


Figura 4.4. Comparación entre simuladores de tráfico. Adaptada de [48].

Entre los simuladores de tráfico vehicular que utilizan el modelo de movilidad de Krauss SUMO permite modelar escenarios con más detalle, es posible crear un escenario desde cero o importarlo desde sitios web públicos de generación de mapas como *OpenStreetMap* y puede integrarse con diversos simuladores de red, a diferencia por ejemplo de VanetMobiSim, que realiza su integración únicamente con NS-2 y Qualnet, con la desventaja de que NS-2 está siendo desplazado paulatinamente por su sucesor NS-3 y Qualnet es un simulador comercial. VISSIM se mantiene en vigencia a pesar de su carácter comercial y características reducidas frente a otros simuladores para VANET, pero con una tendencia de bajo uso, como se observa en la figura 4.4. [49].

SUMO es muy utilizado en diferentes estudios de movilidad vehicular [50] [48] [51], ya que es una herramienta versátil en la generación de escenarios reales, con una buena interfaz gráfica y mediana complejidad en su uso; complejidad que se ha visto reducida debido al desarrollo de herramientas como el generador de modelos de movilidad para redes vehiculares MOVE (*Mobility Model Generator for Vehicular Networks*) y el editor JAVA de mapas *.osm* JOSM (*Java OpenStreetMap Editor*) que hacen más fácil los procesos de generación de scripts y modificación de mapas respectivamente.

Por las razones expuestas se eligió a SUMO como el simulador de tráfico para implementar el modelo de movilidad de Krauss en la simulación de la red VANET propuesta.

En cuanto a los simuladores de red, siguiendo la preferencia hacia los simuladores híbridos y teniendo en cuenta los simuladores que trabajan con SUMO, los simuladores de red que se consideraron para utilizar en el entorno de simulación fueron TraNs y VEINS, el primero utiliza NS-2 como simulador de red y el segundo Omnet++.

Teniendo en cuenta la estadística en el uso de simuladores de red en la investigación en redes vehiculares presentada en la figura 4.5, se observa que NS-2 es el simulador más usado en la actualidad pero muestra un declive en los últimos años debido, entre otros factores, a la aparición de su sucesor NS-3 lo que detuvo su desarrollo en 2009. Por otra parte, Omnet++ es un simulador muy completo, permitiendo la simulación de redes inalámbricas y cableadas en diferentes ambientes con gran variedad de protocolos, también cuenta con gran aceptación debido a su modularidad y continuo desarrollo, que permite modelar cualquier entorno de red con una herramienta gráfica de desarrollo basada en eclipse, y en el caso concreto de las redes vehiculares, abarca todas las capas del modelo TCP/IP para su representación utilizando los proyectos MiXiM e INET [45].

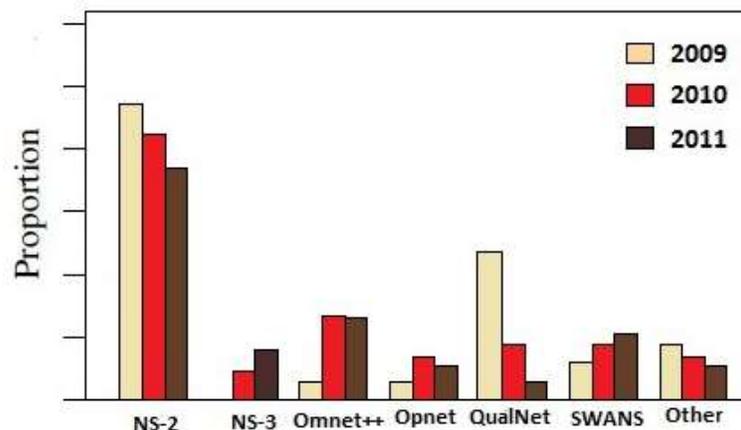


Figura 4.5. Comparación entre simuladores de red. Adaptada de [48].

Se eligió el simulador híbrido VEINS, ya que permite aprovechar todas las funcionalidades de SUMO y de Omnet++, la información sobre el software utilizado se encuentra de forma detallada en el anexo C. Por lo tanto, en la siguiente sección se presenta la implementación de los parámetros del modelo de movilidad de Krauss adaptado en el sector elegido.

4.2. IMPLEMENTACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO ADAPTADO

En el capítulo 3 se presentaron los pasos en la adaptación del modelo de movilidad de Krauss para el sector mencionado. La implementación de estos parámetros se presenta a continuación, mostrando el proceso en cada una de las herramientas *software* involucradas, y la descripción del funcionamiento de SUMO y Omnet++ en conjunto.

Para la representación del sector se descargó el mapa de Popayán, disponible en www.openstreetmap.org. El mapa descargado puede cambiar en cualquier momento, ya que es de libre edición, pero es de gran ayuda en la construcción del mapa para la zona de estudio de la red vehicular. El mapa en SUMO se encuentra listo para realizar cualquier simulación de tráfico vehicular, pero si se busca una aproximación significativa al entorno vehicular real, es necesario modificarlo; es decir, agregar intersecciones, corregir el sentido de las vías, la

velocidad permitida en ellas, semáforos con su lógica de funcionamiento, y en general todas las características viales propias del sector, los pasos para realizar este proceso se describen en el anexo C. En la figura 4.6 se observa el mapa del sector sin editar.

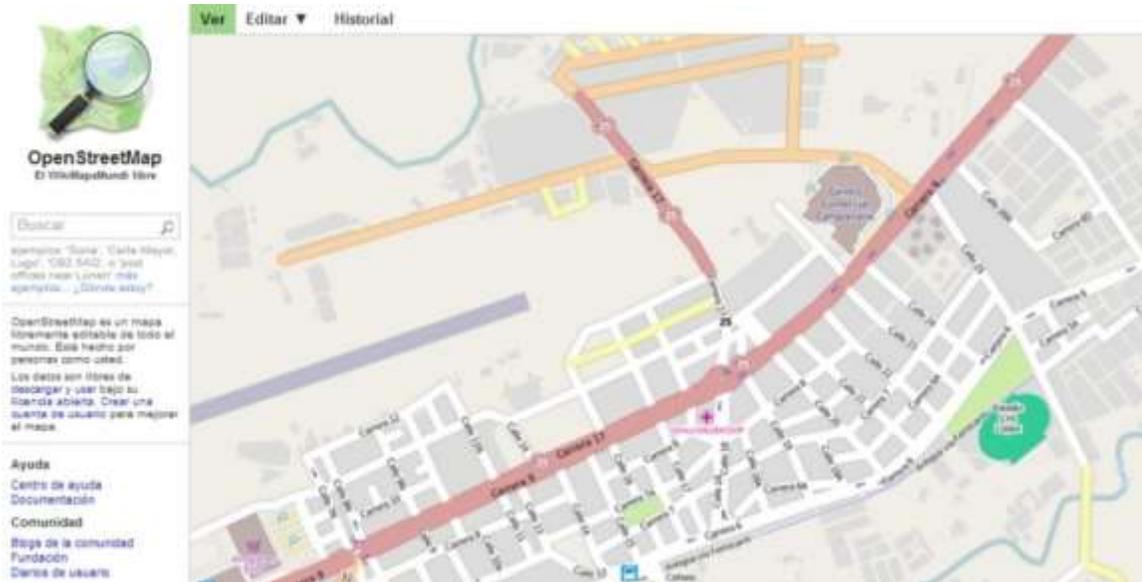


Figura 4.6. Mapa del sector, visto en *openstreetmap.org*.

En la figura 4.7 se muestra el resultado de la edición en la intersección de la Avenida Panamericana con la calle 25N en JOSM y en la figura 4.8 se observa el mapa de ese sector utilizado en SUMO para la simulación de tráfico vehicular.



Figura 4.7. Intersección Calle 25N - Avenida Panamericana posterior a la modificación. Por los autores.

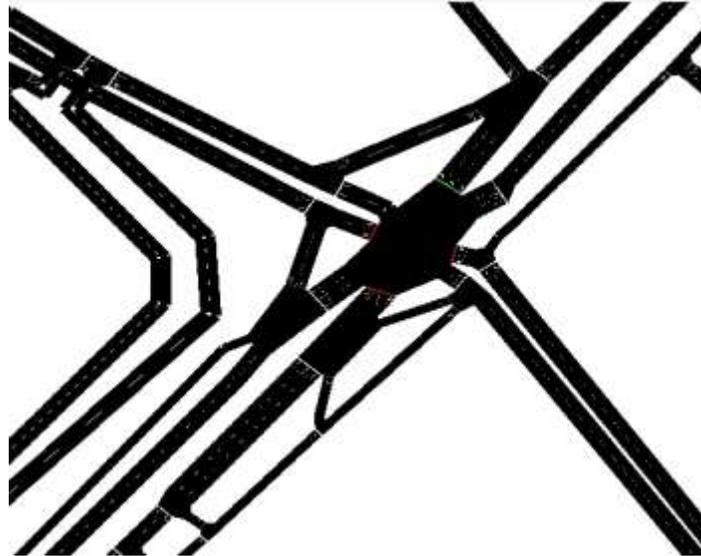


Figura 4.8. Intersección Calle 25N – Avenida Panamericana en SUMO. Por los autores.

Sobre el mapa de la figura 4.8 se implementó el flujo vehicular del sector, siguiendo los pasos descritos en el anexo C, con los diferentes tipos de vehículos, de acuerdo al estudio de tráfico y comportamiento de los conductores. En la figura 4.9 se observa el resultado de una simulación de tráfico con la implementación del tráfico vehicular sobre el mapa modificado.

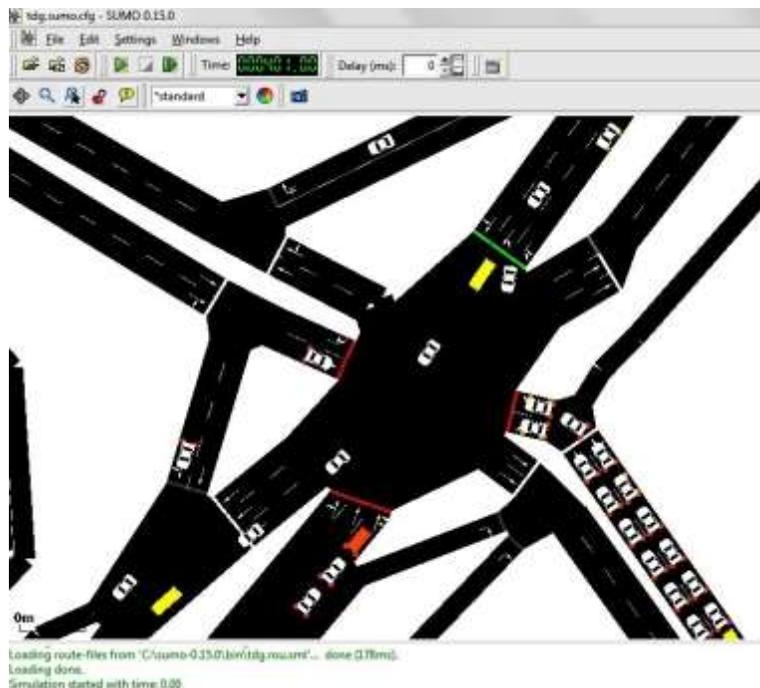


Figura 4.9. Simulación de tráfico en SUMO, Calle 25N – Avenida Panamericana. Por los autores.

4.3. SIMULACIÓN DE UNA RED VANET EN OMNET++

Se eligió el simulador híbrido VEINS, ya que permite aprovechar todas las funcionalidades e interacciones entre el simulador de red “Omnet++ “ y el simulador de tráfico “SUMO”, de tal forma que se lograra evidenciar los cambios de la movilidad vehicular sobre el proceso de transmisión de información a través de la red. El simulador híbrido escogido está compuesto por SUMO y Omnet++. SUMO utiliza varios modelos de movilidad, entre ellos el modelo de Krauss, que permiten simular el comportamiento real de los vehículos en un entorno de movilidad con características configurables dependiendo del sector de estudio; a su vez Omnet++ permite implementar la comunicación vehicular bajo el estándar 802.11p siguiendo un proceso de jerarquías funcionales en la adaptación de sus módulos de propósito general. A continuación se describe el funcionamiento de Omnet++ enfocado en la simulación de redes vehiculares, incluyendo su acople bidireccional con SUMO.

Omnet++ es un simulador de eventos discretos basado en C++ y utiliza para las simulaciones vehiculares diferentes entornos de trabajo, entre ellos, INET y MiXiM. Tanto MiXiM como INET son útiles en la simulación de redes inalámbricas, su diferencia radica en el hecho de que MiXiM trabaja principalmente en las capas física y de enlace, mientras que INET presenta un mayor desarrollo en las capas de red, transporte y aplicación.

Un módulo Omnet++ se compone de varios módulos que hacen parte de una jerarquía funcional y éstos se comunican entre sí mediante el paso de mensajes. Para el caso concreto de la simulación utilizada y el análisis de la capacidad de la red VANET, se utiliza la adaptación funcional de los módulos simples y compuestos desarrollados para la simulación de redes vehiculares en INET.

- **Elementos en la simulación del entorno de red vehicular**

Una vez definido el ambiente de movilidad vehicular con SUMO, se utilizan los archivos que definen la simulación de tráfico para implementar el entorno de movilidad vehicular en Omnet++.

La simulación de la red vehicular se realiza en Omnet++ a través de la interacción de módulos que representan la comunicación en la red a través de varias capas del modelo TCP, con el fin de describir el comportamiento de la comunicación vehicular presentada en el estándar IEEE 802.11p [49]. El modelo implementado está compuesto por los siguientes elementos.

- **Escenario:** Este módulo es el encargado de crear y fijar la topología básica. Simula el comportamiento del canal radio en las condiciones de movilidad de la red VANET, recibiendo información acerca de la posición y del movimiento de los nodos y determina cuando, de acuerdo a la distancia entre ellos, es posible la comunicación [46].
- **Nodos:** Los nodos de comunicación son definidos por módulos que controlan el comportamiento de los vehículos, a nivel de movilidad y también los aspectos de la comunicación vehicular.

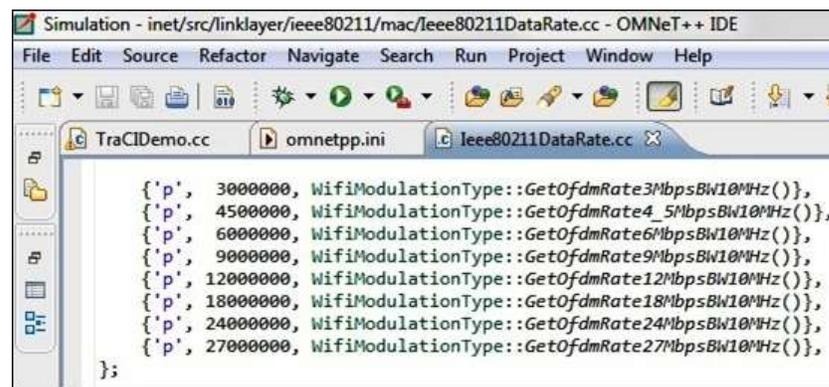
En el módulo, que determina el comportamiento de los vehículos, se realizó la definición de la tecnología que se utilizará en la simulación de la red VANET escogiendo la opción para el

estándar 802.11p a utilizar en la simulación de la red VANET y la activación del modo de acceso al canal distribuido mejorado (EDCA, *Enhanced distributed channel access*).

Entre la capa de red y la capa de transporte se incluyó un módulo encargado de la medición de la tasa de transferencia promedio para cada uno de los nodos, además entrega otros resultados como el número de paquetes enviados y recibidos por nodo.

En la capa de transporte se utilizó un módulo para simular la comunicación de acuerdo al protocolo UDP, el cual se conecta con la capa de aplicación quien se encarga de la simulación de la comunicación vehicular realizando las funciones de inicialización de los módulos, envío y recepción de mensajes, y manejo de las actualizaciones de posición del nodo.

Gracias a la colaboración del ingeniero Alfonso Ariza⁹ se adaptaron los módulos anteriores y se ajustó la configuración de la simulación de acuerdo al estándar 802.11p definido para INET en el archivo presentado en la figura 4.10.



```
Simulation - inet/src/linklayer/ieee80211/mac/Ieee80211DataRate.cc - OMNeT++ IDE
File Edit Source Refactor Navigate Search Run Project Window Help
TraCIDemo.cc omnetpp.ini Ieee80211DataRate.cc
{ 'p', 3000000, WifiModulationType::GetOfdmRate3MbpsBW10MHz() },
{ 'p', 4500000, WifiModulationType::GetOfdmRate4_5MbpsBW10MHz() },
{ 'p', 6000000, WifiModulationType::GetOfdmRate6MbpsBW10MHz() },
{ 'p', 9000000, WifiModulationType::GetOfdmRate9MbpsBW10MHz() },
{ 'p', 12000000, WifiModulationType::GetOfdmRate12MbpsBW10MHz() },
{ 'p', 18000000, WifiModulationType::GetOfdmRate18MbpsBW10MHz() },
{ 'p', 24000000, WifiModulationType::GetOfdmRate24MbpsBW10MHz() },
{ 'p', 27000000, WifiModulationType::GetOfdmRate27MbpsBW10MHz() },
};
```

Figura 4.10. Parámetros de configuración 802.11p en INET. Por los autores.

4.4. ESCENARIO DE SIMULACIÓN

El escenario creado para la simulación describe una red VANET compuesta por los vehículos involucrados en los dos horarios de congestión vehicular considerados (hora pico y hora valle), donde cada vehículo envía un mensaje *broadcast* de 320 bytes a todos los vehículos que estén en su área de cobertura en el momento de ingresar a la zona de estudio, estableciendo un tipo de comunicación V2V. El tamaño escogido para el paquete considerado está basado en el mensaje de seguridad básico (BSM, *Basic Safety Message*) establecido en el estándar J2735 de la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE, *Society of Automotive Engineers*), en donde se define el tamaño promedio para un mensaje de seguridad básico V2V distribuido de la siguiente manera [52].

- Información de nivel físico, MAC y WSM: 80 Bytes.
- Información de seguridad: 160 Bytes.
- Carga útil del mensaje BSM SAE-J2735: 80 Bytes.

⁹ Alfonso Ariza Quintana es Ingeniero de Telecomunicación por la Universidad Politécnica de Madrid, Doctor Ingeniero de Telecomunicación por la Universidad de Málaga (2001) y profesor titular de la Universidad de Málaga en el área de Tecnología Electrónica, creador de los módulos "Ieee80211Radio" e "Ieee80211Mac".

El intercambio de información de seguridad en una comunicación V2V requiere que cada vehículo envíe a través de un mensaje *broadcast* un pequeño conjunto de datos (posición, velocidad, tamaño del vehículo, distancia entre vehículos) que permitan construir aplicaciones de seguridad más detalladas en un formato estructurado bajo un estándar que permita ser interpretado en múltiples escenarios V2V, en vez de construir un nuevo tipo de mensaje para cada aplicación de seguridad. El estándar BSM fue considerado en un análisis de viabilidad para la implementación de comunicaciones V2V en la banda DSRC (siguiendo las recomendaciones del estándar 802.11p) en el que participaron importantes organizaciones y fabricantes de la industria automotriz [53].

Los parámetros del enlace en la transmisión del mensaje en la red VANET propuesta se presentan en la tabla 4.1.

Características del Enlace	
Frecuencia	5,890 GHz
Potencia de Transmisión	20mW (18 dBm)
Sensibilidad de receptores	-89 dBm
Umbral de Ruido Térmico	-110 dBm
Tasa de Bit	6 Mbps
Tipo de Comunicación Vehicular	V2V
Estándar	802.11p
Modelo de Propagación	Espacio Libre

Tabla 4.1. Características del enlace en la comunicación VANET propuesta. Por los autores.

La frecuencia utilizada se tomó de acuerdo al estándar 802.11p. La potencia de transmisión, la tasa de bit y la sensibilidad de los receptores se estableció siguiendo parámetros utilizados en implementaciones reales [54].

En la simulación propuesta en este trabajo de grado, debido a la dinámica de entrada y salida de vehículos al escenario, se presentan instantes de aumento en la densidad vehicular en los cuales la red VANET se conforma con un número máximo aproximado de 200 nodos en un momento determinado. En [55] se realizó una simulación para medir el desempeño de varios protocolos de enrutamiento en una red vehicular con comunicación V2V, emulando vehículos con dispositivos IEEE 802.11p durante un tiempo de 1000 segundos en escenarios con 11, 60, y 1218 nodos; por lo tanto, bajo las recomendaciones del estándar 802.11p con el número de vehículos considerados, es posible realizar las simulaciones en el sector escogido en la ciudad de Popayán. En la figura 4.11 se observa un instante de simulación en hora pico, evidenciando el número de vehículos en el entorno.

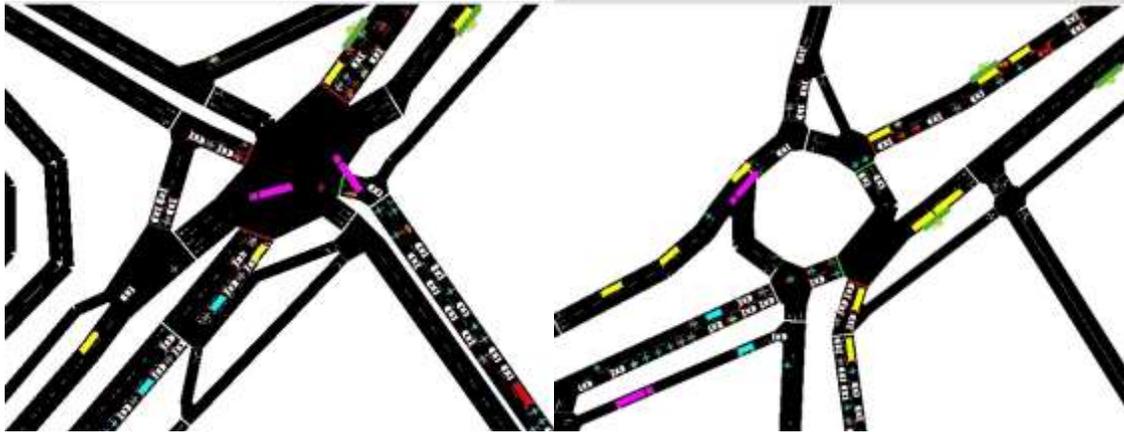


Figura 4.11. Vehículos en la red VANET (200 aproximadamente) en un instante de simulación. Por los autores.

4.4.1. Construcción de los escenarios de simulación

En la construcción de los escenarios se tuvo en cuenta la necesidad de analizar la capacidad en los horarios establecidos de alta y baja densidad de tráfico, con el fin de obtener el impacto del número de vehículos involucrados en la simulación. También se incluyó la adaptación del modelo de movilidad de Krauss para lograr una buena representación del entorno de movilidad vehicular del sector, al igual que el proceso de adecuación del mapa y sus características de tráfico vehicular (semáforos, intersecciones, número de carriles) presentado en la sección 4.2. De acuerdo a estos factores se construyó el esquema presentado en la figura 4.12.

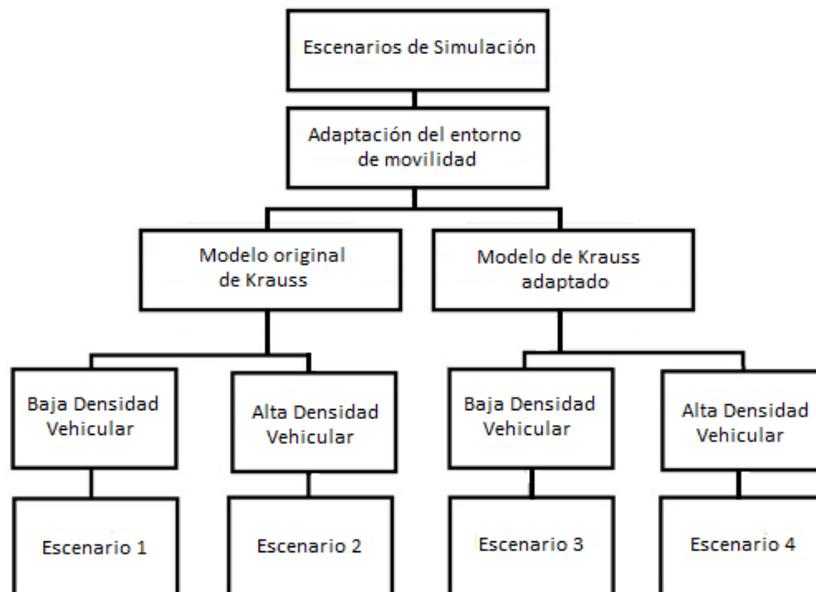


Figura 4.12. Escenarios de simulación propuestos. Por los autores.

4.4.2. Metodología de simulación

La metodología de simulación utilizada para realizar el proceso está basada en las recomendaciones de [42], donde se presentan diferentes aspectos a tener en cuenta cuando se deseen realizar simulaciones de tráfico microscópico, por lo tanto se adoptan los siguientes pasos.

- Se definen escenarios de simulación y su distribución de acuerdo a los objetivos del proyecto.
- Caracterizar los escenarios definidos, en cuanto a la delimitación de la zona geográfica.
- Ejecución de pruebas, el número de repeticiones necesarias, para cada uno de los escenarios creados.
- Análisis de los resultados arrojados por el simulador de red, de acuerdo al parámetro de desempeño escogido en el proyecto.

Para simular cada uno de los escenarios fue necesario establecer un número de repeticiones que permitiera obtener un nivel de confianza aceptable en el resultado final. En las simulaciones de tráfico microscópico deben realizarse múltiples repeticiones debido al carácter aleatorio de los elementos en los escenarios de simulación que son usados en el proceso de toma de decisiones del simulador a través de todo el proceso [42], dentro de esos elementos es necesario tener en cuenta:

- El momento de entrada de los vehículos en la simulación.
- El comportamiento de los conductores.
- El tipo de vehículo que ingresa a la simulación.
- La ruta que escoge el vehículo para llegar a su destino.

En algunas simulaciones de tráfico microscópico estas características son determinadas de forma aleatoria; en los escenarios de simulación propuestos estos aspectos son determinados de la siguiente forma:

- El tiempo de ingreso de los vehículos a la simulación está determinado desde un principio en la creación del archivo de configuración de rutas.
- El comportamiento de los conductores se define en este mismo archivo de acuerdo al estudio de comportamiento de los conductores.
- Cuando el vehículo ingresa a la simulación tiene definidas todas sus características.
- En las trayectorias se tuvo en cuenta un origen y destino predeterminados, establecidos en el proceso de observación, donde se reconocieron los puntos de atracción y los hábitos sociales.

Los elementos considerados anteriormente son establecidos en la configuración inicial de la simulación, pero la decisión que toma SUMO basada en el modelo de movilidad de Krauss tiene un componente aleatorio cuando se establece la velocidad en cada paso de tiempo en el componente η . En Omnet++ se asigna un número aleatorio para cada una de las repeticiones, por lo tanto para definir el número de repeticiones se adopta el siguiente proceso establecido en [42].

4.4.2.1. Estimación de la desviación estándar

Para calcular la desviación estándar la ejecución de 4 repeticiones de cada uno de los escenarios es suficiente, en caso de no conocer su valor con base en simulaciones anteriores [42]. Por lo tanto, el valor de la desviación estándar se obtuvo con la ecuación 4.1 [42].

$$S^2 = \frac{\sum(x-\bar{x})^2}{N-1} \quad (4.1)$$

Donde:

S: Desviación estándar.

x: Variable analizada.

\bar{x} : Promedio de la variable en las 4 ejecuciones.

N: Número de ejecuciones.

4.4.2.2. Selección del intervalo de confianza deseado y el número de repeticiones

Es el rango de valores dentro del cual se encuentra el valor verdadero de la media; la longitud del intervalo se determina de acuerdo al criterio del analista teniendo en cuenta los propósitos del estudio [42]. En la tabla 4.2 se establece una relación entre el intervalo de confianza deseado y la desviación estándar para determinar el número de repeticiones requeridas.

CI/S	Nivel de Confianza deseado	Número mínimo de repeticiones
1,5	99%	18
1,5	95%	12
1,5	90%	9
2,0	99%	12
2,0	95%	8
2,0	90%	6

Tabla 4.2. Número mínimo de repeticiones para obtener el intervalo de confianza deseado. Adaptada de [42].

Se calculó la desviación estándar para cada uno de los escenarios, teniendo en cuenta las primeras cuatro repeticiones, con la ecuación 4.1. La diferencia entre el mayor y menor valor de los resultados obtenidos se consideró como el intervalo de confianza deseado, y teniendo en cuenta la desviación estándar en cada uno de los escenarios, se

obtuvo un valor de CI/S¹⁰. Por lo tanto, de acuerdo a la tabla 4.2, se determinó el número de repeticiones necesarias para cada escenario buscando un nivel de confianza del 90%. Los cálculos descritos para obtener el número de repeticiones necesarias se presentan en la tabla 4.3. En esta tabla se encuentran todos los datos utilizados para determinar el número de repeticiones necesarias, teniendo la tasa de transferencia promedio en la red, la cual se obtiene entre cuatro repeticiones de cada escenario. Con el valor de estos promedios se calculó la desviación estándar para definir un intervalo de confianza deseado y así calcular el número de repeticiones a realizar en el proceso de simulación en cada escenario.

Escenarios de Simulación	Tasa de Transferencia promedio en la red (bps)	Desviación Estándar	CI	CI/S	Número de Repeticiones
Escenario 1	3636,57	136,93	289,03	2,11	6
Escenario 2	4087,36	358,24	806,2	2,25	6
Escenario 3	4015,39	233,1	510,8	2,19	6
Escenario 4	4880,81	310,24	671,78	2,16	6

Tabla 4.3. Número de repeticiones necesarias para obtener un nivel de confianza del 90%. Por los autores.

4.5. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN EN LOS ESCENARIOS

Al realizar el proceso de simulación, con las repeticiones necesarias en cada uno de los escenarios, se obtuvieron los resultados para la tasa de transferencia promedio y se organizaron para su presentación en tablas de datos. Esta tasa de transferencia promedio fue determinada para cada uno de los nodos de acuerdo al número de paquetes recibidos durante el tiempo de su permanencia en el escenario; después de este proceso se realizó un promedio de los resultados para el total de nodos durante los 10 minutos de simulación, y finalmente se promediaron los 6 resultados obtenidos en cada una de las repeticiones. También se incluye la tasa de transferencia promedio acumulada, obtenida al sumar todos los datos promediados de la tasa de transferencia para los nodos de la simulación.

Anteriormente en el capítulo 2 en la sección 2.2. “Modelo de movilidad de Krauss” y en el capítulo 3 en la sección 3.1 “Adaptación del Modelo de movilidad de Krauss” se determinó que las variables relevantes en el proceso de adaptación del modelo de movilidad para el sector en estudio son: la velocidad de los vehículos, aceleración, desaceleración y su longitud. A continuación se describe la influencia de estos aspectos en la tasa de transferencia promedio.

- El límite máximo de velocidad, la aceleración y la capacidad de frenado, intervienen en la definición del valor de la velocidad de los nodos en cada instante de tiempo durante la simulación. El impacto de la velocidad en la pérdida de paquetes en la transmisión de datos al utilizar el modelo de movilidad de Krauss se analizó en comparación con otros modelos de movilidad para redes VANET en [30], estableciendo una relación directa entre la pérdida de paquetes y el aumento de la velocidad vehicular en simulaciones donde se utilice este modelo, por lo tanto este aspecto (velocidad) se consideró como fundamental en el análisis de capacidad propuesto.

¹⁰ Intervalo de confianza deseado, *desired confidence interval*. [44]

- La longitud de los vehículos se tuvo en cuenta en la adaptación del modelo de movilidad, ya que es fundamental a la hora de definir la densidad vehicular. Por lo tanto esta longitud influye en el número de nodos que se encuentren transmitiendo en un área específica, de esta forma se genera un impacto en el análisis de capacidad de la red VANET en el sector teniendo en cuenta los diferentes tipos de vehículos y sus diferentes longitudes.

La longitud es definida en el modelo movilidad de Krauss en la ecuación 2.7, donde g es siempre positivo.

$$g = x_l - x_f - l$$

La longitud del vehículo es determinante en la definición de la distancia de separación entre dos vehículos, siendo así una variable que influye en la cantidad de nodos que ocupan una zona en el sector.

Para mostrar el efecto de la longitud de los vehículos como variable determinante en la adaptación del modelo de movilidad de Krauss, se realizó una simulación con dos tipos de vehículos, cada uno con las mismas características de movilidad (aceleración, desaceleración, tiempos de reacción, etc.), variando la longitud de los vehículos y manteniendo las longitudes de los vehículos tipo “automóvil” (4.27 m) y tipo “tractomula” (18.5 m).

Después de seleccionar los vehículos se realizaron dos simulaciones, cada una en la misma vía del sector, durante un minuto. Se introducen en la simulación 60 vehículos, siendo el cambio de tipo de vehículo la única diferencia entre las dos simulaciones, con el fin de estudiar el impacto que tiene la longitud de los vehículos en el análisis de capacidad propuesto en el proyecto.

Se realizó una comparación entre los vehículos tipo “automóvil” (color blanco) y los vehículos tipo “tractomula” (color amarillo). En la figura 4.13 se puede observar que la proporción de vehículos tipo “automóvil” es superior a la de los vehículos tipo “tractomula”; de este modo en el mismo espacio se encuentran una mayor cantidad de nodos de un tipo de vehículo. Para el análisis de capacidad propuesto esto es un aspecto importante, ya que la variación en la longitud de los vehículos genera mayor densidad en una zona dependiendo del tipo de vehículo que se encuentre en el sector.



Figura 4.13. Comparación de longitud entre vehículos. Por los autores.

En las figuras 4.14 y 4.15 se observan las tasas de transferencia promedio resultantes de las simulaciones mencionadas, en éstas se puede evidenciar que la longitud de los vehículos afecta diferentes aspectos como son: el número de vehículos que ingresa a la simulación y la tasa de transferencia promedio.

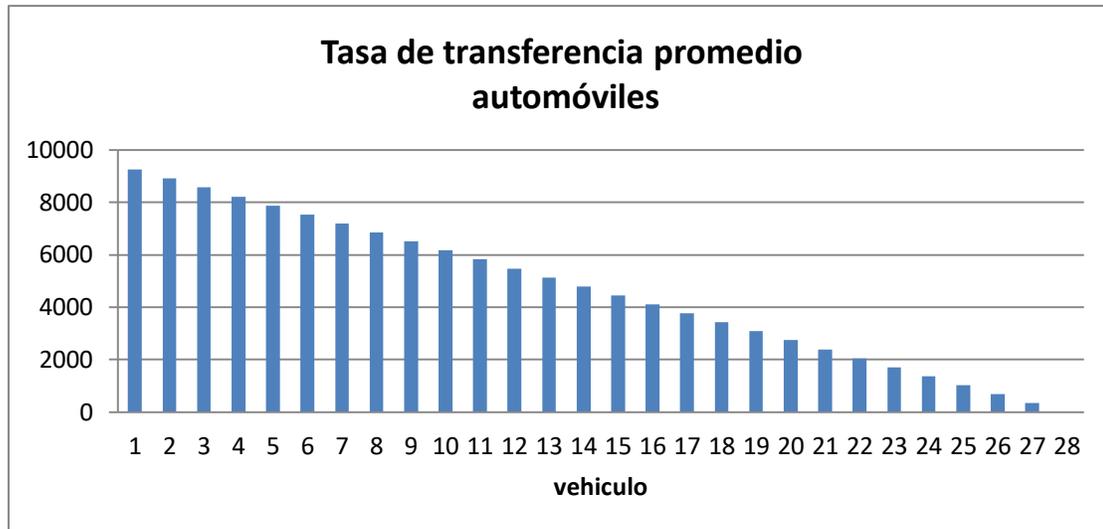


Figura 4.14. Vehículos tipo “automóvil” en el escenario de prueba. Por los autores.

En la simulación de los vehículos tipo “automóvil” se puede observar que el nivel máximo de tasa de transferencia alcanzado está alrededor de los 9.000 bit/s, y que la cantidad de vehículos que entraron a la simulación en el minuto transcurrido es de 28 vehículos.

Para los resultados arrojados por la simulación con los vehículos tipo “tractomula”, se observa que el número de vehículos que ingresaron en la simulación fue mucho menor que en el escenario de prueba para los vehículos tipo “automóvil”, a pesar que los dos vehículos contaban con las mismas características de conducción, tipo de trayectoria y tiempo de duración de simulación. El hecho de que ingresen menos nodos en la simulación tiene un impacto notable cuando se realiza la medición de la tasa de transferencia, comparando estos dos tipos de vehículos. La tasa de transferencia máxima registrada en el escenario con vehículos tipo “tractomula” alcanzó un valor aproximado de 5.000 bit/s, siendo inferior a la tasa de transferencia máxima alcanzada en el escenario de simulación con los vehículos tipo “automóvil”.

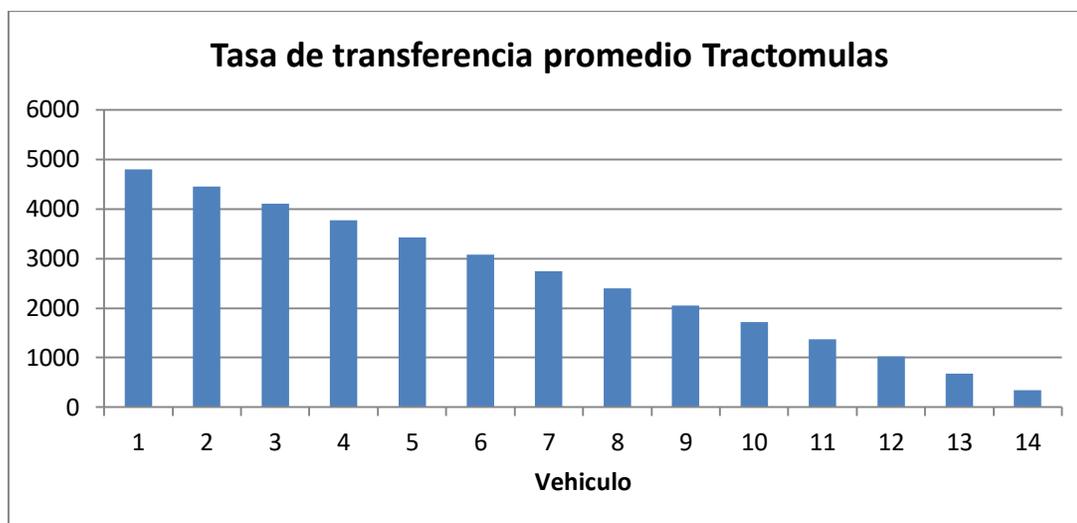


Figura 4.15. Vehículos tipo “tractomula” en el escenario de prueba. Por los autores.

En la tabla 4.4 se aprecia la tasa de transferencia promedio y la tasa de transferencia acumulada para los dos escenarios de simulación y se observa el impacto que tiene la variación de la longitud de los vehículos en los resultados, donde se puede apreciar que la tasa de transferencia promedio del escenario con automóviles es superior al resultado obtenido por el escenario de simulación con “tractomulas”. De esta forma se muestra que la variación de la longitud de los vehículos es determinante a la hora de realizar una adaptación del modelo de movilidad de Krauss para un sector, influyendo en cualquier tipo de estudio posterior basado en este resultado, en este caso un análisis de capacidad.

Tipo de Vehículo	Número de Nodos	Tasa de Transferencia promedio (bps)	Tasa de Transferencia Acumulada (Kbps)
Automóvil	28	4622.4	129,43
Tractomula	14	2568	35,95

Tabla 4.4. Comparación tasa de transferencia escenarios de prueba: automóvil – tractomula. Por los autores.

4.5.1. Escenario 1

En este escenario se representó el entorno vehicular en hora valle y sin ningún tipo de adaptación del modelo de movilidad de Krauss. El mapa del sector contiene las adaptaciones de las vías y el funcionamiento de los semáforos en el sector, pero los vehículos tienen los valores por defecto del modelo. La tabla 4.5 presenta los resultados de las 6 repeticiones realizadas para el escenario 1.

Simulación No.	Número de Nodos	Tasa de Transferencia promedio (bps)	Tasa de Transferencia Promedio Acumulada (Mbps)
0	732	3723,36	2,73
1	732	3718,28	2,73
2	743	3434,33	2,56
3	748	3670,33	2,75
4	726	3744,73	2,74
5	739	3684,14	2,72
Promedio Final Escenario 1		3667,53	2,71
Desviación estándar		119,88	0,07

Tabla 4.5. Tasa de transferencia promedio alcanzada en el sistema para el escenario 1. Por los autores.

En la figura 4.16 se presenta la tasa de transferencia para los nodos del escenario 1, en una de las repeticiones realizadas, durante los 10 minutos de tráfico vehicular representados en la simulación, en donde se puede observar que la tasa de transferencia promedio es mayor cuando en el escenario hay una menor densidad vehicular, por el contrario, al final del tiempo de simulación la tasa de transferencia promedio es menor, debido al posible efecto de las colisiones al aumentar la densidad vehicular.

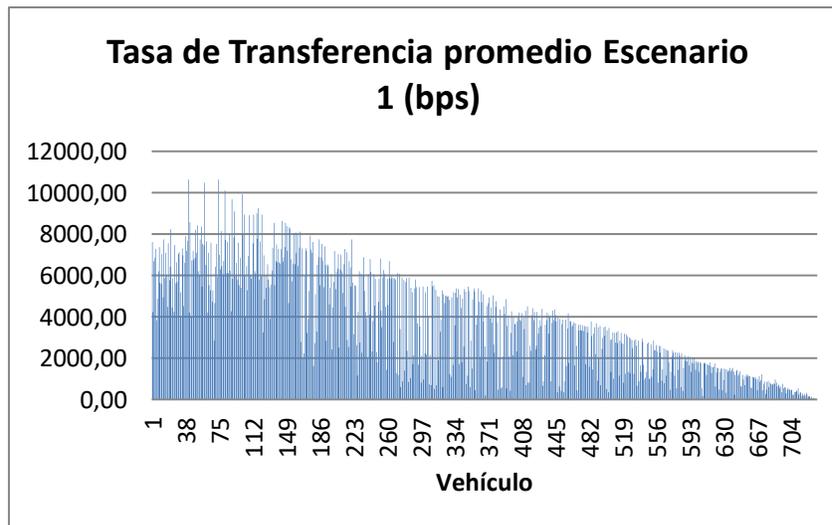


Figura 4.16. Tasa de Transferencia promedio alcanzada en el sistema para los vehículos del escenario 1. Por los autores.

En el estándar 802.11p el método de acceso al medio utilizado es el sistema de detección de portadora con prevención de colisiones (CSMA/CA, *Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance*) [56]; en el cual si el nodo receptor recibe el paquete procede a enviar un mensaje de confirmación (ACK, *Acknowledgement*) una vez termina el proceso de recepción, si el nodo transmisor no recibe este ACK asume que ocurrió una colisión, debido a que otro nodo realizó una transmisión al mismo tiempo sobre el canal, y el paquete es transmitido nuevamente después de esperar un intervalo de tiempo aleatorio [20].

En la figura 4.17 se observa la tasa de transferencia acumulada en el sistema para cada una de las repeticiones, la cual representa el flujo de información en toda la red durante el tiempo de simulación de acuerdo a la configuración establecida.

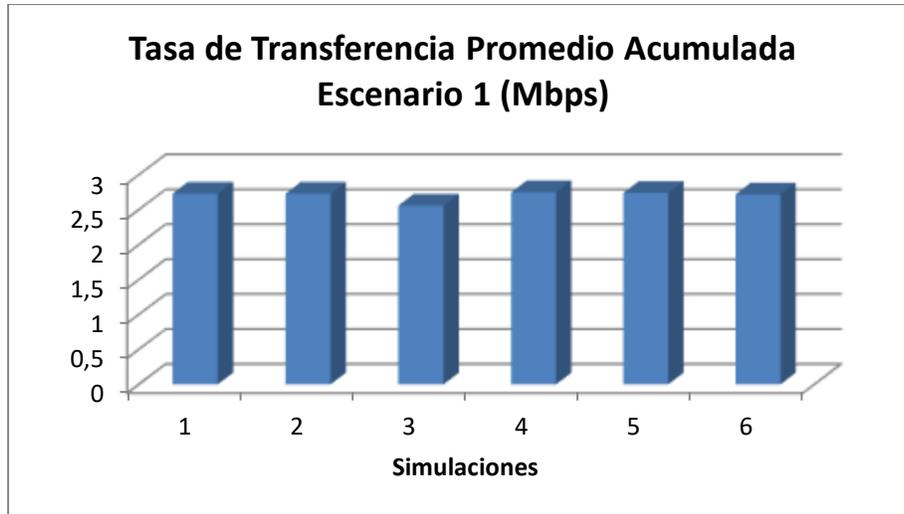


Figura 4.17. Tasa de Transferencia acumulada en el escenario 1 para todas las repeticiones realizadas. Por los autores.

4.5.2. Escenario 2

Para la simulación de este escenario se consideraron todos los vehículos registrados durante la medición en la hora pico, y al igual que en el escenario anterior, no se realizó modificación a los parámetros de configuración por defecto del modelo original de Krauss. En la tabla 4.6 se presentan los resultados obtenidos en las repeticiones realizadas para el escenario 2.

Simulación No.	Número de Nodos	Tasa de Transferencia promedio (bps)	Tasa de Transferencia Promedio Acumulada (Mbps)
0	846	4220,17	3,57
1	825	3887,08	3,21
2	822	3717,99	3,06
3	840	4524,19	3,80
4	842	3651,54	3,07
5	839	3597,62	3,02
Promedio Final Escenario 2		4087,36	3,29
Desviación estándar		366,59	0,32

Tabla 4.6. Tasa de Transferencia promedio alcanzada en el sistema para el escenario 2. Por los autores.

Se observa en los resultados de la tabla 4.6 la relación entre el aumento de vehículos en la hora pico con el incremento de la tasa de transferencia promedio alcanzada en el sistema.

En la figura 4.18 se presenta la tasa de transferencia promedio para los vehículos del escenario 2, en una de las repeticiones, en donde se evidencia nuevamente el efecto de las colisiones.

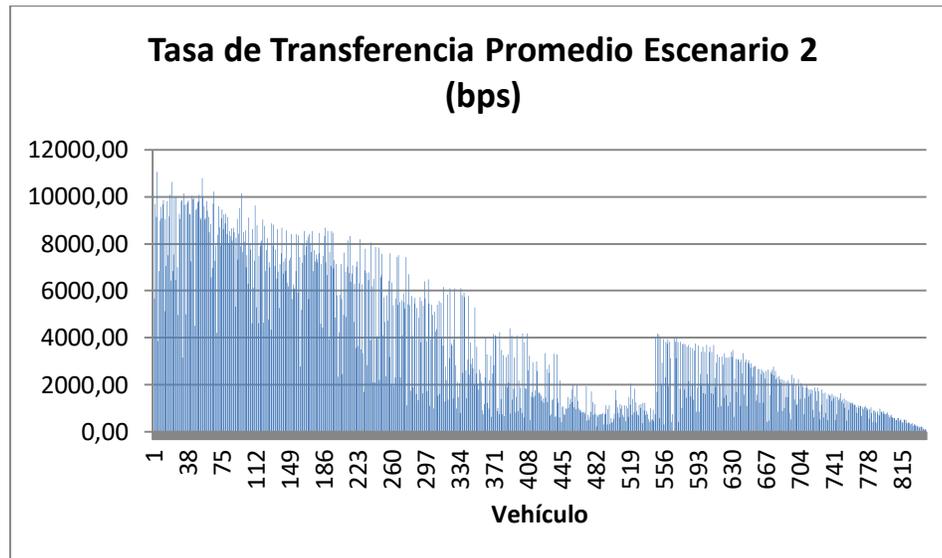


Figura 4.18. Tasa de transferencia para los vehículos del escenario 2. Por los autores.

En la figura 4.18 se observa un intervalo de tiempo donde la tasa de transferencia promedio decrece hasta el momento en que intervienen los nodos alrededor del número 520 en la simulación, posteriormente se registró un aumento para continuar disminuyendo hasta el final de la simulación. En instantes de alta densidad vehicular los nodos pueden estar detenidos en una misma zona, provocando una alta ocupación del canal [30], y cuando los vehículos empiezan a abandonar la zona de congestión se experimenta una recuperación en el nivel de la tasa de transferencia.

La tasa de transferencia acumulada para cada una de las repeticiones del escenario 2 se presenta en la figura 4.19, mostrando un valor más alto respecto de las repeticiones del escenario 1.

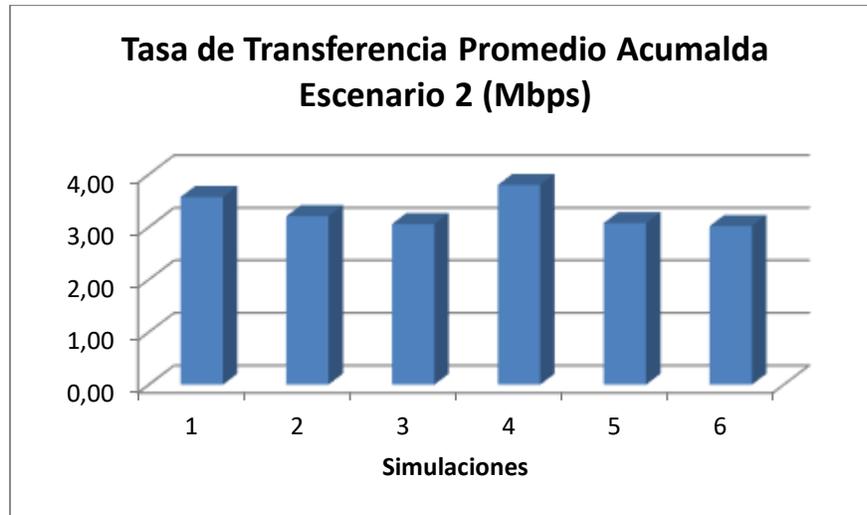


Figura 4.19. Tasa de Transferencia acumulada en el escenario 2 para cada una de las repeticiones. Por los autores.

4.5.3. Escenario 3

En este escenario se simuló el tráfico vehicular en la hora valle, pero se representó la interacción vehicular con la adaptación del modelo de movilidad de Krauss teniendo en cuenta todos los aspectos considerados en el capítulo 4. En la tabla 4.7 se presentan los resultados obtenidos para el escenario 3.

Simulación No.	Número de Nodos	Tasa de Transferencia promedio (bps)	Tasa de Transferencia Promedio Acumalda (Mbps)
0	765	3731,85	2,85
1	751	3922,33	2,95
2	736	4164,73	3,07
3	659	3670,33	2,75
4	765	3995,69	3,06
5	661	4707,49	3,11
Promedio Final Escenario 3		4032,07	2,96
Desviación estándar		376,34	0,14

Tabla 4.7. Tasa de transferencia promedio para el escenario 3. Por los autores.

En la tabla 4.7 se registró un incremento en el valor de la tasa de transferencia promedio respecto del valor obtenido para el escenario 1, el cual representa el tráfico vehicular en la hora valle pero sin realizar la adaptación del modelo de movilidad. En la figura 4.20 se observan estos valores para cada uno de los vehículos en el transcurso de una simulación para el escenario 3.

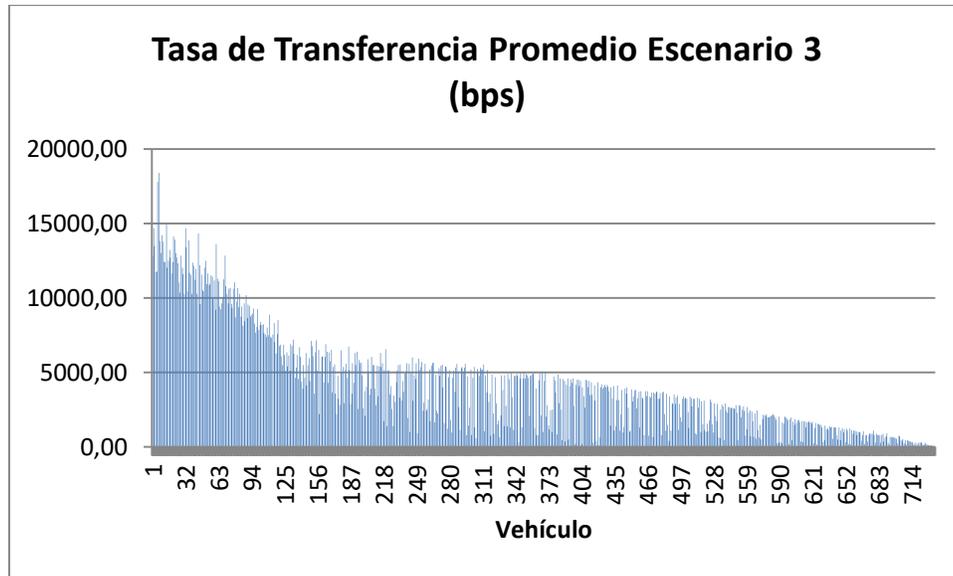


Figura 4.20. Tasa de Transferencia promedio obtenida para todos los vehículos del escenario 3. Por los autores.

En la figura 4.20 se observa una gráfica con un comportamiento más homogéneo entre los nodos 156 y 373, en contraste con las gráficas de los escenarios 1 y 2, en donde se presentó un comportamiento irregular, el valor de la tasa de transferencia promedio en este escenario también desciende a medida que ingresan mayor número de nodos en el sector, pero este comportamiento se hace en una forma más suave.

La tasa de transferencia acumulada para todo el sistema en la simulación del escenario 3 se presenta en la figura 4.21, donde se observa un incremento en su valor respecto del escenario 1, a pesar de representar la misma densidad vehicular de la hora valle.

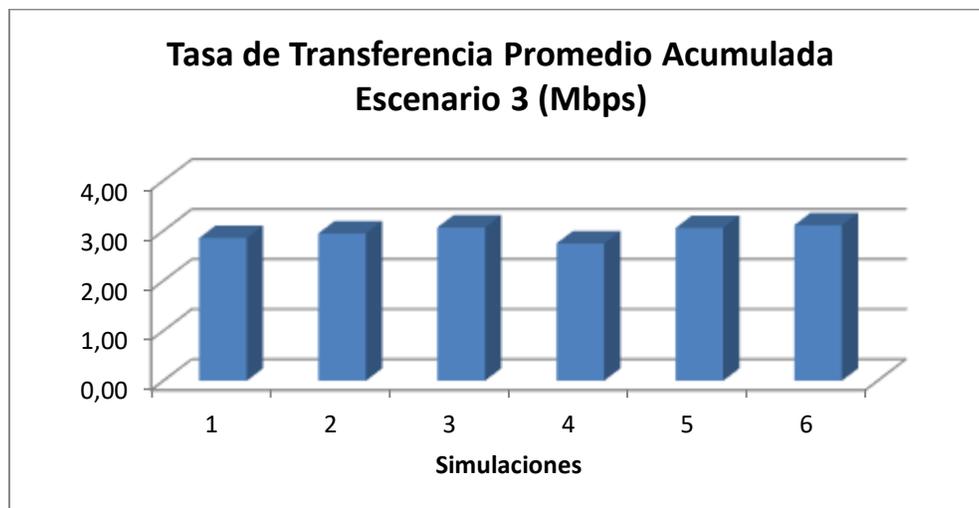


Figura 4.21. Tasa de Transferencia promedio acumulada en el escenario 3 para todas las repeticiones. Por los autores.

4.5.4. Escenario 4

En este escenario se simuló el tráfico vehicular registrado en la hora pico, representando la interacción entre los vehículos con la adaptación del modelo de movilidad de Krauss, sobre el mismo mapa de los escenarios anteriores. En la tabla 4.8 se presentan los resultados obtenidos para el escenario 4 para la tasa de transferencia promedio alcanzada en el sistema, donde se observa que en este escenario se obtuvieron los valores más altos.

Simulación No.	Número de Nodos	Tasa de Transferencia promedio (bps)	Tasa de Transferencia Promedio Acumulada (Mbps)
0	1073	5284,48	5,67
1	1108	4612,70	5,11
2	1071	4962,55	5,31
3	1078	4663,50	5,03
4	1077	5167,50	5,57
5	1083	5295,06	5,73
Promedio Final Escenario 4		4997,63	5,4
Desviación estándar		303,53	0,3

Tabla 4.8. Tasa de transferencia promedio alcanzada en el sistema para el escenario 4. Por los autores.

En las figuras 4.22 y 4.23 se presentan la tasa de transferencia promedio para todos los vehículos del escenario 4 en una repetición, y la tasa de transferencia acumulada para todo el sistema en cada una de las repeticiones respectivamente.

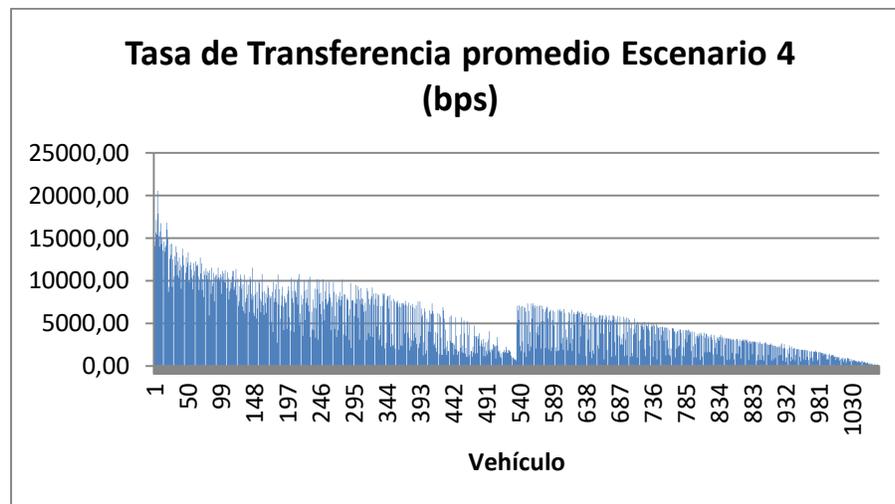


Figura 4.22. Tasa de transferencia promedio obtenida para todos los vehículos del escenario 4. Por los autores.

Además en la figura 4.22 se observa que cuando interviene el nodo 520 aproximadamente, se presenta un instante de alta congestión vehicular, ocasionando un alto uso del canal y un decremento notable de la tasa de transferencia, consiguiente a ese suceso se genera una descongestión, disminuyendo la densidad vehicular en el sector generando un nuevo incremento en la tasa de transferencia, que posteriormente tiene un decremento progresivo correspondiente al ingreso de nuevos nodos en el sector. También se observa el control de la interacción vehicular en el comportamiento regular y poco variable de la gráfica, producto del efecto de la adaptación. En la tasa de transferencia promedio acumulada de la figura 4.23 se muestran los valores para cada repetición del escenario 4, los cuales superan a los obtenidos en los otros escenarios, ya que en este escenario intervienen un mayor número de vehículos.

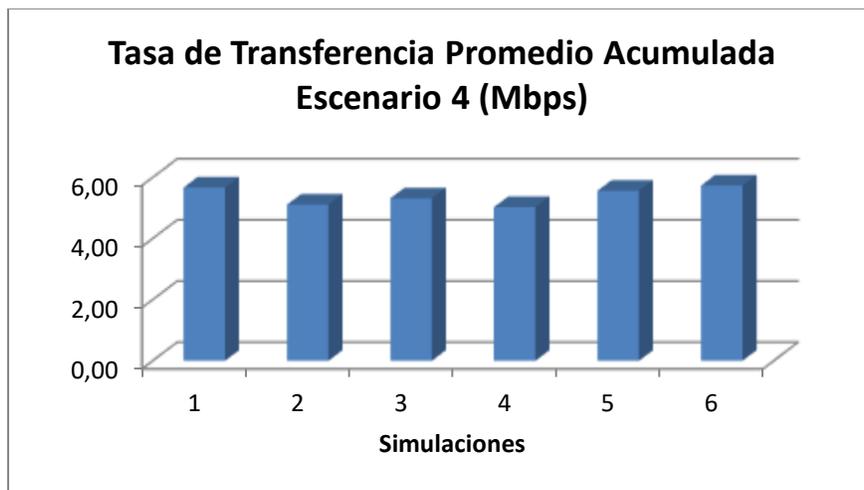


Figura 4.23. Tasa de Transferencia promedio acumulada en el escenario 4 para todas las repeticiones. Por los autores.

4.6. ANÁLISIS DE CAPACIDAD-IMPACTO DE LA ADAPTACIÓN DEL MODELO DE MOVILIDAD

De acuerdo a los resultados obtenidos se presenta el análisis basado en los objetivos propuestos para este proyecto. Se analizó la tasa de transferencia promedio alcanzada en el sistema en los escenarios donde se realizó la adaptación del modelo de movilidad de Krauss para la simulación de la red vehicular en la Avenida Panamericana entre calles 18N y 27N, comparándola con la tasa de transferencia promedio obtenida en los escenarios donde no se realizó la adaptación y se trabajó con los valores por defecto del modelo de movilidad original.

Para considerar el impacto del modelo de movilidad se analizaron los resultados obtenidos para todos los escenarios, comparando aquellos en los que se realizó el proceso de adaptación del modelo de movilidad de Krauss con los escenarios donde no se hizo.

- **Escenario 1 – Escenario 3**

En estos escenarios se presenta el tráfico vehicular en el sector durante la hora valle. En ambos casos el número de vehículos introducidos en el simulador es el mismo, pero

como lo muestra la tabla 4.9, el número de vehículos resultantes en la simulación cambió de un escenario a otro. Esta variación se debe a que, de acuerdo a la interacción dada bajo las condiciones de movilidad del modelo y sus parámetros, los vehículos permanecen en el escenario durante diferentes intervalos de tiempo.

Escenario	Número de vehículos proyectado	Número de vehículos en la simulación (promedio)
1	775	737
3	775	723

Tabla 4.9. Número de vehículos en los escenarios propuestos. Por los autores.

Para los escenarios 1 y 3 se observa que hay una pequeña diferencia en el número de vehículos, por lo tanto el proceso de adaptación no afectó de manera significativa la cantidad de vehículos involucrados en la simulación. En la figura 4.24 se presenta la cantidad de vehículos obtenida en las repeticiones realizadas para los escenarios de simulación 1 y 3.

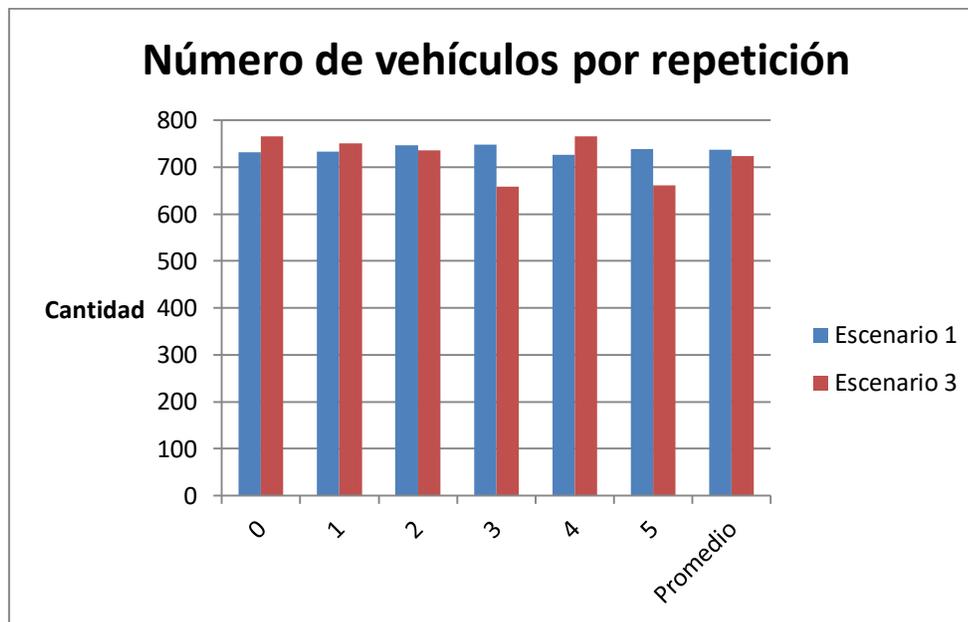


Figura 4.24. Número de vehículos obtenidos en cada repetición para los escenarios de simulación 1 y 3. Por los autores.

En cuanto a la tasa de transferencia promedio alcanzada en el sistema, se observa en la tabla 4.10 que en el escenario adaptado el resultado fue mayor que en el escenario sin adaptación. Este aumento no está relacionado directamente con el mayor número de vehículos en la simulación, ya que en este caso al adaptar el escenario el número de vehículos fue un poco menor.

Escenario	Tasa de transferencia promedio (bps)	Tasa de Transferencia Promedio Acumulada (Mbps)
1	3667,53	2,71
3	4128,36	2,97

Tabla 4.10. Tasa de transferencia alcanzada en el sistema para los escenarios 1 y 3. Por los autores.

Las características reales del entorno de movilidad vehicular obtenidas con la adaptación del modelo en el escenario para la hora valle mostraron una interacción entre los vehículos menos caótica respecto de la que se aprecia en el escenario donde no se realizó ningún tipo de adaptación. Entre las posibles razones que se consideraron para el incremento en la tasa de transferencia promedio se encuentra el número de colisiones en la comunicación de datos, presentada en la tabla 4.11 para los escenarios 1 y 3.

Colisiones para cada repetición		
Escenario	Repetición	Colisiones
1	0	13202
	1	26023
	2	26154
	3	25888
	4	23033
	5	25603
3	0	27626
	1	24787
	2	25407
	3	17430
	4	22030
	5	17114

Tabla 4.11. Colisiones para los escenarios 1 y 3. Por los autores.

En el escenario 1 la mayor cantidad de colisiones se presentó en la repetición 2 con 26154 y para el escenario 3 se registró un mayor número de colisiones en la repetición 0 con 27626 colisiones. Estos dos resultados coinciden con el alto número de vehículos involucrados en estas repeticiones, de acuerdo a lo mostrado en la figura 4.20. Se evidencia la relación directa entre la cantidad de vehículos y el número de colisiones en los escenarios 1 y 3.

De acuerdo al análisis anterior se tiene un escenario de adaptación con una mayor tasa de transferencia promedio en el sistema, sin que el número de vehículos obtenidos afecte este incremento. Por lo tanto, se procede a analizar el comportamiento de la velocidad en

los escenarios involucrados, ya que según el análisis realizado en [30], para el modelo de movilidad de Krauss la pérdida de paquetes se incrementa cuando los vehículos se acercan a la velocidad máxima permitida en el escenario.

En el escenario 1 la máxima velocidad alcanzada es de 100 km/h y en el escenario 3, producto de las restricciones de velocidad propias de la adaptación, se registró una velocidad máxima de 75 km/h, tal como se aprecia en la tabla 4.12, donde se observa que el porcentaje de vehículos que supera los 70 Km/h es muy cercano en los dos escenarios comparados, pero en el porcentaje de estos vehículos en el escenario 1 hacen parte muchos nodos con velocidades cercanas a los 100 Km/h, lo cual influye en la tasa de transferencia promedio alcanzada en el sistema.

Escenario	Repetición	Velocidad Máxima alcanzada (Km/h)	Vehículos a más de 70 Km/h	Número de vehículos	porcentaje %
1	0	100	321	732	43,85
	1	100	482	733	65,76
	2	100	491	746	65,82
	3	100	495	748	66,18
	4	100	477	726	65,7
	5	100	490	739	66,31
3	0	75	542	765	70,85
	1	75	516	751	68,71
	2	75	493	736	66,98
	3	75	430	659	65,25
	4	75	557	765	72,81
	5	75	406	661	61,42

Tabla 4.12. Velocidades en los escenarios 1 y 3. Por los autores.

- **Escenario 2 – Escenario 4**

En estos escenarios se representó la movilidad vehicular de la hora pico. Sin adaptación del modelo de movilidad de Krauss en el escenario 2 y con todos los parámetros del modelo de movilidad adaptado obtenidos en el capítulo 2 para el escenario 4. En la tabla 4.13 se observa un gran incremento en el número de vehículos presentes en la simulación para el escenario 4 respecto del escenario sin adaptación, a diferencia de la comparación entre los escenarios 1 y 3, se puede observar que la adaptación del modelo de movilidad de Krauss permite obtener un número de vehículos en la simulación muy similar al número de vehículos proyectado.

Escenario	Número de vehículos proyectado	Número de vehículos en la simulación
2	1288	836
4	1288	1082

Tabla 4.13. Número de vehículos en los escenarios 2 y 4. Por los autores.

En la figura 4.25 se presenta la cantidad de vehículos obtenida en las repeticiones realizadas para los escenarios de simulación 2 y 4.

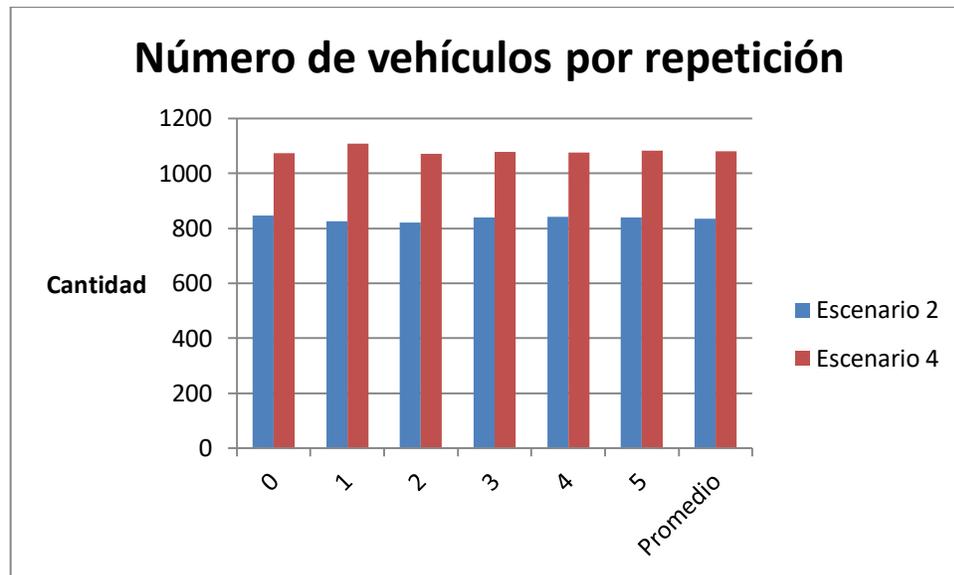


Figura 4.25. Número de vehículos obtenidos en cada repetición para los escenarios de simulación 2 y 4. Por los autores.

En la tasa de transferencia promedio alcanzada en el sistema en los escenarios 2 y 4, mostrada en la tabla 4.14, se observa el efecto del incremento en el número de vehículos, entre el escenario adaptado y el no adaptado. La tasa de transferencia alcanzada en el sistema aumenta y se observa una mayor diferencia respecto de la encontrada en la comparación de los escenarios 1 y 3 para la hora valle; es decir, se hace más evidente el efecto de la adaptación del modelo de movilidad a medida que se incrementa el número de vehículos.

Escenario	Tasa de transferencia promedio (bps)	Tasa de Transferencia Promedio Acumulada (Mbps)
2	3933,12	3,29
4	4997,63	5,4

Tabla 4.14. Tasa de transferencia promedio alcanzada en los escenarios 2 y 4. Por los autores.

Al igual que para los anteriores escenarios, para los escenarios 2 y 4 se analizó la cantidad de colisiones obtenidas a nivel de sistema en el acceso al medio durante el tiempo de simulación. En la tabla 4.15 se observa para cada repetición realizada el número total de colisiones.

Colisiones para cada repetición		
Escenario	Repetición	Colisiones
2	0	33234
	1	36178
	2	19422
	3	29972
	4	19304
	5	5938
4	0	55846
	1	69313
	2	27022
	3	21719
	4	32993
	5	25478

Tabla 4.15. Colisiones para los escenarios 2 y 4. Por los autores.

En el escenario 2, en la repetición 0, se generaron 33234 colisiones; y para el escenario 4 se registró un mayor número de colisiones en la repetición 1 con 69313. El mayor número de colisiones en los dos escenarios coincide precisamente con la repetición donde se obtuvo la mayor cantidad de vehículos para el tiempo de simulación considerado, como puede observarse en la figura 4.35. Se evidencia nuevamente la relación directa entre la cantidad de vehículos y el número de colisiones en los escenarios 2 y 4.

Al igual que en la comparación de los escenarios de la hora valle, se observa en el escenario adaptado, en este caso el escenario 4, una mayor tasa de transferencia promedio en el sistema, pero esta vez el incremento de los vehículos generados en el proceso de adaptación influye significativamente.

Se analizó el comportamiento de la velocidad en los escenarios 2 y 4 teniendo en cuenta la relación entre el incremento de la velocidad y la pérdida de paquetes mencionada.

En el escenario 2 la máxima velocidad alcanzada es de 100 km/h, ya que en este escenario se implementa la configuración por defecto del modelo de movilidad de Krauss en SUMO de la misma forma en que se realizó para el escenario 1; en el escenario 4, producto de las mismas restricciones de velocidad realizadas en el escenario 3, se registró nuevamente una velocidad máxima de 75 km/h.

Escenario	Repetición	Velocidad Máxima alcanzada (Km/h)	Vehículos a más de 70 Km/h	Número de vehículos	porcentaje %
2	0	100	554	846	65,48
	1	100	546	825	66,18
	2	100	450	822	54,74
	3	100	539	840	64,17
	4	100	440	842	52,26
	5	100	176	839	20,98
4	0	75	631	1073	58,81
	1	75	733	1108	66,16
	2	75	449	1071	41,92
	3	75	379	1078	35,16
	4	75	643	1077	59,7
	5	75	487	1083	44,97

Tabla 4.16. Velocidades en los escenarios 2 y 4. Por los autores.

Se observa en la tabla 4.16 que el porcentaje de vehículos que supera los 70 Km/h es muy cercano en los dos escenarios comparados con un ligero incremento en el escenario sin adaptación, pero del porcentaje en el escenario 2 hacen parte muchos vehículos con velocidades cercanas a los 100 Km/h, lo cual influye en la pérdida de paquetes afectando la tasa de transferencia promedio alcanzada en el sistema.

Al realizar la comparación se pudo determinar que los principales efectos de la adaptación del modelo de movilidad de Krauss, en los escenarios de alta y baja densidad de tráfico, son el control de la velocidad y que el número de vehículos obtenido en la simulación es muy cercano al registrado en el conteo realizado en el sector, efectos que se hicieron más evidentes y necesarios al aumentar el número de vehículos proyectados para la simulación. Estos factores influyen en la capacidad obtenida a nivel de sistema en la simulación de la red VANET en el sector, teniendo en cuenta la tasa de transferencia promedio; ya que estas dos características producen un efecto en el desempeño de la red, debido a la pérdida de paquetes presentada por el efecto de la velocidad y al incremento de la tasa de transferencia promedio al aumentar el número de vehículos. Por lo tanto, si se espera realizar una estimación real de una red VANET en algún sector es necesario realizar un proceso de adaptación del modelo de movilidad escogido, para que estos resultados reflejen los requerimientos reales en la implementación de alguna aplicación para los usuarios de la red.

5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones del presente trabajo de grado teniendo en cuenta los objetivos propuestos, las recomendaciones fruto de la experiencia en el trabajo, y las sugerencias para trabajos futuros de acuerdo a los diferentes elementos que sirvieron como apoyo para el proceso de experimentación y análisis en el trabajo de grado realizado.

A partir del análisis correspondiente de la capacidad en la red VANET simulada, y del impacto que generó en éste la adaptación del medio y modelo de movilidad en el cual se realizó el estudio, se presentan las siguientes conclusiones, recomendaciones y sugerencias para trabajos futuros.

5.1. CONCLUSIONES

- Los parámetros relevantes en la adaptación del modelo de movilidad de Krauss, para el sector comprendido entre la calle 18N y la calle 27N sobre la Avenida Panamericana, son: la velocidad que la mayoría de los conductores desean alcanzar al desplazarse por el sector, aceleración, desaceleración y el tamaño de los vehículos observados. Estos factores determinan el nivel de representación del entorno de movilidad vehicular en el sector para el proceso de adaptación del modelo de movilidad de Krauss.
- El uso de un simulador VANET de acople bidireccional permite observar de una mejor manera el desempeño de la red ante los cambios repentinos en el tráfico vehicular. En la simulación de los cuatro escenarios se pudo comprobar como los efectos del tráfico vehicular (congestión vehicular, tiempo entre semáforos, paradas de autobuses) eran registrados en el simulador de red, y éste a su vez realizaba los cambios en el proceso de comunicación entre los vehículos.
- La teoría de la ingeniería de tráfico vehicular es indispensable en un trabajo que involucre la implementación de una red VANET en un entorno vehicular real, ya que existen una gran variedad de técnicas desarrolladas para obtener medidas en el tráfico relevantes en el proceso de representación del escenario de movilidad. Es necesario conocer y apropiarse los procedimientos necesarios de acuerdo al estudio que se desee realizar en algún sector.
- El proceso de adaptación del modelo de movilidad es necesario para la simulación previa a una implementación real de una red VANET, ya que permite un acercamiento a los requerimientos de la red, de acuerdo a los servicios que se busque implementar. Muchos de los factores que influyen en la capacidad de una red VANET están relacionados directamente con factores propios del sector, tales como el número de vehículos, su tamaño, velocidad y los sectores de congestión vehicular en el sector, factores que son controlados con el proceso de adaptación del modelo de movilidad.
- La adaptación del modelo de movilidad permite involucrar en la simulación un número de vehículos aproximado al registrado en el conteo de vehículos. Este aspecto es muy importante en el análisis de capacidad de una red vehicular, ya que el número de nodos

se relaciona directamente con la cantidad de información que fluye a través de la red VANET.

- El control de la velocidad de todos los tipos de vehículos es importante para dimensionar correctamente la capacidad de la red VANET, de acuerdo a la tasa de transferencia alcanzable o deseada en el sistema. Ya que existe una relación directa entre la velocidad a la que viajan los vehículos y la pérdida de paquetes en una red VANET.
- Para efectos del análisis de capacidad en la red VANET, la cantidad de vehículos en la simulación y su velocidad fueron los aspectos de tráfico más relevantes; ya que estos afectaron significativamente el proceso de comunicación entre los vehículos de la red en la simulación. Por tal motivo, para conocer la capacidad real requerida para una aplicación específica en una red VANET, es muy importante realizar primero la adaptación de un modelo de movilidad en el sector de estudio.
- Dependiendo de la aplicación en estudio, es posible analizar la capacidad cambiando el tamaño del paquete transmitido por todos los nodos a través de la red VANET en el sector de estudio, tal como se evidencia en este trabajo de grado.

5.2. RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo del trabajo de grado se reconocieron dificultades, tanto en el uso de las herramientas software como en el proceso de toma de medidas de tráfico vehicular en la zona estudiada. Por lo tanto, a continuación se presentan una serie de recomendaciones fruto de la experiencia en la solución de dichos inconvenientes.

- Es importante contrastar inicialmente los objetivos del proyecto, en cuanto a procesos de comunicación de la red VANET se refiere, con las particularidades de la zona representada en el escenario de simulación. El sector debe reunir características que pongan a prueba el desempeño de la red.
- Con el fin de que la simulación logre reflejar el comportamiento vehicular en el sector, y de esta manera obtener resultados más acertados, es necesario que el mapa represente las características viales (número de carriles, tiempo de semáforos, sentido de las vías, vías alternas, sitios de atracción).
- Una vez identificados los parámetros de movilidad vehicular relevantes para el proceso de adaptación se debe realizar una solicitud a las autoridades de tránsito locales, con el fin de obtener los resultados existentes de mediciones anteriores en el sector.
- De no existir datos, es necesario realizar las medidas teniendo en cuenta su relevancia en los resultados esperados utilizando técnicas avaladas dentro de los estudios viales en la ingeniería de tráfico.
- Para los detalles técnicos vehiculares difíciles de obtener con una medición directa se debe consultar estudios similares en fuentes de información nacionales y extranjeras. En estos estudios se registran valores útiles con los cuales es posible trabajar la adaptación sin alterar los análisis de capacidad en la red.

- Se sugiere extender un poco más la cantidad de medidas tomadas en la zona, respecto de aquellas indicadas por los métodos estadísticos, para aumentar la confiabilidad de la información recolectada, siempre y cuando el tiempo dedicado para la totalidad del proyecto así lo permita.
- El registro de las medidas tomadas en campo debe ser revisado diariamente con el fin de detectar posibles fallas en los procedimientos, evitando así la acumulación de errores al final del proceso de medición.
- En cuanto a las herramientas software, especialmente las que componen el simulador híbrido, debe tenerse en cuenta las versiones de cada uno de los componentes; con el fin de evitar problemas de compatibilidad al momento de la comunicación bidireccional y la corrección de mapas.
- De presentarse problemas en la visualización de la interfaz gráfica de SUMO se recomienda revisar la configuración de la tarjeta de video del equipo de cómputo donde se esté realizando la simulación. Es posible que los vehículos se presenten en forma intermitente dificultando la observación del desplazamiento de los vehículos en la zona.
- La implementación del tráfico vehicular en SUMO debe realizarse utilizando MOVE y editando manualmente los archivos generados, ya que de esta manera se reduce el tiempo de elaboración de los mismos. La edición manual es necesaria para ajustar detalles importantes en la construcción del mapa y la generación del tráfico vehicular.
- La corrección del mapa debe realizarse inicialmente en una herramienta diferente al simulador de tráfico, que permita redibujar las vías e incluir los semáforos e intersecciones inexistentes, posteriormente se puede complementar este proceso en el simulador de tráfico, editando manualmente el código.
- Antes de crear el escenario de simulación en Omnet++ es necesario probar el correcto funcionamiento del ambiente vehicular en SUMO, de esta forma se puede confirmar que la interacción entre los vehículos es la esperada, de acuerdo a lo observado en el proceso de medición.
- Con el fin de evitar que las repeticiones recientes, de cada uno de los escenarios, reemplacen las anteriores se debe especificar en el archivo de configuración de Omnet++ el número de repeticiones a realizar, ya que cada una de ellas fijará un proceso de ejecución asociado a un número aleatorio, de esta manera todas las repeticiones configuradas entregarán diferentes resultados.
- Para determinar el número de repeticiones es recomendable seguir un proceso estadístico realizado en estudios similares por instituciones académicas y/o gubernamentales.
- En ocasiones algunos resultados numéricos deben trasladarse a hojas de Excel para un tratamiento adecuado de los datos, pero al realizar este paso es posible que aparezcan dificultades en la ubicación de la “coma”, en el caso de unidades decimales. En este caso debe exportarse en formato CSV, importar el contenido de dicho archivo desde la hoja de Excel definiendo la “coma” como separador de la parte decimal, y posteriormente trasponer los datos obtenidos en columnas.

5.3. TRABAJOS FUTUROS

Después de realizar el análisis de la capacidad de la red VANET utilizando el modelo adaptado al sector escogido en la ciudad, surgen posibilidades de ampliar el proceso iniciado con el presente trabajo de grado. Los trabajos propuestos son:

- La tecnología 802.11p no es la única tecnología radio propuesta para implementar una red VANET, por lo tanto se propone realizar una simulación de similares características utilizando WIMAX, ya que en el estándar 802.16e se presentan mejoras en cuanto a movilidad se refiere, haciéndole una tecnología viable en la implementación de una red vehicular.
- Con el fin de simular otro tipo de servicios que requieran el acceso a la red de infraestructura se propone realizar la simulación anexando unidades al borde de la carretera RSU.
- Es posible que las edificaciones cercanas produzcan un efecto en los enlaces entre vehículos, por lo tanto se propone realizar el análisis del efecto de las construcciones del sector.
- Es conveniente lograr introducir en la construcción de un modelo de movilidad vehicular el nivel de habilidad en la conducción, pero esto requiere un estudio de mayor enfoque hacia las características personales de los conductores, estudio que puede ser propuesto para profesionales de otras disciplinas.
- Dentro de la propuesta en la integración de otras disciplinas en la construcción de un modelo de movilidad vehicular para el sector estudiado, y para la ciudad de Popayán en general, sería importante realizar un estudio técnico, por parte de la autoridad de tránsito local de las características de los vehículos que circulan en la ciudad (capacidad de aceleración y de frenado, velocidad máxima, longitud, etc.).
- Se propone para futuros trabajos lograr simular el desplazamiento indiscriminado entre carriles, propio de los conductores de motocicletas.

REFERENCIAS

- [1] B. Mustafa, U.W. Raja, "Issues of Routing in VANET," M.S. Thesis, School of Computing Blekinge Institute of Technology, Ronneby, Sweden, 2010.
- [2] S. Zeadally, R. Hunt, Y.S. Chen, A. Irwin, y A. HAssan, "Vehicular ad hoc networks (VANETS): status, results, and challenges," *Telecommunication Systems*, vol. 50, no. 4, pp. 217-241, Agosto 2012
- [3] J. Härri, F. Filali, y C. Bonnet, "Mobility Models for Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey," Institut Eurécom, Sophia-Antopolis, Niza, Francia, Reporte de Investigación RR-06-168, 2006.
- [4] Federal Highway Administration, Vehicle Infrastructure Integration (VII) Architecture and Functional Requirements, Abril 12, 2005, Versión 1.0.
- [5] H. Moustafa, Y. Zang, *Vehicular Networks Techniques, Standards and Applications*. Boston, USA: Auerbach-Publications, 2009.
- [6] H. Pishro, A. Ganz, y D. Ni, "The capacity of vehicular ad-hoc networks," en *Forty-Fifth Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing*, Monticello, IL, 2007.
- [7] C.M. Huang, Y.S. Chen, , *Telematics Communication Technologies and Vehicular Networks: Wireless Architectures and applications*. New York, USA: Information Science Reference, 2010.
- [8] M.W Ryu, K.H. Cho, "A Survey of Greedy Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks," *Smart Computing Review*, vol. 2, no. 2, pp. 125-137, Abril 2012.
- [9] V. Maldonado, "Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad para Redes Ad-Hoc Vehiculares usando mapas reales," Trabajo Fin de Titulación, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador, 2012.
- [10] P. Ranjana y K. Ahirwar, "Comparative Study of VANET and MANET Routing Protocols," en *International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies*, India, 2011.
- [11] M. Sánchez, "Optimización de rutas para redes móviles en redes Ad-hoc Vehiculares," Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid , Madrid, España, 2010.
- [12] J. Flórez, J. Rojas, y D. López, "Evaluación de Tecnologías de Comunicación para Redes

- Vehiculares de última generación," en *Redes de Ingeniería*, vol. 1, no. 1, pp. 12-23, Mayo 2010.
- [13] R. Calzada, "Performance evaluation of realistic scenarios for vehicular ad-hoc networks with VanetMobisim and NS2 simulators," Proyecto final de carrera, Escuela Superior de Ingeniería de Telecomunicaciones de Barcelona, Barcelona, 2011.
- [14] S. Al-Sultan, "A comprehensive survey on vehicular Ad Hoc network," en *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 36, no. 3, Febrero 2013.
- [15] M. Ali, "Simulation and Analysis of Vehicular Network Capacity," M.S. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Noruega, 2013.
- [16] Y. Wang, X. Duan, D. Tian, G. Lu y H. Yu, "Throughput and Delay Limits of 802.11p and Its Influence on Highway Capacity," *Procedia, Social and Behavioral Sciences*, vol. 96, pp. 2096-2104, Noviembre 2013.
- [17] N. Gélvez, D. López, B. Villanueva, "Análisis de la viabilidad de la implementación de VANET sobre el medio de transporte TRANSMILENIO," *Redes de Ingeniería*, vol. 4, no. 1, pp. 95-104, Enero-Julio 2013.
- [18] S. Eichler, "Performance Evaluation of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard," en *Vehicular Technology Conference*, 2007.
- [19] H. Rojas, "Monitoreo del comportamiento de servidores de aplicaciones," Tesis, Instituto Politécnico Nacional - Centro de Investigación en Computación, México D.F., 2008.
- [20] K. Bilstrup, E. Uhlemann, E. Ström, y U. Bilstrup, "Evaluation of the IEEE 802.11p MAC method for vehicle to vehicle communication," en *68th IEEE Vehicular Technology Conference*, Piscataway, 2008, pp. 1-5.
- [21] R. Bruno, M. Conti, y E. Gregori, "Throughput Analysis and Measurements in IEEE 802.11 WLANs with TCP and UDP traffic flows," en *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 7, no. 2, pp. 1-15, Febrero 2008.
- [22] N. Lu, X. Shen, *Capacity Analysis of Vehicular Communication Networks*. Ontario, Canada: Springer, 2013.
- [23] J. Guerrero, C. Flores, P. Damián, A. Barba, y A. Reyes, "A Performance Study of the 802.11p Standard for Vehicular Applications," en *7th International Conference on Intelligent Environments*, Nottingham, United Kingdom, 2011.

- [24] R. Santos, A. Guerrero, y A. Edwards, "Comparative Analysis of IEEE 802.11p and IEEE 802.16-2004 Technologies in a Vehicular Scenario," en *Recent Developments in Mobile Communications*, J. Maicas, Ed.: InTech, 2011, pp. 167-177.
- [25] A. Pardo, "C4R: Generación de modelos de movilidad para redes de vehículos a partir de mapas reales," Trabajo Fin de Carrera, Escuela Universitaria de Teruel, Zaragoza, España, 2011.
- [26] Quadstone Paramics. [Online]. Disponible: <http://www.paramics-online.com/> [Consultado: Junio 2013].
- [27] McTrans. [Online]. Disponible: <http://mctrans.ce.ufl.edu/featured/tsis/version5/corsim.htm> [Consultado: Junio 2013].
- [28] VisSim. [Online]. Disponible: <http://www.vissim.com/> [Consultado: Junio 2013].
- [29] Ana María Orozco, Gonzalo Llano, Ph.D, Roger Michoud, "Redes vehiculares Ad-hoc: aplicaciones basadas en simulación," *Ingenium*, vol. 6, no. 12, pp. 11-22, 2012.
- [30] O. Orozco, D. Chavarro, "Impacto de la velocidad y modelo de movilidad en una comunicación de datos de una red vehicular," Trabajo de Grado, Universidad del Cauca, Popayán, 2013.
- [31] S. Krauss, "Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision ," Thesis, Universidad de Colonia, Renania del Norte-Westfalia, Alemania , 1998.
- [32] "Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito," Secretaría de Desarrollo Social, Mexico D.F, Manual Normativo.
- [33] Medidas de Coches. [Online]. Disponible: <http://www.medidasdecoches.com> [Consultado: Junio 2013].
- [34] Arpem. [Online]. Disponible: <http://www.arpem.com/motos/modelos/ktm/fotos/2013/1190-adventure/dimensiones.html> [Consultado: Junio 2013].
- [35] Fondo de Prevención Vial, Instituto de Posgrado Facultad de Ingeniería Civil Universidad del Cauca, Método para establecer límites de velocidad en carreteras colombianas, 2010
- [36] E. Jiménez, "Estudio Sobre Velocidad Puntual Av. Ambalá entre Calles 67 y 69 Ibagué (Tolima)," Informe, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2007.

- [37] P. Box, C. Oppenlander, *Manual de Estudios de Ingeniería de Tránsito*. Mexico: Representación de servicios e Ingeniería, 1985.
- [38] V. Valencia, "Ingeniería de Tránsito-Guía de Clase," Manual, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2007.
- [39] L. Ojeda, *Probabilidad y Estadística Básica para Ingenieros*. Guayaquil, Ecuador, 2007.
- [40] A. García, "Análisis de distribuciones estadísticas alternativas a las tradicionales para la optimización de los caudales de cálculo empleados en los estudios hidrológicos," Universidad de Extremadura, Badajoz, España, Tesis Doctoral 2013.
- [41] National Highway Traffic Safety Administration. [Online]. Disponible: <http://www.nhtsa.gov/Aggressive> [Consultado: Agosto 2013].
- [42] Federal Highway Administration, "Traffic Analysis Toolbox Vol III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software," Georgetown, USA, Publicación FHWA-HRT-04-040, 2004.
- [43] Wokingham Borough Council, "Wokingham Town Centre VISSIM Modelling Local Model," Informe de validación, Wokingham Borough Council, Wokingham, 2011.
- [44] T. Triggs, W. Harris, "Reaction Time of Drivers to Road Stimuli," Report HFR-12, Monash University, Victoria, Australia, 1982.
- [45] R. Murcia, "Evaluación de Herramientas de simulación de Redes Vehiculares," Trabajo Fin de Máster, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, España, 2010.
- [46] P. González, "Estudio del Simulador de Redes Vehiculares VEINS," Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2012.
- [47] C. Sommer, F. Dressler, "Progressing Toward Realistic Mobility Models in VANET Simulations," *Communications Magazine IEEE*, vol. 46, no. 11, Noviembre 2008.
- [48] S. Joerer, F. Dressler, C. Sommer, "Comparing Apples and Oranges? Trends in IVC Simulations," en *9th ACM International Workshop on Vehicular Interworking (VANET 2012)*, Low Wood Bay, Lake District, UK, 2012, pp. 27-32.
- [49] H. Samaniego, "Simulación de Redes Vehiculares/VANET en entornos reales," Trabajo Fin de Máster, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Telecomunicación, Málaga, España, 2012.

- [50] B. Guguich, D. López, F. Avas, "Volzila: comunicación inter-vehicular," Proyecto Fin de Carrera, Universidad de la República, Uruguay, 2010.
- [51] SUMO, "Simulation of Urban Mobility". [Online]. Disponible: http://sumo-sim.org/wiki/Main_Page [Consultado: Mayo 2013].
- [52] M. Dowd, T. Schaffnit, M. Shulman, W. Otero, J. Kenney, 5.9 GHz DSRC Connected Vehicles for Intelligent Transport Systems, Septiembre 2013, Alliance of Automobile Manufacturers "Alliance", Association of Global Automakers "Global", Office of Engineering and Technology "OET" DSRC viability meeting.
- [53] L. Delgrossi, "The Future of the Automobile," Presentación de Clase ME302, Universidad de Stanford, Abril 2013.
- [54] M. Báguena, C. Calafate, J. Cano, y P. Manzoni, "Simulación de redes vehiculares: retos hacia un modelo más realista," en *XXIII Jornadas de Paralelismo*, Elche, España, 2012, pp. 1-6.
- [55] V. Khairnar, S. Pradhan, "Simulation Based: Study and Analysis of Routing Protocol in Vehicular Ad-hoc Network Environment," *Int.J.Computer Technology & Applications*, vol. 43, no. 2, Marzo 2012.
- [56] IEEE Estándar para el acceso inalámbrico en ambientes vehiculares, IEEE Estándar 802.11p, 2010.
- [57] M.C Aswathy, y C. Tripti C, "A Cluster Based Enhancement to AODV for Inter-Vehicular Communication in VANET," *International Journal of Grid Computing & Applications (IJGCA)*, vol. 3, no. 3, 2012.
- [58] M. Amadeo, C. Campolo y A. Molinaro, "Content-Centric Networking: is that a solution for upcoming vehicular networks ?," en *The Ninth ACM International Workshop on Vehicular Inter-Networking, Systems, and Applications*, United Kingdom, 2012.
- [59] TechnoCom, "The WAVE Communications Stack: IEEE 802.11p, 1609.4 y, 1609.3," en *IEEE 66th Vehicular Technology Conference*, Baltimore, MD, USA, 2007.
- [60] A. Caicedo, J. Martínez y G. Agredo, "Evaluación del desempeño de la transmisión de voz y video IP en redes 802.11p / WAVE," *Revista Universitaria en Telecomunicaciones Informática y Control RUTIC*, vol. 1, no. 1, pp. 15-25, Marzo 2012.

- [61] M. Rodríguez, P. Ruiz, "Evaluación de Propuestas de Servicios de Localización para Redes VANET," Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Murcia, Murcia, España, 2009.
- [62] H. Quevedo. *Métodos Estadísticos para la Ingeniería Ambiental y la Ciencia*. Biblioteca Virtual de la Universidad Autónoma de Cd. Juárez, (2006). [E-book]. Disponible: <http://bivir.uacj.mx/LibrosElectronicosLibres/UACJ/ua00001.pdf>.
- [63] M. Rodríguez, y P. Ruiz, "Evaluación de Propuestas de Servicios de Localización para redes VANET," Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Murcia, Murcia, España, 2009.
- [64] M. Mansoori, y M. Mahdavi, "Throughput capacity analysis of large multi-channel, multi-interface," *Performance Evaluation*, vol. 70, no. 12, pp. 45-76, octubre 2012.
- [65] G. Jiménez, D. López, L. Pedraza, "Simulación y análisis de desempeño de protocolos unicast para redes VANET," *Tecnura*, vol. 16, no. 31, pp. 66-75, Enero 2012.
- [66] V. Sandonís, "Estudio y desarrollo de un protocolo de encaminamiento geográfico y su integración con IPv6," Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III, Madrid, 2009.
- [67] P. Gupta, "The Capacity of Wireless Networks," en *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 2, pp. 388-404, Marzo 2000.
- [68] W. Grote, C. Avila, y A. Molina, "Análisis de máximo desempeño para WLAN operando a tasas fijas o adaptativas usando el estándar IEEE 802.11 a/b/g," *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 15, no. 3, pp. 320-327, Enero 2007.
- [69] V.D. Khairnar, y K. Kotecha, "Performance of Vehicle to Vehicle Communication using IEEE 802.11p in Vehicular Ad-hoc Network Environment," *International Journal of Network Security & Its Applications (IJNSA)*, vol. 5, no. 2, pp. 143-170, Marzo 2013.
- [70] LANTEL Group. [Online]. Disponible: <http://www.segurosaduana.com/container.htm> [Consultado: Junio 2013].
- [71] ICESI, Pregrado Economía Logística. [Online]. Disponible: <http://www.icesi.edu.co/blogs/pregradoeconomialogistica/files/2008/11/medidas-camiones.pdf> [Consultado: Junio 2013].
- [72] Wikipedia, La Enciclopedia Libre [Online]. Disponible: http://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Dimensiones_de_modelos_de_autom%C3%B3viles [Consultado: Junio 2013].

- [73] Arpem. [Online]. Disponible: <http://www.arpem.com/furgonetas/citroen/jumpy/imagenes-08/citroen-jumpy-furgon-dimensiones.html> [Consultado: Junio 2013].
- [74] B. Guguich, D. López, F. Avas, "Vo!zila: comunicación inter-vehicular," Proyecto Fin de Carrera, Universidad de la República, Uruguay, 2010.