

IMPACTO DEL ENRUTAMIENTO EN EL DESEMPEÑO DE LA COMUNICACIÓN DE DATOS EN UNA RED VANET



**Isabel Cristina Chávez Tobar
Dannyr Jazmín Guevara Hidalgo**

**Director
Ing. Oscar J. Calderón C.**

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

IMPACTO DEL ENRUTAMIENTO EN EL DESEMPEÑO DE LA COMUNICACIÓN DE DATOS EN UNA RED VANET



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

**Isabel Cristina Chávez Tobar
Dannyr Jazmín Guevara Hidalgo**

**Director
Ing. Oscar J. Calderón C.**

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

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. CAPÍTULO I. RED AD HOC VEHICULAR.....	3
1.1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.2. COMPONENTES Y ARQUITECTURA DE REFERENCIA.....	4
1.2.1. Componentes.....	4
1.2.2. Arquitectura de Referencia.....	4
1.3. CARACTERÍSTICAS DE UNA RED AD HOC VEHICULAR.....	6
1.4. COMUNICACIONES DEDICADAS DE CORTO ALCANCE.....	7
1.4.1. Acceso Inalámbrico en Entornos Vehiculares.....	8
1.5. APLICACIONES.....	10
1.6. DESAFÍOS.....	11
2. ENRUTAMIENTO EN REDES VEHICULARES.....	13
2.1. INTRODUCCIÓN.....	13
2.2. CONCEPTOS BÁSICOS.....	13
2.3. PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO PARA VANET.....	16
2.3.1. Protocolos de Enrutamiento basados en Topología.....	17
2.3.2. Protocolos de Enrutamiento basados en Localización.....	22
2.4. PARÁMETROS DE DESEMPEÑO.....	29
3. ANÁLISIS DE LOS PROTOCOLOS AODV Y DSR.....	32
3.1. INTRODUCCIÓN.....	32
3.2. <i>AD HOC ON DEMAND DISTANCE VECTOR (AODV)</i>	32
3.2.1. Características.....	32
3.2.2. Operación de AODV.....	33
3.2.2.1. Mantenimiento de Números de Secuencia.....	33
3.2.2.2. Listas de Precursores.....	34
3.2.2.3. Descubrimiento de Ruta.....	34
3.2.2.4. Mensajes HELLO.....	37
3.2.2.5. Reparación Local.....	38
3.2.2.6. Mantenimiento de Conectividad Local.....	39
3.2.2.7. Mantenimiento de Ruta.....	39

3.2.2.8.	Parámetros de Configuración.....	40
3.3.	<i>DYNAMIC SOURCE ROUTING</i> (DSR)	42
3.3.1.	Características.....	42
3.3.2.	Operación de DSR.....	42
3.3.2.1.	Descubrimiento de Ruta.....	42
3.3.2.2.	Mantenimiento de Ruta	45
3.3.2.3.	Parámetros de Configuración.....	47
4.	CAPÍTULO IV. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
4.1.	INTRODUCCIÓN	50
4.2.	SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN.....	50
4.3.	METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN.....	52
4.3.1.	Definición de los Escenarios y Casos de Simulación	53
4.3.2.	Definición de las Características de los Escenarios de Simulación.....	54
4.3.3.	Ejecución de las Simulaciones.....	57
4.3.4.	Análisis de Resultados	58
4.3.4.1.	Escenario de Simulación No. 1	58
4.3.4.2.	Escenario de Simulación No. 2	64
4.3.4.3.	Escenario de Simulación No. 3	69
5.	CAPÍTULO V. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	78
5.1.	INTRODUCCIÓN	78
5.2.1.	Respecto a los Protocolos de Enrutamiento	78
5.2.2.	Respecto al Desarrollo de la Simulación y a la Herramienta de Simulación.....	79
5.2.3.	Respecto a los Resultados de la Simulación	80
5.3.	RECOMENDACIONES	80
5.4.	TRABAJOS FUTUROS	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Arquitectura VANET.....	5
Figura 1.2. Asignación de espectro para DSRC a nivel mundial.	8
Figura 1.3. Pila de protocolos WAVE	9
Figura 1.4. Estándares para WAVE	10
Figura 1.5. Clasificación de las aplicaciones VANET.	11
Figura 2.1. Clasificación de los Protocolos de Enrutamiento para VANET	17
Figura 2.2. Parámetros del Protocolo de Enrutamiento asociados al desempeño en una red VANET..	29
Figura 3.1. Descubrimiento de Ruta y Comunicación.....	37
Figura 3.2. Reparación Local y Mensajes HELLO.....	38
Figura 3.3. Mantenimiento de Ruta	40
Figura 3.4. Descubrimiento de Ruta y Comunicación del protocolo DSR	45
Figura 3.5. Mantenimiento de Ruta	47
Figura 4.1. Escenarios de Simulación.....	54
Figura 4.2. Área seleccionada para la simulación.....	55
Figura 4.3. Mapa de la zona importado a EstiNet.	56
Figura 4.4. Área de simulación adaptada para EstiNet.	56
Figura 4.5. Ocurrencia del primer descubrimiento de ruta. Caso 1.1.a y b.	59
Figura 4.6. Ocurrencia del primer descubrimiento de ruta. Caso 1.2.a.....	60
Figura 4.7. Ocurrencia del primer descubrimiento de ruta. Caso 1.2.b.....	61
Figura 4.8. Porcentaje de Paquetes Perdidos en el Escenario 1.....	62
Figura 4.9. <i>Throughput</i> Promedio en el Escenario 1.	63
Figura 4.10. Latencia Promedio para el Escenario 1.....	64
Figura 4.11. Ocurrencia del primer descubrimiento de ruta. Caso 1.1.a y b.	65
Figura 4.12. Ocurrencia del primer descubrimiento de ruta. Caso 1.2.a y b.	66
Figura 4.13. Porcentaje de Paquetes Perdidos en el Escenario 2.....	67
Figura 4.14. <i>Throughput</i> Promedio en el Escenario 2.	68
Figura 4.15. Latencia Promedio para el Escenario 2.....	68
Figura 4.16. Ocurrencia del primer descubrimiento de ruta. Caso 1.1.a.....	69
Figura 4.17. Ocurrencia del primer descubrimiento de ruta. Caso 1.1.b.....	70
Figura 4.18. Ocurrencia del primer descubrimiento de ruta. Caso 1.2.a y b.	71
Figura 4.19. Porcentaje de Paquetes Perdidos en el Escenario 3.....	72
Figura 4.20. <i>Throughput</i> Promedio en el Escenario 3.	73
Figura 4.21. Latencia Promedio para el Escenario 3.....	74

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Dominios de una Red Vehicular. Por los Autores.....	6
Tabla 2.1. Protocolos de Enrutamiento Basados en Topología.....	18
Tabla 2.2. Protocolos de Enrutamiento Basados en Localización.....	23
Tabla 2.3. Resumen de las características de los protocolos de Enrutamiento para VANET.....	28
Tabla 3.1. Campos del mensaje de Solicitud de Ruta (RREQ).....	36
Tabla 3.2. Campos del mensaje de Respuesta de Ruta (RREP).....	36
Tabla 3.3. Campos correspondientes al Mensaje de Error de Ruta (REER).....	39
Tabla 3.4. Parámetros de Configuración por defecto de AODV.....	41
Tabla 3.5. Campos del mensaje de Solicitud de Ruta (RREQ).....	44
Tabla 3.6. Campos del mensaje de Respuesta de Ruta (RREP).....	44
Tabla 3.7. Campos del Mensaje de Error de Ruta (RERR).....	46
Tabla 3.8. Parámetros de Configuración por defecto de DSR.....	48
Tabla 3.9. Comparación entre los protocolos AODV y DSR.....	49
Tabla 4.1. Descripción de los Tipos de Herramientas de Simulación para Redes Vehiculares.....	51
Tabla 4.2. Tabla comparativa de las herramientas de simulación.....	52
Tabla 4.3. Escenarios y Casos de Simulación.....	53
Tabla 4.4. Parámetros de los Escenarios.....	57
Tabla 4.5. Nodos que conforman las rutas establecidas. Escenario 1.....	58
Tabla 4.6. Eventos durante el establecimiento de la comunicación. Caso 1.1.a y b.....	59
Tabla 4.7. Eventos durante el establecimiento de la comunicación. Caso 1.2.a.....	60
Tabla 4.8. Eventos durante el establecimiento de la comunicación. Caso 1.2.b.....	61
Tabla 4.9. Nodos que conforman las rutas establecidas. Escenario 2.....	64
Tabla 4.10. Eventos durante el establecimiento de la comunicación. Caso 1.1.a y b.....	65
Tabla 4.11. Eventos durante el establecimiento de la comunicación. Caso 1.2.a y b.....	66
Tabla 4.12. Nodos que conforman las rutas establecidas. Escenario 3.....	69
Tabla 4.13. Eventos durante el establecimiento de la comunicación. Caso 1.1.a.....	70
Tabla 4.14. Eventos durante el establecimiento de la comunicación. Caso 1.1.b.....	71
Tabla 4.15. Eventos durante el establecimiento de la comunicación. Caso 1.2.a y b.....	72
Tabla 4.16. Resumen del desempeño en una comunicación de datos en una VANET con los protocolos AODV y DSR.....	75

LISTA DE ACRÓNIMOS

AU	<i>Application Unit</i> , Unidad de Aplicación.
BRP	<i>Bordercast Resolution Protocol</i> , Protocolo de Resolución de Ruta.
C2C-CC	<i>Car To Car Communication Consortium</i> , Consorcio de Comunicaciones Carro a Carro.
CBR	<i>Constant Bit Rate</i> , Tasa de Bit Constante.
DAG	<i>Directed Acyclic Graph</i> , Grafo Acíclico Dirigido.
DSN	<i>Destination Sequence Number</i> , Número de Secuencia de Destino.
DSRC	<i>Dedicated Short-Range Communication</i> , Comunicación Dedicada de Corto Alcance.
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> , Comisión Federal de Comunicaciones.
GPS	<i>Global Positioning System</i> , Sistema de Posicionamiento Global.
IARP	<i>Intrazone Routing Protocol</i> , Protocolo de Enrutamiento Dentro de la Zona.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> , Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
IERP	<i>Interzone Routing Protocol</i> , Protocolo de Enrutamiento Entre Zonas.
ITS	<i>Intelligent Transportation System</i> , Sistema de Transporte Inteligente.
ITU	<i>International Telecommunications Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
MAC	<i>Medium Access Control</i> , Control de Acceso al Medio.
MPR	<i>MultiPoint Relay</i> , Retransmisor Multi-Punto.
OBU	<i>On Board Unit</i> , Unidad a Bordo.
OSI	<i>Open System Interconnection</i> , Interconexión de Sistemas Abiertos.
QoS	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio.
RERR	<i>Route Error</i> , Error de Ruta.

RREP	<i>Route Reply</i> , Respuesta de Ruta.
RREQ	<i>Route Request</i> , Solicitud de Ruta.
RSU	<i>Road-Side Unit</i> , Unidad al Lado de la Carretera.
TTL	<i>Time To Live</i> , Tiempo de vida.
VANET	<i>Vehicular Ad hoc Network</i> , Red Ad hoc Vehicular.
WAVE	<i>Wireless Access in Vehicular Environment</i> , Acceso Inalámbrico en Entorno Vehicular.
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i> , Fidelidad Inalámbrica.
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> , Red Inalámbrica de Área Local.
WSMP	<i>WAVE Short Message Protocol</i> , Protocolo de Mensaje Corto WAVE.

INTRODUCCIÓN

A través de los años, las redes inalámbricas evolucionaron con el propósito de ofrecer diferentes servicios y opciones de comunicación a los usuarios en distintos campos de aplicación. Particularmente, la comunicación entre vehículos ha sido de gran interés en áreas de investigación y desarrollo, ya que permite la interconexión entre automóviles, con el fin de proporcionar acceso a la información y comodidad a conductores y pasajeros.

Una Red Vehicular es una red inalámbrica de corto y mediano alcance que surgió como resultado de los avances en tecnologías inalámbricas y las necesidades de la industria automotriz. Este tipo de red se conoce como Red Ad hoc Vehicular (VANET, *Vehicular Ad hoc NETWORK*) y es capaz de proporcionar conectividad entre vehículos e infraestructura vial [1], sobre la cual se soportan diferentes tipos de servicios, entre ellos la seguridad vial, el acceso a Internet y transferencia de datos multimedia.

Las redes VANET son un tipo especial de Redes Móviles Ad Hoc (MANET, *Mobile Ad hoc NETWORK*) que permiten el intercambio de información entre vehículos. Se diferencian de las MANET en que los nodos están limitados a moverse únicamente a lo largo de las vías [2]. Por esta restricción de movilidad, surge la necesidad de realizar nuevas investigaciones, con el fin de desarrollar y mejorar protocolos y métodos de evaluación de desempeño adecuados para redes vehiculares.

Uno de los problemas más notorios que se presentan en redes VANET se relaciona con la transmisión poco confiable de información desde un vehículo a otro. En entornos móviles, el enrutamiento se ve afectado por el alto dinamismo con que se desplazan los nodos, resultando en la pérdida de paquetes, retardo y disminución del *throughput* que sufre una comunicación de datos.

Por otro lado, una red vehicular aborda requerimientos diferentes a los que enfrentan otro tipo de redes Ad hoc, relacionados con aspectos como latencia, *throughput* y confiabilidad. Básicamente, las VANET deben proveer comunicaciones altamente confiables, de baja latencia y con elevada capacidad de enrutamiento que soporten aplicaciones con diversas tasas de datos [2].

Con el fin de cumplir con los requerimientos señalados y afrontar las características de una red VANET, han surgido diferentes investigaciones que buscan modelar ambientes vehiculares para facilitar la simulación de los mismos; como resultado se han desarrollado diversos protocolos de enrutamiento, con los cuales se espera tener un intercambio de información efectivo en este entorno.

Con base en lo anterior, este proyecto de grado realiza mediante simulación un análisis del desempeño de una comunicación de datos en una red vehicular, cuando opera bajo

un protocolo de enrutamiento específico.

Este documento se divide en cinco capítulos estructurados de la siguiente manera:

Capítulo I. Introduce los conceptos fundamentales relacionados con las redes ad hoc vehiculares.

Capítulo II. Presenta una síntesis de los protocolos de enrutamiento relevantes implementados en las redes vehiculares. Además se describen los parámetros que afectan el desempeño de la red.

Capítulo III. Describe el funcionamiento de los dos protocolos de enrutamiento seleccionados para el desarrollo de este proyecto.

Capítulo IV. Describe la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto, incluyendo la herramienta software seleccionada y las características del escenario de simulación. Además se especifican y describen las simulaciones realizadas, los resultados obtenidos y su análisis.

Capítulo V. Se exponen las conclusiones del desarrollo del proyecto y se presentan recomendaciones para el desarrollo de futuros trabajos e investigaciones en este campo.

1. CAPÍTULO I. RED AD HOC VEHICULAR

1.1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los avances en software, hardware y tecnologías de comunicación, impulsaron el desarrollo e implementación de diferentes tipos de redes inalámbricas, entre las que se encuentran las Redes Ad hoc Vehiculares, conocidas como VANET, las cuales se han convertido en un área activa de investigación y desarrollo, debido a su importancia y las ventajas que ofrece en la gestión de tráfico, seguridad vial y comodidad para conductores y pasajeros.

El concepto de red vehicular se propuso con el fin de abordar problemas relacionados con la movilidad de vehículos en calles y carreteras, como accidentes de tránsito, congestión de tráfico y consumo de combustible; para ello los grupos de estandarización, consorcios, agentes gubernamentales y miembros del sector automotriz, unieron esfuerzos para establecer un conjunto de principios y requerimientos que se deben tener en cuenta su desarrollo e implementación. Las redes VANET son aquellas que se crean espontáneamente entre vehículos en movimiento, que están equipados con interfaces inalámbricas para establecer comunicaciones entre ellos y las estaciones ubicadas a lo largo de las vías [3]-[5].

En estas redes se utilizan sensores ubicados al interior de los vehículos e infraestructura desplegada en el camino, que permiten recolectar datos relacionados con el tráfico y su entorno [4]. Dicha información se transmite entre los nodos, con el fin de ayudar a los conductores en la toma de decisiones y mejorar su experiencia al volante.

Para beneficio de los usuarios (conductores y pasajeros), se han desarrollado e implementado una gran variedad de aplicaciones que abordan no sólo aspectos de seguridad vial y monitoreo de tráfico, sino también de información y entretenimiento; siendo las dos primeras, las de mayor importancia al relacionarse directamente con el objetivo de estas redes.

Este capítulo realiza una descripción general de las Redes Vehiculares, incluyendo sus características principales, los estándares que las rigen, aplicaciones y desafíos que enfrentan, con el fin de establecer el contexto para el desarrollo este proyecto.

1.2. COMPONENTES Y ARQUITECTURA DE REFERENCIA

1.2.1. Componentes

Las redes vehiculares están compuestas por distintos elementos con capacidades de comunicación inalámbrica. A continuación se describen los dos tipos de nodos de una red VANET y los elementos que hacen parte de ellos [5]-[15]:

- ✓ **Nodos Móviles (Vehículos):** son nodos que se mueven libremente y pueden unirse a la red o abandonarla con facilidad. En el contexto de las VANET, los nodos son vehículos que circulan a lo largo de las vías, estableciendo conexiones entre ellos y la infraestructura, gracias al conjunto de dispositivos de comunicación en su interior:
 - Unidad a Bordo (OBU, *On Board Unit*): es un dispositivo con capacidades computacionales, encargado de funciones de acceso inalámbrico, enrutamiento, monitoreo de congestión en la red, transferencia confiable de mensajes, seguridad y movilidad IP, que permite establecer conexiones inalámbricas de corto alcance con otras OBUs o dispositivos de red.
 - Unidad de Aplicación (AU, *Application Unit*): es un dispositivo terminal encargado de ejecutar una o múltiples aplicaciones, usando las capacidades de comunicación de la OBU. Estas unidades pueden integrarse al vehículo mediante una conexión permanente con la OBU, o ser elementos portables como agendas electrónicas, *smartphones*, *tablets* o *laptops*.
- ✓ **Nodos Estáticos (Infraestructura):** son nodos ubicados en posiciones fijas a lo largo de las vías, calles y autopistas, que permiten establecer comunicaciones entre los nodos móviles y la red. En el contexto de las VANET, este concepto se refiere a la infraestructura desplegada a lo largo de las carreteras que no sólo permite ampliar el rango de cobertura de la red, sino también recolectar información útil del entorno para los usuarios. Su componente fundamental se describe a continuación:
 - Unidad al lado de la Carretera (RSU, *Road-Side Unit*): es una unidad encargada de redistribuir y reenviar información entre OBUs y otras RSUs. Adicionalmente, ejecuta aplicaciones de seguridad, actúa como fuente de información y provee acceso a Internet a los dispositivos a bordo de los vehículos.

1.2.2. Arquitectura de Referencia

A nivel mundial se han presentado una serie de proyectos relacionados con las redes VANET, y en algunos de ellos se proponen arquitecturas de referencia para las comunicaciones en el entorno vehicular, que abordan conceptos similares con distintas notaciones, dependiendo de la entidad de estandarización. En este contexto existen dos nomenclaturas principales de origen norteamericano y europeo, las comunicaciones Vehículo a Vehículo (V2V, *Vehicle to Vehicle*) estandarizadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*) y las comunicaciones Carro a Carro (C2C, *Car-to-Car*), presentadas por el Consorcio de

Comunicaciones Carro a Carro (C2C-CC, *Car-to-Car Communication Consortium*), respectivamente; siendo V2V la denominación más utilizada en la literatura [12]-[15].

En el contexto de las redes vehiculares, un dominio se define por un grupo de dispositivos que permiten establecer comunicaciones entre los vehículos, las RSUs y la infraestructura. En las VANET se forman tres tipos de dominio, como se observa en la figura 1.1 y cuyos aspectos más importantes se sintetizan en la tabla 1.1.

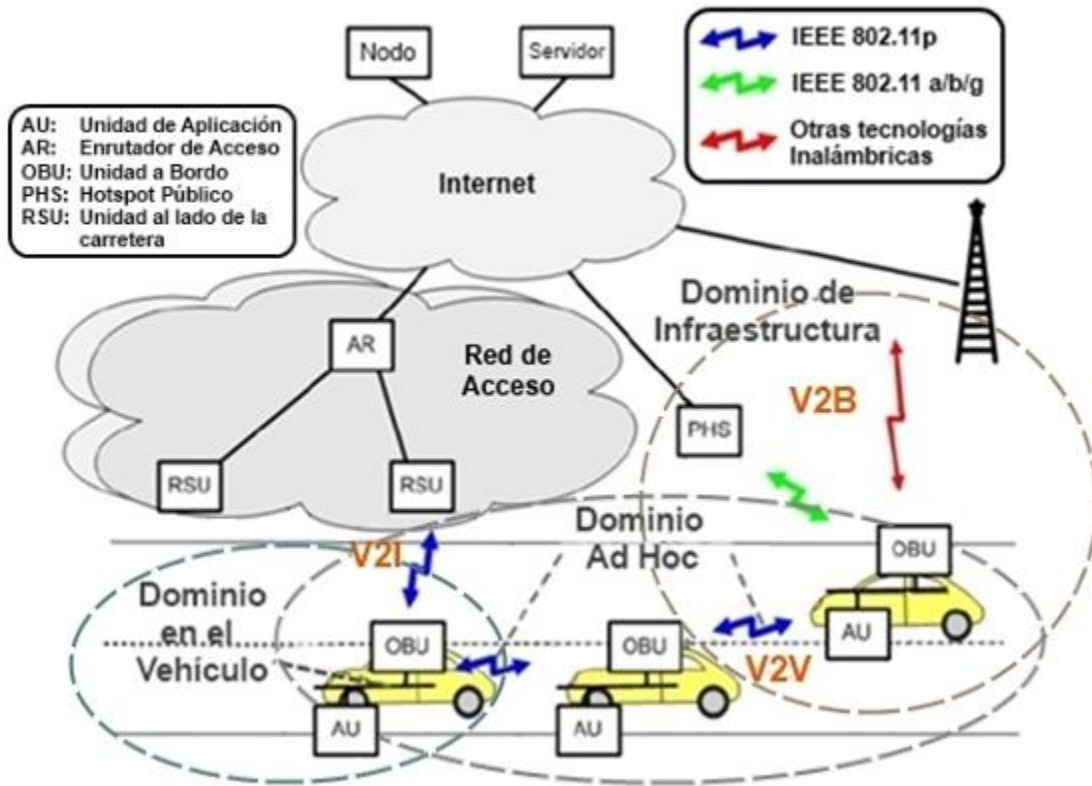


Figura 1.1. Arquitectura VANET. Basada en [10]

Dominios	Descripción	Tipo de Comunicaciones
En el Vehículo	Es una red local establecida dentro del vehículo por la conexión entre la OBU y una o varias Unidades de Aplicación (AU), mediante tecnologías de comunicación alámbrica o inalámbrica.	- Directo en el Vehículo (DIV, <i>Direct In Vehicle</i>): proporciona a los usuarios entretenimiento (Audio/Video) e información extraída de sus dispositivos a bordo (AUs).
Ad Hoc	Es una red de comunicación establecida entre los vehículos equipados con OBUs y/o las RSUs desplegadas en las vías.	- Vehículo a Vehículo (V2V, <i>Vehicle to Vehicle</i>): intercambio de datos, notificaciones y alertas de seguridad entre las OBUs. - Vehículo a Infraestructura (V2I, <i>Vehicle to Infrastructure</i>): intercambio de información entre OBUs y RSUs. - Vehículo a Peatón (V2P, <i>Vehicle to Pedestrian</i>): comunicación entre los OBUs y los peatones.
De Infraestructura	Es una red que permite a las OBUs y RSUs conectarse a la red de acceso inalámbrica (WiFi) o a las de telefonía móvil celular, entre otras, para tener conexión a Internet.	- Vehículo a la Nube de Banda ancha (V2B, <i>Vehicle to Broadband Cloud</i>): permite obtener información desde internet u otras redes. - Vehículo a Hogar (V2H, <i>Vehicle to Home</i>): comunicación entre un nodo de una red fija en el hogar con un nodo vehicular. - Vehículo a Red Eléctrica (V2G, <i>Vehicle to Grid</i>): comunicación entre un nodo de una red VANET con redes de energía eléctrica.

Tabla 1.1. Dominios de una Red Vehicular. Por los Autores.

1.3. CARACTERÍSTICAS DE UNA RED AD HOC VEHICULAR

Las redes vehiculares tienen características únicas que las diferencian de otras redes ad hoc inalámbricas [4]-[8], [10], [12]-[21], estas se sintetizan a continuación:

- ✓ **Control distribuido de red:** el control de la red se realiza en cada nodo, debido a que las VANET no cuentan con una infraestructura centralizada de gestión.
- ✓ **Topología altamente dinámica:** la topología se considera dinámica debido a que el movimiento aleatorio de los nodos que conforman la red, hace que sus posiciones cambien continuamente.
- ✓ **Fluctuación de los enlaces:** debido al alto dinamismo de estas redes, se presenta continuamente variación en los enlaces, lo cual los hace inestables afectando el desempeño de la comunicación.
- ✓ **Suministro de energía ilimitado:** estas redes utilizan las baterías de los automóviles como fuente de energía, la cual puede considerarse ilimitada.
- ✓ **Densidad variable de nodos:** la cantidad de nodos dentro de la red varía constantemente, dependiendo del lugar y el momento del día.

- ✓ **Auto organización de los nodos:** todos los componentes de la red determinan su funcionamiento y sus propios parámetros de configuración, debido a que no se cuenta con un nodo centralizado que realice este tipo de funciones.
- ✓ **Interacción con sensores a bordo:** la interacción con sensores a bordo es fundamental para el intercambio de información en las redes vehiculares, por ejemplo, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, *Global Position System*) que brinda información en tiempo real y facilita la información de localización de los nodos móviles.

1.4. COMUNICACIONES DEDICADAS DE CORTO ALCANCE

Con el fin de desplegar aplicaciones que permitan salvar vidas y mejorar el flujo de tráfico en las carreteras, se desarrollaron las Comunicaciones Dedicadas de Corto Alcance (DSRC, *Dedicated Short-Range Communication*), tecnología utilizada en los Sistemas de Transporte Inteligente para proporcionar enlaces de comunicación seguros y confiables entre vehículos e infraestructura. DSRC se desarrolló para redes altamente dinámicas donde se requieren altas tasas de datos y bajo tiempo de respuesta, soportando el rápido establecimiento de enlaces y minimizando la latencia de comunicación [8].

A nivel mundial se han asignado porciones de espectro para las Comunicaciones Dedicadas de Corto Alcance. En Estados Unidos la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, *Federal Communications Commission*) asignó 75 MHz de espectro en la banda de 5.9 GHz, divididos en siete canales de 10 MHz cada uno, a diferencia de Japón y Europa, donde se eligió la banda de 5.8 GHz [15]. La distribución de bandas de frecuencia se observa en la figura 1.2.

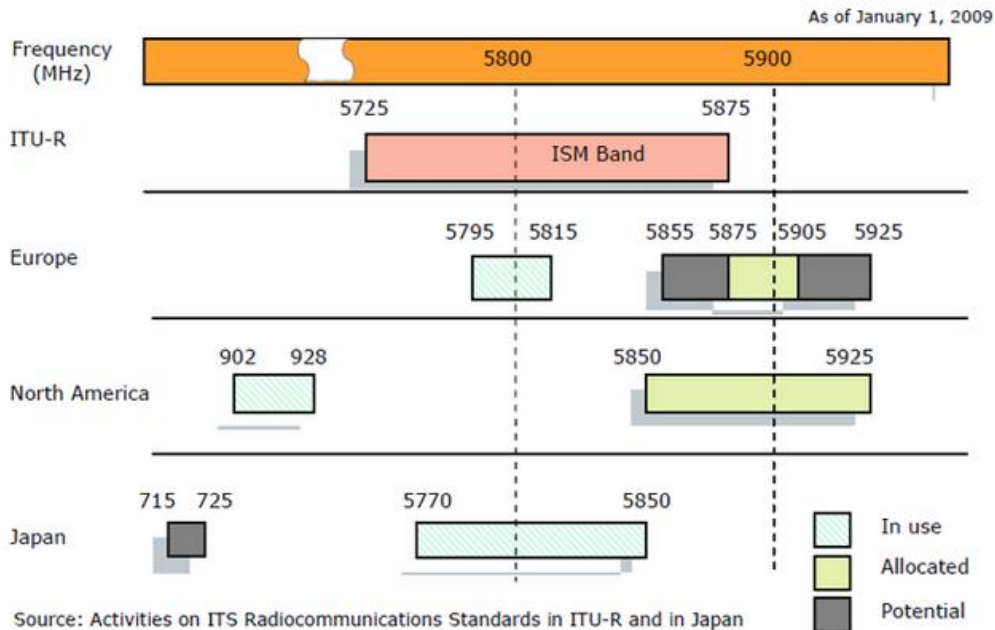


Figura 1.2. Asignación de espectro para DSRC a nivel mundial. Tomada de [10], [22].

El funcionamiento de DSRC se basa en estándares que proporcionan interoperabilidad entre dispositivos de diferentes fabricantes [23]. A continuación se describe su principal estándar.

1.4.1. Acceso Inalámbrico en Entornos Vehiculares (WAVE, *Wireless Access in Vehicular Environments*)

La demanda de movilidad, de cobertura geográfica y el alto dinamismo de las VANET son factores determinantes en la elaboración de protocolos y estándares para la comunicación entre los distintos nodos y dispositivos de red. Después de la asignación de espectro para DSRC, el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, *Institute of Electrical and Electronic Engineers*) desarrolló los estándares WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environments*) IEEE 1609 e IEEE 802.11p que definen el acceso inalámbrico en ambientes vehiculares [18].

De acuerdo con los autores [24]-[26], WAVE es un sistema de radio comunicaciones que proporciona servicios de transporte interoperable y conectividad para aplicaciones fijas y móviles (peatonales y vehiculares). Éste estándar define una pila de protocolos optimizados para el entorno vehicular, que distingue entre el plano de gestión y el plano de datos [24]-[28], ilustrados en la figura 1.3.

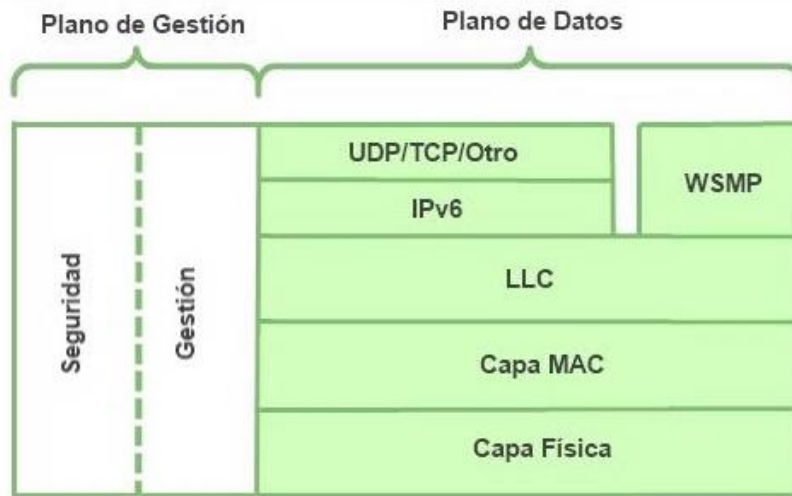


Figura 1.3. Pila de protocolos WAVE. Basada en [24]

- ✓ **Plano de Datos:** es el encargado de transportar el tráfico desde y hacia los usuarios, definido por los protocolos que transportan información a las capas superiores. El estándar WAVE especifica dos protocolos para este plano, el Protocolo de Internet versión 6 (IPv6, *Internet Potocol version 6*) y el Protocolo de Mensaje Corto WAVE (WSMP, *WAVE Short Message Protocol*) diseñado para operar en un entorno inalámbrico vehicular.
- ✓ **Plano de Gestión:** es el encargado de controlar y gestionar las operaciones de red. Se encuentra definido por las funciones de seguridad y gestión que indirectamente dan soporte a la información que se va a transferir, pues se asocia con entidades del plano de datos para desempeñar funciones específicas en cada capa.

La figura 1.4 sintetiza los estándares que rigen las Comunicaciones Dedicadas de Corto Alcance y su relación con el modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open System Interconnection*) [8], [9], [22], [23], [27]-[30].

Modelo de Referencia OSI		Arquitectura WAVE	Descripción del Estándar
Aplicación, Presentación, Sesión.	IEEE 1609.1 (Removido)	Capas Superiores	Conexiones de datos simultáneas, uso de memoria y otros recursos.
Transporte	IEEE 1609.2	Servicios de Seguridad	Funciones de seguridad y protección contra ataques.
Red	IEEE 1609.3	Servicios de Red	Funciones de Gestión y servicios de red. Define los protocolos IP y WSMP.
Enlace	IEEE 1609.4	Subcapa MAC	Especifica extensiones de capa MAC del IEEE 802.11 para operaciones multicanal.
Física	IEEE 802.11p	Subcapa Física (PHY)	Para establecer conexiones robustas de rápida configuración entre vehículos en movimiento.

Figura 1.4. Estándares para WAVE. Por los autores.

1.5. APLICACIONES

Las comunicaciones vehiculares permiten el desarrollo de aplicaciones que proporcionan una amplia gama de información y entretenimiento a conductores y viajeros [5]-[8], [10], [12]-[21], [31], [32]. Las principales aplicaciones de este tipo de redes se clasifican a continuación y se sintetizan en la Figura 1.5.

- ✓ **Aplicaciones de Seguridad:** son las más importantes ya que su objetivo es recopilar información en tiempo real sobre el estado de las vías, para notificar con mensajes de alarma situaciones de peligro que el conductor y pasajeros podrían evitar, reduciendo así la tasa accidentes de tránsito y lesiones en carreteras.
- ✓ **Aplicaciones de Gestión de Transporte:** brindan información sobre las condiciones de tráfico y flujo de vehículos, mediante el monitoreo del entorno, con el fin de mejorar la movilidad de los nodos.
- ✓ **Aplicaciones Comerciales y de Entretenimiento:** brindan a conductores y pasajeros servicios de entretenimiento, localización e información, entre otros.

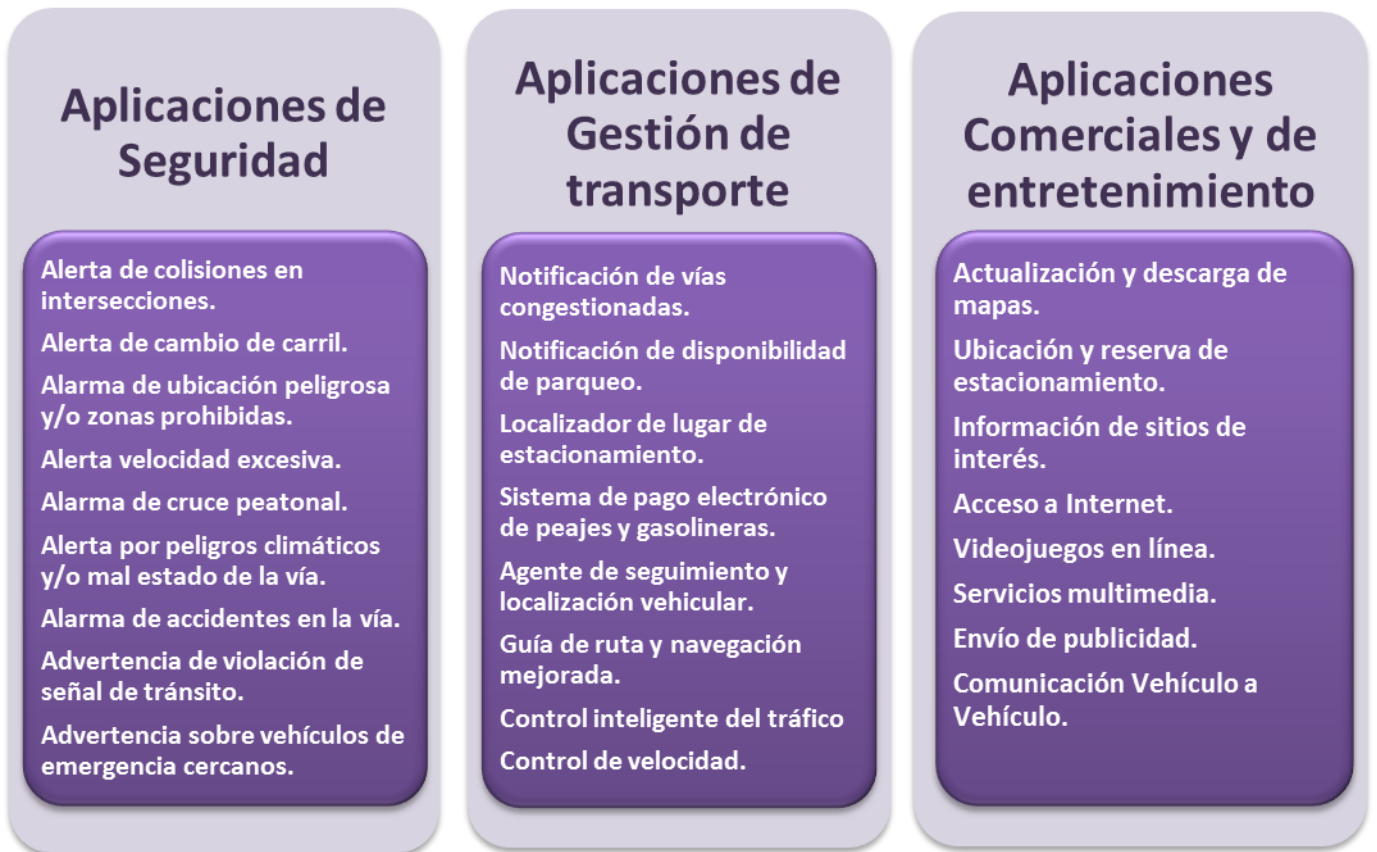


Figura 1.5. Clasificación de las aplicaciones VANET. Por los Autores.

1.6. DESAFÍOS

Debido a las características únicas de una VANET y a la variedad de aplicaciones que se pueden implementar, surgen problemas y requerimientos que representan un desafío para la comunidad científica, por el impacto que tienen sobre el desempeño de estas redes. Diversos autores [5], [7], [9], [19]-[21], [30], [33] han descrito los desafíos presentes en un entorno vehicular, tal como se muestra a continuación:

- ✓ **Desvanecimiento de señal:** se refiere a la atenuación sufrida por la señal como consecuencia de los obstáculos y las pérdidas de trayecto. En las redes vehiculares, el nivel de señal se ve influenciado negativamente por la presencia de obstáculos, como vehículos o edificios.
- ✓ **Limitaciones de ancho de banda:** son restricciones en la capacidad de la red para transportar información, dependen de las propiedades físicas del medio de transmisión y de las tecnologías utilizadas. En el caso de DSRC, se utilizan canales de 10 MHz

para la comunicación de los nodos y es probable que se presente un alto grado de congestión en entornos con gran densidad de vehículos.

- ✓ **Conectividad:** se refiere a la habilidad de establecer y mantener una conexión entre dos o más nodos de una red, así que para reducir fragmentaciones y pérdida de información, es necesario extender el tiempo de vida de los enlaces tanto como sea posible.
- ✓ **Seguridad:** conjunto de medidas preventivas y reactivas que permiten resguardar y proteger la información, para mantener su disponibilidad, confidencialidad, e integridad. En las redes vehiculares se requieren soluciones innovadoras para establecer comunicaciones seguras entre los usuarios.
- ✓ **Calidad de Servicio:** según la Recomendación E.800 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones es “El efecto global de la calidad de funcionamiento de un servicio, que determina el grado de satisfacción de los usuarios”, se requieren propuestas que garanticen Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) en un entorno vehicular, especialmente para aplicaciones en tiempo real.
- ✓ **Gestión de Potencia:** es el control que se debe realizar en los niveles de potencia para evitar interferencia entre los nodos. En las VANET con alta densidad de vehículos es necesario utilizar niveles de potencia bajos, lo cual puede ser contraproducente, ya que se reduciría el alcance de la señal.
- ✓ **Enrutamiento:** es la transmisión de paquetes a través de la red, desde un nodo a otro. Se requiere un protocolo de enrutamiento que tenga en cuenta las características únicas de las redes VANET y sea capaz de transmitir datos desde un nodo a otro en el menor tiempo posible y con baja tasa de errores.

La conceptualización previa permitió caracterizar las redes vehiculares, identificando los estándares y tecnologías utilizados para su funcionamiento, junto con las aplicaciones que se pueden implementar y los desafíos presentes en el despliegue y operación de las mismas, ocasionados no sólo por la fluctuación de los enlaces, sino también por la necesidad de adaptarse a los distintos escenarios que se pueden generar. Es aquí donde se refleja la importancia de un algoritmo de enrutamiento eficiente, capaz de adaptarse a las características y aplicaciones de las redes vehiculares, con el fin de establecer comunicaciones confiables y con baja latencia. En el siguiente capítulo se sintetizan los elementos importantes de algunos protocolos de enrutamiento implementados en las VANETs.

2. ENRUTAMIENTO EN REDES VEHICULARES

2.1. INTRODUCCIÓN

El enrutamiento es una de las funciones más importantes en una red de comunicaciones, dado que se encarga de determinar las rutas que deben seguir los paquetes desde el origen hasta el destino para lograr un efectivo intercambio de información. En entornos móviles, el enrutamiento se vuelve más complejo, debido al alto dinamismo de los nodos, la variabilidad del canal inalámbrico y la fluctuación de los enlaces.

Los protocolos de enrutamiento utilizados en otro tipo de redes inalámbricas, como las MANET, no se desempeñan correctamente en las VANET; como resultado de ello, fue necesario adaptar al entorno vehicular algunos de los mecanismos existentes y diseñar nuevos protocolos específicos para VANET.

En este capítulo se describen diferentes aspectos relacionados con el enrutamiento; se realiza una clasificación de distintos protocolos de enrutamiento implementados en el entorno vehicular con sus características más relevantes, y se identifican los parámetros más importantes que pueden afectar el desempeño de la comunicación en una red VANET.

2.2. CONCEPTOS BÁSICOS

En esta sección se describen diferentes conceptos básicos, necesarios para analizar y determinar las características de los protocolos de enrutamiento en una red VANET.

✓ Asociados al Enrutamiento:

- **Enrutador:** dispositivo encargado de re-enviar los paquetes entre diferentes elementos de red y facilitar la conexión entre múltiples redes, dirigiendo los paquetes de datos desde un nodo fuente a un destino [35].
- **Ruta:** es el camino que se constituye entre dos nodos extremos (origen y destino), a través de múltiples dispositivos de enrutamiento y enlaces de red, y sobre el cual se realiza un intercambio efectivo de información.
- **Algoritmo de Enrutamiento:** es un conjunto de instrucciones o reglas claramente definidas, ordenadas y finitas, que permiten determinar una ruta a través de la cual los paquetes de datos alcanzan su destino [34], [36]-[38].

Los algoritmos de Enrutamiento pueden agruparse en dos clases, dependiendo del tipo de información que utilizan para tomar sus decisiones:

- No Adaptativos (Estáticos): no tienen en cuenta el estado actual de la red. Las decisiones de enrutamiento son procesadas con antelación.
 - Adaptativos (Dinámicos): tienen en cuenta el estado actual del tráfico y la topología de red para tomar decisiones de enrutamiento.
 - **Algoritmo de Enrutamiento de Vector Distancia:** es aquel cuya información de las rutas se registra como vectores de distancia y dirección. La distancia se define en términos de una métrica y la dirección indica el siguiente salto. Estos algoritmos envían periódicamente las tablas de enrutamiento a los nodos vecinos [35], [39]-[42].
 - **Algoritmo de Enrutamiento de Estado de Enlace:** utiliza información de estado de enlace (dirección IP, costo y vecinos involucrados) de todos los nodos de la red, para crear una vista completa de la topología y determinar la ruta más corta hacia el destino [35], [39]-[42].
 - **Protocolo de Enrutamiento:** es el encargado de reunir información útil de la red que pueda ser procesada por el algoritmo de enrutamiento.
- ✓ **Asociados a la Operación y Funcionamiento:**
- **Enrutamiento de Fuente:** el origen establece la ruta que seguirán los datos. Cada paquete enviado lleva en su cabecera una lista completa y ordenada de los nodos a través de los cuales alcanzará su destino.
 - **Enrutamiento Salto a Salto:** cada paquete lleva en su cabecera la dirección del destino y del próximo salto, por lo tanto cada nodo intermedio debe consultar su tabla de enrutamiento para saber hacia dónde reenviarlo.
 - **Enrutamiento de Enlace Invertido:** asigna una dirección lógica a cada enlace de la red, estableciendo un Grafo Acíclico Dirigido (DAG, *Directed Acyclic Graph*) hacia el destino [43], [44]. Un Grafo Acíclico Dirigido es un grafo dirigido¹ que no tiene un camino directo que inicia y termina en uno de sus vértices [45].
 - **Inundación:** proceso mediante el cual un nodo reenvía un paquete entrante hacia todos sus vecinos, exceptuando aquel del que lo recibió. El mayor problema que representa es la gran cantidad de paquetes duplicados circulando en la red [40], [42].

¹ Un grafo dirigido o digrafo es un tipo de grafo en el cual el conjunto de las aristas tiene una dirección definida.

- **Descubrimiento de Ruta:** proceso mediante el cual un nodo origen busca y establece una ruta hacia un destino.
- **Tabla de Enrutamiento:** es un archivo de datos donde se almacena información de rutas sobre redes remotas y conectadas directamente al nodo. La tabla de enrutamiento contiene asociaciones entre la red y el siguiente salto [35].
- **Métrica:** es un valor cuantitativo utilizado para medir la distancia hacia un destino determinado [35].
- **Camino más Corto:** es la ruta con la métrica más baja [35], [42].
- **Número de Secuencia:** es un número que se asigna a cada entrada en una tabla de enrutamiento, permitiendo diferenciar si ésta es obsoleta o no, es decir, entre mayor sea el número de secuencia, la información será más reciente.
- **Bucle de Enrutamiento:** es una condición en la que un paquete se transmite continuamente dentro de una serie de nodos sin que alcance el destino deseado. Este problema se produce cuando dos o más enrutadores tienen información de enrutamiento obsoleta [35], [40].
- **Convergencia:** ocurre cuando todas las tablas de enrutamiento de los enrutadores se encuentran en un estado de uniformidad. La red converge cuando todos los nodos tienen información completa y precisa sobre la topología [33], [38].
- **Escalabilidad:** significa que el número de usuarios y el volumen de tráfico se pueden incrementar con una baja degradación en el desempeño de la red, sin cambiar los componentes y protocolos del sistema.
- **Overhead:** se refiere a los campos adicionales a la cabecera de los paquetes, necesarios para transmitir información útil en una comunicación.
- **Beacon:** es un mensaje enviado periódicamente entre los nodos con información acerca de su localización y el estado de la red.
- **Punto de Anclaje:** nodo utilizado para almacenar temporalmente información mientras se encuentra un próximo salto en la ruta.
- **Máximo Local:** ocurre cuando los paquetes llegan a un nodo que no tiene un próximo salto más cercano al destino que él mismo.

- **Recuperación Local:** estrategia en la cual un nodo intermedio que detecta una falla durante la transmisión, calcula una nueva ruta hacia el destino para entregar los paquetes.

✓ **Asociados al Tipo de Red:**

- **Red Tolerante al Retardo (DTN, *Delay Tolerant Network*):** almacena los paquetes de datos hasta que puedan ser enviados a un nodo más cercano al destino [46], [47].
- **Red No tolerante al Retardo (None-DTN, *None Delay Tolerant Network*):** no tiene la capacidad de almacenar la información, si no hay una ruta establecida [46], [47].
- **Red Híbrida:** combina las características None-DTN y DTN [46], [47].
- **Red Superpuesta (*Overlay Network*):** es una red virtual construida sobre una o más redes existentes, con el fin de establecer enlaces de mayor duración y gestionar información en lugares donde los paquetes tienen alta probabilidad de pérdida [46], [47].
- **Red No Superpuesta (*No Overlay Network*):** carecen de nodos adecuados para establecer enlaces virtuales prolongados [46], [47].

Con la conceptualización realizada se tienen las bases para describir e identificar las características de los protocolos de enrutamiento utilizados en redes vehiculares.

2.3. PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO PARA VANET

Muchos protocolos de enrutamiento se han desarrollado para entornos vehiculares, los cuales pueden ser clasificados con base en múltiples criterios, como sus características, las técnicas usadas para el establecimiento de rutas, el tipo de información de enrutamiento intercambiada entre los nodos, las estructuras de red, los algoritmos de enrutamiento, la calidad de servicio ofrecida, entre otros. La figura 2.1 presenta la clasificación de los protocolos de enrutamiento realizada para este proyecto, con base en el tipo de información utilizada para tomar decisiones de enrutamiento.

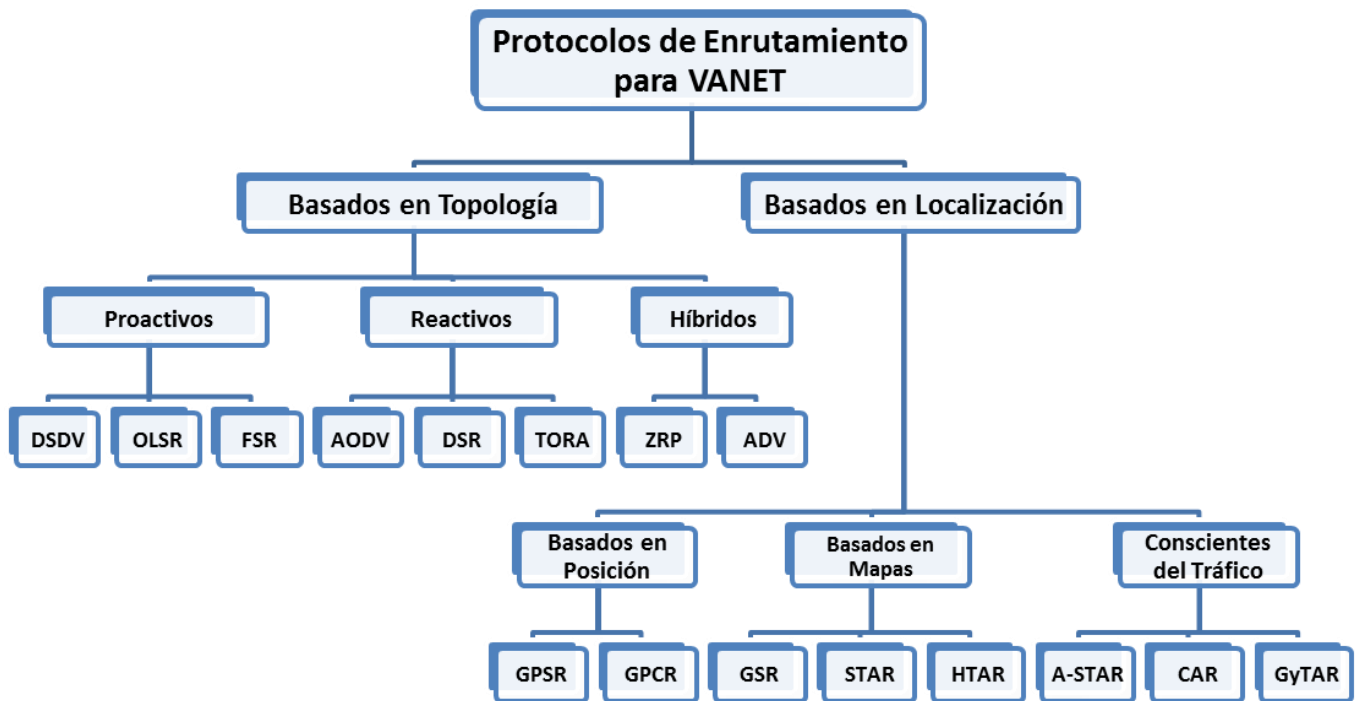


Figura 2.1. Clasificación de los Protocolos de Enrutamiento para VANET. Por los Autores.

2.3.1. Protocolos de Enrutamiento basados en Topología

Los protocolos de enrutamiento basados en topología utilizan información sobre la topología de red y el estado de los enlaces establecidos para seleccionar una ruta óptima hacia el destino [8], [41], [48]-[50]. Se pueden dividir en tres categorías, de acuerdo a la forma como se establecen las rutas:

- ✓ **Proactivos:** cada nodo de la red mantiene una o más tablas con información de todas las rutas, las cuales son actualizadas frecuentemente. Cuando ocurre un cambio de topología, se notifica a toda la red difundiendo mensajes de control. Su principal desventaja es la gran cantidad de *overhead* de enrutamiento que introduce.
- ✓ **Reactivos:** estos protocolos de enrutamiento funcionan bajo demanda, es decir, realizan un descubrimiento de ruta sólo cuando se necesita establecer una comunicación. Su principal desventaja es la latencia inicial que introduce durante el descubrimiento de ruta.
- ✓ **Híbridos:** integran características de los protocolos proactivos y reactivos.

Los principales protocolos de enrutamiento basados en topología se presentan en la tabla 2.1.

Protocolo	Características Técnicas	Funcionamiento	Procesos	Ventajas	Desventajas
Destination Sequenced Distance Vector (DSDV) [51]-[54], [57], [58].	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptativo. - Proactivo. - Vector Distancia. - Salto a Salto. - Camino más corto. - Utiliza Números de Secuencia. - Tablas de enrutamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Los nodos mantienen tablas de enrutamiento con todos sus posibles destinos y la distancia en saltos a la que se encuentran. - Las tablas de enrutamiento se difunden periódicamente o cuando ocurren cambios de topología. - Si un destino ya no es alcanzable, se inunda la red con una actualización, incrementando en uno el número de secuencia y marcando la métrica de ese destino como infinita. - Utiliza dos tipos de mensajes: <ul style="list-style-type: none"> - <i>Full Dump</i>: transporta la información de todas las rutas. - <i>Incremental</i>: transporta información sólo de las rutas nuevas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Inundación de la red con mensajes de actualización. - Selección de ruta. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sin bucles de enrutamiento. - Baja latencia antes de iniciar la comunicación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Desperdicio de ancho de banda. - Alto <i>overhead</i>. - No es escalable.
Optimized Link-State Routing (OLSR) [9], [51], [52]-[58][59].	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptativo. - Proactivo. - Estado de Enlace. - Salto a Salto. - Tablas de enrutamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Establece subconjuntos de nodos que pueden ser alcanzados en uno o dos saltos por un Retransmisor Multi-punto (MPR, <i>MultiPoint Relay</i>), encargado de retransmitir los paquetes. - Utiliza dos tipos de mensajes: <ul style="list-style-type: none"> - HELLO: para sensar el enlace y descubrir los nodos vecinos a un salto de distancia. - Mensajes TC (<i>Topology Control</i>): para intercambiar periódicamente información de estado de enlace entre MPRs. Tienen cobertura global. 	<ul style="list-style-type: none"> - Descubrimiento de nodos vecinos. - Elección de MPR. - Mantenimiento de ruta. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reduce el tamaño de las tablas de enrutamiento. - Disminuye el número de retransmisiones durante la inundación. - Reduce <i>Overhead</i>. 	<ul style="list-style-type: none"> - Desperdicio de ancho de banda. - Requiere que las actualizaciones de estado se realicen con mucha frecuencia. - Responde lentamente a los fallos.
Fisheye State Routing (FSR) [9], [51], [52].	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptativo. - Proactivo. - Estado de Enlace. - Salto a Salto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mantiene un mapa de la topología en cada nodo. - Utiliza la técnica "Ojo de pez", es decir, la calidad y exactitud de la información disminuye a medida que la distancia desde la fuente aumenta. - La frecuencia de las actualizaciones depende de la distancia entre los nodos y la fuente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Descubrimiento de nodos vecinos. - Diseminación de información. - Cálculo de rutas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción de consumo de ancho de banda. - Reducción de <i>overhead</i>. - Sin actualizaciones periódicas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Poco conocimiento de nodos lejanos. - Poca información de enrutamiento disponible para el establecimiento de rutas.

Tabla 2.1. Protocolos de Enrutamiento Basados en Topología (a). Por los Autores.

Protocolo	Características Técnicas	Funcionamiento	Procesos	Ventajas	Desventajas
<p>Ad hoc On demand Distance Vector (AODV) [9], [10], [47], [52], [53], [56]-[59], [60], [62], [64]-[69].</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptativo. - Reactivo. - Vector Distancia. - Salto a Salto. - Camino más corto. - Utiliza Números de Secuencia. - Tablas de enrutamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliza cuatro tipos de mensajes <ul style="list-style-type: none"> - HELLO: para detectar y monitorear los enlaces entre nodos vecinos. - RREQ (<i>Route Request</i>): para iniciar el descubrimiento de ruta. Lo difunde la fuente entre sus nodos vecinos. - RREP (<i>Route Reply</i>): lo envía un nodo hacia el origen si recibe un RREQ y es el destino o conoce una ruta hacia el destino. - RERR (<i>Route Error</i>): se envía cuando se detecta una falla de enlace dentro de una ruta activa, indicando los nodos inalcanzables. Antes de enviarlo, el nodo puede intentar reparar la ruta localmente mediante un descubrimiento de ruta hacia el destino. - El tiempo de vida de la ruta activa debe ser suficiente para permitir la comunicación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Descubrimiento de Ruta. - Mantenimiento de Ruta. - Reparación Local. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sin bucles de enrutamiento. - Bajo <i>Overhead</i>. - Información de enrutamiento confiable. - Responde rápido a las fallas. - Escalable. 	<ul style="list-style-type: none"> - Introduce latencia en el descubrimiento de ruta. - Puede generar rutas inconsistentes. - Consumo innecesario de ancho de banda (mensajes <i>HELLO</i>).
<p>Dynamic Source Routing (DSR) [4], [48], [52], [54], [56]-[62], [69], [70].</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptativo. - Reactivo. - Enrutamiento de Fuente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Inunda la red con solicitudes de ruta. - Cuando un nodo recibe la solicitud revisa su memoria caché, si tiene una ruta hacia el destino envía al origen un mensaje de respuesta de ruta, sino agrega su dirección en la cabecera del paquete y lo difunde localmente. - Los nodos extraen información de la cabecera de los paquetes para generar una lista de rutas y almacenarlas en su memoria caché. - Si hay una falla, se envía un mensaje de error de ruta hacia el origen, quien debe buscar un camino alternativo para continuar la transmisión o iniciar un nuevo descubrimiento de ruta. 	<ul style="list-style-type: none"> - Descubrimiento de Ruta. - Mantenimiento de Ruta. 	<ul style="list-style-type: none"> - No requiere actualizaciones periódicas. - Reduce la carga en la red para futuros descubrimientos de ruta. 	<ul style="list-style-type: none"> - No es escalable. - Si la densidad de nodos es alta, el <i>overhead</i> se incrementa. - No repara las fallas localmente.

Tabla 2.1. Protocolos de Enrutamiento Basados en Topología (b). Por los Autores.

Protocolo	Características Técnicas	Funcionamiento	Procesos	Ventajas	Desventajas
<p>Temporally-Ordered Routing Algorithm (TORA) [48], [52], [56], [61].</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptativo. - Reactivo. - Enlace Invertido. - Salto a Salto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Los mensajes de control se generan en un pequeño conjunto de nodos, cerca del lugar donde se presentan cambios de topología. - Crea un DAG hacia el destino, asignando una altura relativa a cada nodo, para enrutar los paquetes de mayor a menor altura. - Si hay alguna falla, se utiliza el algoritmo de enlace invertido, cambiando las alturas relativas de los nodos para establecer una nueva ruta hacia el destino. - Cuando hay fallas, elimina la ruta, descubre una nueva y reestablece la comunicación en un sólo paso. 	<ul style="list-style-type: none"> - Creación de Ruta (establecimiento del DAG). - Mantenimiento de Ruta. - Eliminación de Ruta. 	<ul style="list-style-type: none"> - Buen desempeño en redes densas. - Los nodos intermedios no necesitan re-difundir mensajes. - Intenta minimizar la sobrecarga de la red. - Descubrimiento y reparación automática de ruta. 	<ul style="list-style-type: none"> - No Busca la ruta más óptima. - AODV y DSR se desempeñan mejor.
<p>Zone Routing Protocol (ZRP) [9], [41], [48] [52], [54], [60], [61].</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptativo. - Híbrido. - Estado de Enlace. - Salto a Salto. - Tabla de enrutamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Divide la topología de red en zonas. - Establece una zona alrededor de cada nodo. - Utiliza un mecanismo de enrutamiento proactivo para el mantenimiento de rutas dentro de las zonas, llamado Protocolo de Enrutamiento Dentro de la Zona (IARP, <i>Intra-zone Routing Protocol</i>). - Para enrutar los paquetes entre las diferentes zonas se utiliza un mecanismo reactivo llamado Protocolo de Enrutamiento Entre Zonas (IERP, <i>Interzone Routing Protocol</i>). - Utiliza un protocolo de Resolución de Ruta (BRP, <i>Bordercast Resolution Protocol</i>) para dirigir consultas fuera de la red local.. - La fuente verifica si el destino está dentro de su zona, si no es así envía una consulta mediante BRP a los nodos del borde. - Si un nodo recibe la consulta, revisa sus tablas, si tiene ruta hacia el destino, responde con un RREP a la fuente, de lo contrario difunde solicitud. 	<ul style="list-style-type: none"> - Establecimiento de Zonas. - Mantenimiento de rutas dentro de la zona. - Enrutamiento local. - Enrutamiento entre zonas. - Difusión de borde. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sin bucles de enrutamiento. - Bajo overhead. - Baja latencia. - Escalable. - Requiere poco ancho de banda. 	<ul style="list-style-type: none"> - Superposición de las zonas de enrutamiento. - Con la densidad de nodos aumenta la complejidad de procesamiento.

Tabla 2.1. Protocolos de Enrutamiento Basados en Topología (c). Por los Autores.

Protocolo	Características Técnicas	Funcionamiento	Procesos	Ventajas	Desventajas
<p>Adaptive Distance Vector (ADV) [50], [57], [65].</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptativo. - Híbrido. - Vector Distancia. - Salto a Salto. - Números de Secuencia. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mantiene rutas sólo para receptores activos. - Al inicio de una nueva conexión, la fuente difunde un paquete de control <i>init-connection</i> avisando que el nodo destino es un receptor activo, quien envía un paquete <i>receiver-alert</i> con su número de secuencia. Así todos los nodos lo agregan a sus tablas de enrutamiento junto con las posibles rutas. - Al finalizar una conexión, la fuente difunde un paquete de control <i>end-connection</i>, y si el destino no tiene conexiones activas adicionales, difunde un paquete de control <i>non-receiver-alert</i>, para dejar de ser un receptor activo. - La frecuencia de las actualizaciones de enrutamiento depende de la carga y la movilidad de la red. 	<ul style="list-style-type: none"> - Inicio de Conexión. - Terminación de Conexión. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sin bucles de enrutamiento. - Reduce el <i>overhead</i>. - Reduce el tamaño y frecuencia de las actualizaciones. - Baja latencia inicial. 	<ul style="list-style-type: none"> - Las rutas activas no se actualizan frecuentemente. - Bajo desempeño en redes con poca carga de tráfico.

Tabla 2.1. Protocolos de Enrutamiento Basados en Topología (d). Por los Autores.

2.3.2. Protocolos de Enrutamiento basados en Localización

Los protocolos de enrutamiento basados en localización utilizan la información de posición de los nodos dentro de la red, por lo tanto requieren que cada vehículo sea capaz de conocer su ubicación y la de sus vecinos a través de un dispositivo GPS [8], [10], [41], [48]-[50]. Se pueden dividir de la siguiente manera [51]:

- ✓ **Enrutamiento basado en posición:** utilizan información de la posición geográfica de los nodos para tomar decisiones de enrutamiento.
- ✓ **Enrutamiento basado en mapas:** combinan información de posición con mapas, para construir una topología de las calles y seleccionar las mejores rutas.
- ✓ **Enrutamiento consciente de tráfico:** utilizan datos en tiempo real sobre la densidad de tráfico e información espacial de la red.

Los protocolos de enrutamiento más importantes basados en localización, se presentan en la tabla 2.2.

Protocolo	Características Técnicas	Funcionamiento	Procesos	Ventajas	Desventajas
<p>Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) [48], [72]-[80].</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptativo. - Salto a salto. - Basado en posición. - None DTN. - Beacon. - Overlay. - Entorno rural. 	<p>Cuenta con dos modos de transmisión.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Modo Ambicioso o codicioso: Cuando un nodo recibe un paquete, elige el nodo más cercano al destino como el siguiente salto, dentro de su región geográfica. <p>Cuando se recibe los datos y no se pueden enviar usando este modo, se cambia al modo de transmisión de perímetro.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Modo de transmisión de perímetro: Si los paquetes llegan a un máximo local las regiones no exploradas podrían formar un nuevo camino al destino. Este método es muy costoso y su utilización periódica puede disminuir el rendimiento de la red. - La información se actualiza utilizando mensajes HELLO y la posición del destino con los servicios de localización. - En la cabecera de los paquetes se tiene un ID para identificar el modo que se está usando. 	<ul style="list-style-type: none"> - Descubrimiento de nodos vecinos. - Enrutamiento Codicioso. - Enrutamiento de perímetro. - Inundación de la red con mensajes de actualización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Los nodos mantienen poca información de la ruta. - Buena capacidad de adaptación en redes altamente dinámicas. 	<ul style="list-style-type: none"> - No maneja de forma óptima la baja densidad de tráfico. - La información de ubicación del paquete no se puede actualizar a tiempo. - No está diseñado para ambientes urbanos.
<p>Geographic Source Routing (GSR) [4], [66], [79], [80].</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptativo. - Basado en mapas. - None DTN. - Beacon. - Overlay. - Salto a salto. - Entorno Urbano. 	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliza los mismos modos de transmisión que GPSR. - Envía de forma periódica mensajes HELLO con el fin de calcular la cantidad de intersecciones que hay hasta el destino, este valor se guarda en la cabecera del paquete. - Utiliza los mapas estáticos de las calles para el descubrimiento de rutas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Descubrimiento de nodos vecinos. - Enrutamiento Codicioso. - Enrutamiento de perímetro. - Inundación de la red con mensajes de actualización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mejor relación de entrega de paquetes y más escalable que AODV y DSR. 	<ul style="list-style-type: none"> - No garantiza conectividad en una red dispersa. - Alto overhead. - Bucles de enrutamiento.

Tabla 2.2. Protocolos de Enrutamiento Basados en Localización (a). Por los Autores.

Protocolo	Características Técnicas	Funcionamiento	Procesos	Ventajas	Desventajas
Anchor Based Street and Traffic Aware Routing (A-STAR) [4], [55], [57], [74]-[79].	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptativo. - Consciente de tráfico. - <i>None DTN</i>. - <i>Beacon</i>. - <i>Overlay</i>. - Salto a salto. - Entorno Urbano. 	<ul style="list-style-type: none"> - Las condiciones de tráfico se usan para determinar los puntos de anclaje. - Si falla el enlace, se busca un nodo adecuado para reenviar los paquetes o se utiliza la estrategia de recuperación local. - Utiliza mapas estáticos y dinámicos. - Los nodos determinan el mejor camino dependiendo del número de líneas de autobús presentes en la vía. 	<ul style="list-style-type: none"> - Descubrimiento de nodos vecinos. - Elección de nodos de anclaje. 	<ul style="list-style-type: none"> - Evita ciclos infinitos de reenvío. - Garantiza alta conectividad en la entrega de paquetes. 	<ul style="list-style-type: none"> - La entrega de paquetes es inferior a la de GSR y GPSR. - El retardo extremo a extremo es superior a GSR pero menor a GPSR.
Greedy Perimeter Coordinator Routing (GPCR) [4], [66], [73]-[79].	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptativo. - Basado en posición. - <i>None DTN</i>. - <i>Beacon</i>. - <i>Overlay</i>. - Salto a salto. - Entorno Urbano. 	<ul style="list-style-type: none"> - Maneja los dos modos de transmisión de GPSR. - Utiliza nodos en los cruces denominados coordinadores, que difunden su posición periódicamente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Descubrimiento de nodos vecinos. - Enrutamiento Codicioso. - Enrutamiento de perímetro. - Elección de nodos coordinadores. - Inundación de la red. 	<ul style="list-style-type: none"> - No necesita mapas estáticos. - Reduce el retardo extremo a extremo. 	<ul style="list-style-type: none"> - No maneja de forma óptima la baja densidad de tráfico. - Depende de los nodos coordinadores para su funcionamiento.
Spatial and Traffic Aware Routing (STAR) [76]-[79]	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptativo. - Basado en mapas. - <i>None DTN</i>. - <i>Beacon</i>. - <i>Overlay</i>. - Salto a salto. - Entorno Urbano y rural. 	<ul style="list-style-type: none"> - El monitoreo está basado en dos condiciones: <ol style="list-style-type: none"> 1. Densidad de tráfico en las calles (baja o alta). 2. Mensajes <i>Beacon</i> - Cuando el tráfico es escaso o denso durante un tiempo considerable, se registra en la tabla de cada nodo; el mensaje <i>Beacon</i> se envía periódicamente incluyendo la identificación, posición e información de tráfico. - El protocolo calcula las rutas bajo demanda utilizando la información de tráfico. 	<ul style="list-style-type: none"> - Descubrimiento de nodos vecinos. - Monitoreo de las condiciones de la vía. - Inundación de la red con mensajes de actualización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Ajusta el camino dinámicamente para proporcionar caminos adicionales a la ruta. - Tiene en cuenta el estado del tráfico en tiempo real. - Noción del movimiento del destino. 	<ul style="list-style-type: none"> - No maneja de forma óptima la baja densidad de tráfico.

Tabla 2.2. Protocolos de Enrutamiento Basados en Localización (b). Por los Autores.

Protocolo	Características Técnicas	Funcionamiento	Procesos	Ventajas	Desventajas
Hybrid Traffic Aware Routing (HTAR) [66], [77]-[80].	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptativo. - Basado en mapas. - <i>None DTN</i>. - <i>Beacon</i>. - <i>Overlay</i>. - Entorno Urbano y rural. 	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliza el cálculo del camino más corto. - Envía periódicamente mensajes <i>HELLO</i>. - Tiene dos tipos de nodos <ol style="list-style-type: none"> 1. Nodos en el camino: desplegados en las vías. 2. Nodos de unión: ubicados en las intersecciones. - Cuando recibe un paquete verifica que sean el destino, si no lo es, busca una ruta y guarda el paquete por un tiempo moderado, a diferencia de los nodos de camino, estos no pueden guardar por mucho tiempo el paquete en su memoria. 	<ul style="list-style-type: none"> - Descubrimiento de nodos vecinos. - Definición de nodos de camino y unión. - Inundación de la red con mensajes de actualización. 	<ul style="list-style-type: none"> - No necesita mapas estáticos. - Tiene en cuenta el estado del tráfico en tiempo real. - Reduce el retardo extremo a extremo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Depende de los nodos de unión para su correcto funcionamiento.
Greedy Traffic Aware Routing (GyTAR) [4], [74], [78], [80].	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptativo. - Consciente de tráfico. - <i>None DTN</i>. - <i>Beacon</i>. - <i>Overlay</i>. - Entorno Urbano y rural. 	<p>Este protocolo utiliza dos modos de transmisión.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Intersección o selección de cruce: una vez que se ha definido la posición del nodo destino se elige el cruce a través del cual un paquete debe pasar para alcanzar su destino. - Modo Codicioso mejorado: cuando se determina el cruce, el método codicioso mejorado reenvía paquetes entre las dos uniones. 	<ul style="list-style-type: none"> - Descubrimiento de nodos vecinos. - Definición de intersección o selección de cruce. - Enrutamiento codicioso mejorado. - Inundación de la red con mensajes de actualización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliza mapas estáticos y dinámicos de la ciudad. - Menor Overhead. - Menor retardo extremo a extremo con baja pérdida de paquetes. - Considera carreteras multidireccionales, densidad de tráfico, dirección y velocidad del vehículo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Depende de las RSU desplegadas en carretera.

Tabla 2.2. Protocolos de Enrutamiento Basados en Localización (c). Por los Autores.

Protocolo	Características Técnicas	Funcionamiento	Procesos	Ventajas	Desventajas
<p>Connectivity Aware Routing (CAR) [4], [57], [73], [80].</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptativo. - Consciente de tráfico. - <i>None DTN</i>. - <i>Beacon</i>. - <i>Overlay</i>. - Entorno Urbano y rural. 	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliza el protocolo AODV para el descubrimiento de ruta y el algoritmo de Grupo de Difusión Preferido (PGB, <i>Preferred Group Broadcast</i>) para la difusión de datos. -El destino se selecciona observando que ruta ofrece mejor conectividad y retardos inferiores utilizando la información que dan los nodos de guardia². Existen dos tipos de guardia: <ol style="list-style-type: none"> 1. Guardia permanente: está ligado a coordenadas específicas. 2. Guardia viajero: tiene coordenadas iniciales, tiempo inicial y un vector velocidad. - Después de la configuración de la ruta, los paquetes se transmiten de manera codiciosa utilizando AGF (<i>Advanced Greedy Forwarding</i>, Desvío Avanzado Codicioso). - Este protocolo en lugar de elegir siempre el vecino más lejano en la dirección del destino, elige el vecino más lejano en la dirección del siguiente punto de anclaje. - Cada nodo transmite periódicamente mensajes HELLO y un vector velocidad (dirección de movimiento y velocidad). 	<ul style="list-style-type: none"> - Descubrimiento de nodos vecinos. - Definición de intersección o selección de cruce. - Enrutamiento codicioso mejorado. - Inundación de la red con mensajes de actualización. 	<ul style="list-style-type: none"> - No requiere mapas digitales. - Tiene una mayor entrega de paquetes que GPSR. - Consciente de tráfico durante el descubrimiento de ruta. -Se adapta bien en bajas densidades. - Tiene la capacidad de no solo localizar el destino si no también encontrar múltiples caminos entre la fuente y varios destinos. - En el cálculo de nuevas rutas no necesita un nuevo proceso de descubrimiento de ruta. 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta pérdida de paquetes cuando tiene diferentes destinos. - Alto tiempo de transmisión con diferentes fuentes y varios destinos.

Tabla 2.2. Protocolos de Enrutamiento Basados en Localización (d). Por los Autores.

² Guardia: es un tipo de mensaje, marca geográfica o entidad que tiene un ID y un tiempo de vida que contiene la información de los nodos de la zona.

Aunque existen más de treinta protocolos de enrutamiento para VANET, en este proyecto se optó por caracterizar los más relevantes, debido a que los demás mecanismos combinan características y enfoques de los protocolos ya descritos. Los aspectos más importantes de los protocolos analizados se sintetizan en la tabla 2.3.

De todos los protocolos de enrutamiento descritos, se eligió analizar el impacto que los protocolos AODV y DSR tienen sobre una comunicación de datos en una red vehicular. La elección se realizó entre otros, debido a que estos dos mecanismos son los más relevantes dentro de la literatura y generalmente son tomados como referencia para comparar y evaluar nuevas propuestas de enrutamiento. A pesar de que los protocolos de enrutamiento basados en localización son los más recientes, se encuentran aún en investigación y no cuentan con estándares ni documentación que especifique adecuadamente los procesos que se llevan a cabo, por lo que no se puede realizar un análisis profundo de su modo de operación.

		Característica Protocolo	Estrategia de Reenvío	Estrategia de Recuperación	Mapas Digitales	Mecanismo de enrutamiento	Inundación	Overhead de Enrutamiento
BASADOS EN TOPOLOGÍA	Proactivos	DSDV	Multi saltos	Multi saltos	No	Unicast	Si	Estado de enlace
		OLSR	Multi saltos	Multi saltos	No	Unicast	Moderada	Estado de enlace
		FSR	Multi saltos	Multi saltos	No	Unicast	Moderada	Estado de enlace
	Reactivos	AODV	Multi saltos	Almacenamiento y retransmisión	No	Unicast	Moderada	Estado de la Ruta
		AOMDV	Multi saltos	Almacenamiento y retransmisión	No	Multicast	Moderada	Estado de la Ruta
		DSR	Multi saltos	Almacenamiento y retransmisión	No	Unicast	Si	Estado de la Ruta
		TORA	Multi saltos	Almacenamiento y retransmisión	No	Unicast	No	Estado de la Ruta
	Híbridos	ZRP	Multi saltos	Multi saltos	No	Unicast	Si	Estado de la Ruta
		ADV	Multi saltos	Multi saltos	No	Unicast	No	Estado de la Ruta
BASADOS EN LOCALIZACIÓN	Posición	GPSR	Reenvío codicioso	Almacenamiento y retransmisión	Si	Unicast	Moderada	Beacons
		GPCR	Reenvío codicioso	Regla de la mano derecha	Si	Unicast	Moderada	Beacons
	Mapas	GSR	Reenvío codicioso	Regla de la mano derecha	Si	Unicast	Moderada	Beacons
		STAR	Reenvío codicioso	Almacenamiento y retransmisión	Si	Unicast	Moderada	Beacons
		HTAR	Reenvío codicioso	Almacenamiento y retransmisión	Si	Unicast	Moderada	Beacons
	Tráfico	A-STAR	Reenvío codicioso	Anclaje en la vía Almacenamiento y retransmisión	Si	Unicast	Moderada	Beacons
		GyTAR	Reenvío codicioso. Almacenamiento y retransmisión	Almacenamiento y retransmisión	Si	Unicast	Moderada	Estado de la Ruta Beacons
		CAR	Reenvío codicioso Almacenamiento y retransmisión	Anclaje en la vía Almacenamiento y retransmisión	Si	Unicast	Moderada	Estado de la Ruta Beacons

Tabla 2.3. Resumen de las características de los protocolos de Enrutamiento para VANET. Por los Autores.

2.4. PARÁMETROS DE DESEMPEÑO

Como se indicó en la sección 1.6, uno de los mayores desafíos en el despliegue de redes vehiculares es contar con protocolos de enrutamiento capaces de encontrar rutas estables, para suplir los requerimientos de calidad de servicio relacionados con confiabilidad, baja latencia, *throughput*, entrega exitosa de paquetes, entre otros.

Los parámetros que deben considerarse para evaluar el desempeño de una red VANET están relacionados con el tipo de mensaje que se está transmitiendo y su prioridad. Por ejemplo, en aplicaciones de gestión y entretenimiento la latencia debe ser menor a 500 ms y en las de seguridad inferior a 100 ms [8], [82].

En la Figura 2.2 se identifican los parámetros asociados al protocolo de enrutamiento y a la red, que pueden afectar el desempeño de una VANET durante la comunicación de datos.

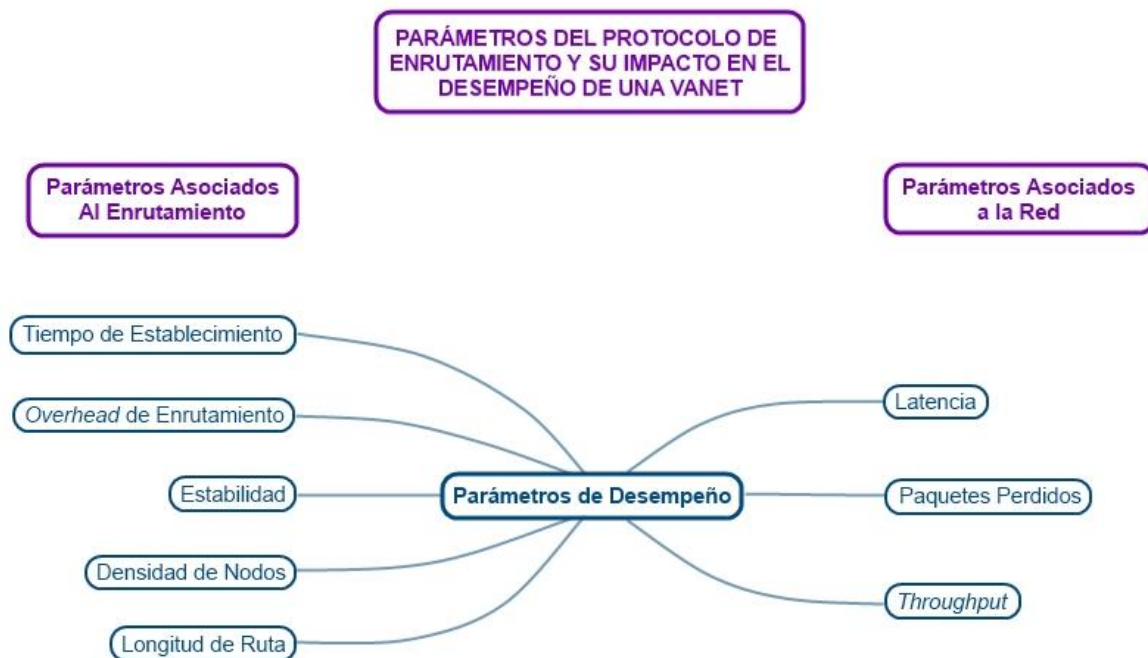


Figura 2.2. Parámetros del Protocolo de Enrutamiento asociados al desempeño en una red VANET. Por los autores.

✓ Asociados a la Red

- **Latencia:** es la sumatoria de todos los retardos temporales presentes dentro de la red. Este parámetro corresponde al tiempo que se tarda en enviar y recibir un paquete *unicast* desde la fuente al destino.

La latencia está conformada principalmente por cuatro retardos:

- **Retardo Transmisión:** tiempo que transcurre entre la transmisión del primer bit y del último bit de un paquete. Depende de su tamaño y de la tasa de datos del enlace.
- **Retardo de Procesamiento:** corresponde al tiempo transcurrido desde que se realiza el procesamiento de la cabecera de un paquete, hasta que se asigna a una cola en la interfaz de salida.
- **Retardo de Propagación:** tiempo en que la señal de datos atraviesa el enlace desde el transmisor hasta el receptor.
- **Retardo de Encolamiento:** corresponde al tiempo en que un paquete permanece almacenado en la cola antes de que sea entregado a su destino.

En las redes vehiculares, es importante que la latencia sea la más baja posible, especialmente si se ejecutan aplicaciones de seguridad que requieran comunicación en tiempo real.

- **Paquetes perdidos:** es una variable crítica para todas las aplicaciones; un valor alto de este parámetro indica una degradación en la calidad de la comunicación, obligando en algunos casos a realizar retransmisiones, aumentando la latencia en recepción y reduciendo el ancho de banda disponible.
Las principales causas de pérdida de paquetes son las fallas de enlace, cambios en la topología y desbordamiento de las colas.
- **Throughput:** cantidad efectiva de datos que cursan por un punto o interfaz en un momento determinado.

✓ Asociados al Enrutamiento

- **Tiempo de establecimiento de la conexión:** tiempo que se tarda en descubrir y establecer una conexión hacia el destino. Este parámetro se ve afectado por la longitud de la ruta y la densidad de nodos; y está relacionado con la latencia inicial introducida por el protocolo de enrutamiento.
- **Overhead de Enrutamiento:** número total de paquetes de control requeridos por el protocolo de enrutamiento para descubrir, establecer y mantener sus rutas. Este parámetro influye sobre la convergencia de la red y el *throughput*.
- **Estabilidad:** se encuentra definida por la probabilidad de que un enlace persista por un cierto período de tiempo. La estabilidad del enlace entre dos nodos, depende principalmente de la distancia entre ellos. Este parámetro influye sobre la latencia y la pérdida de paquetes en la red.

- **Densidad de Nodos:** se refiere al número total de nodos que hacen parte de la red. Este parámetro se relaciona con la conectividad de la red, la estabilidad y el tiempo de vida de los enlaces. Influye sobre la latencia y la pérdida de paquetes.
- **Longitud de Ruta:** está definida por el número de saltos o nodos a través de los cuales el origen puede alcanzar el destino. Este parámetro se relaciona con el retardo extremo a extremo que experimentan los paquetes enviados.

Los parámetros descritos pueden afectar el desempeño de la comunicación de datos en una VANET. Por lo tanto, es importante analizarlos durante la evaluación del funcionamiento de la red.

En este capítulo se presentaron los conceptos básicos que permiten comprender la función de enrutamiento en las redes vehiculares, junto con los protocolos de enrutamiento más utilizado en VANET y los parámetros que podrían afectar su desempeño en un momento dado.

En el capítulo 3 se realiza una descripción de los protocolos de enrutamiento AODV y DSR, concluyendo así la base teórica necesaria para proceder con el desarrollo e implementación de los escenarios de simulación.

3. ANÁLISIS DE LOS PROTOCOLOS AODV Y DSR

3.1. INTRODUCCIÓN

Los protocolos de enrutamiento juegan un papel fundamental cuando dos nodos desean establecer una comunicación, más aún cuando estos no se encuentran cerca o están bastante separados y no se pueden conectar de forma directa; son responsables de retransmitir los paquetes de datos hacia el destino y también se encargan de ajustar las rutas en caso de presentar fallas o cambios de topología. En el entorno de las redes móviles ad hoc, todos los nodos se comportan como enrutadores y participan en el descubrimiento y mantenimiento de rutas, situación que se vuelve más compleja conforme el tamaño de la red se incrementa.

En este contexto, surgen diversos protocolos de enrutamiento para las redes móviles ad hoc en términos de desempeño y confiabilidad. Entre los protocolos de enrutamiento más importantes se encuentran AODV (*Ad hoc On-demand Distance Vector*) y DSR (*Dynamic Source Routing*), los cuales se adaptaron a la naturaleza de las redes vehiculares, donde son ampliamente utilizados.

AODV y DSR son los dos protocolos de enrutamiento para redes vehiculares más estudiados e implementados, en relación con los protocolos descritos en el capítulo II, que son de tipo experimental y de investigación. Para determinar el impacto que tienen sobre una comunicación de datos en una red VANET, en este capítulo se presentan sus características más importantes, se analiza la forma en que operan, sus ventajas y principales falencias.

3.2. AD HOC ON DEMAND DISTANCE VECTOR (AODV)

Es un protocolo de enrutamiento para Redes Móviles Ad hoc (MANET, *Mobile Ad hoc Network*) presentado en Noviembre de 1997 por C. Perkins, E. Belding-Royer y S. Das. Su fundamentación se encuentra en el RFC (*Request For Comments*) 3561 de categoría experimental, cuya última actualización corresponde a Julio de 2003 [67].

AODV es un protocolo de enrutamiento para redes móviles ad hoc ampliamente utilizado en redes VANETs, debido a su buen desempeño en ambientes de alta movilidad, gran densidad de nodos y diferentes tasas de datos [47], [59], [66].

3.2.1. Características

Las características que definen el protocolo de enrutamiento AODV y lo diferencian de los demás protocolos reactivos [47], [56], [64], [67]-[69] son:

- ✓ Permite a los nodos móviles obtener rápidamente rutas hacia nuevos destinos.
- ✓ No requiere mantenimiento para rutas inactivas.
- ✓ Los nodos móviles responden oportunamente ante rupturas de enlace y cambios de topología.
- ✓ Ante pérdidas de enlace, los nodos invalidan las rutas afectadas.
- ✓ Para seleccionar la información de enrutamiento más reciente utiliza Números de Secuencia de Destino (DSN, *Destination Sequence Number*) en cada entrada de sus tablas.
- ✓ Diseñado para reducir el tráfico de control.
- ✓ Un nodo sólo tiene conocimiento de los nodos con los cuales necesita comunicarse.
- ✓ La información de enrutamiento se descarta si no ha sido actualizada en el periodo de tiempo definido por el algoritmo.
- ✓ En este protocolo, el nodo que inicia el descubrimiento de ruta se denomina Originador.

3.2.2. Operación de AODV

Con base en [47], [56]-[59], [64], [66], [68] y el RFC 3561 [67], se describen los escenarios, situaciones y procesos que se presentan en AODV, en los cuales se generan diversos mensajes de control.

3.2.2.1. Mantenimiento de Números de Secuencia

Cada entrada en la tabla de rutas debe contar con la última información disponible sobre el número de secuencia de su destino. Este número se actualiza cada vez que un nodo recibe nueva información.

Cada nodo de la red debe tener y mantener su número de secuencia para garantizar que todas las rutas hacia él se encuentren libres de bucles.

- ✓ Cuando un nodo origina un descubrimiento de ruta, debe incrementar su número de secuencia inmediatamente, para evitar conflictos con rutas inversas establecidas anteriormente hacia el originador de un mensaje de Solicitud de Ruta (RREQ, *Route Request*).
- ✓ Cuando un nodo destino origina un mensaje de Respuesta de Ruta (RREP, *Route Reply*) en respuesta a un mensaje RREQ, debe actualizar inmediatamente su propio número de secuencia, eligiendo el máximo entre su número actual y el DSN del RREQ.
- ✓ Cuando un nodo detecta que el enlace con el próximo salto hacia un destino se ha perdido o ha expirado, actualiza el DSN e invalida esa ruta.

Un nodo puede cambiar el número de secuencia para un destino en su tabla de enrutamiento, sólo si:

- ✓ Es el destino y ofrece una nueva ruta hacia sí mismo.
- ✓ Recibe un mensaje con nueva información acerca del número de secuencia de un nodo destino.
- ✓ El camino hacia el destino ha expirado o se ha roto.

Una ruta sólo se actualiza si el nuevo número de secuencia es:

- ✓ Mayor que el número de secuencia en la tabla de rutas.
- ✓ Los números de secuencia son iguales pero el contador de saltos (de la información nueva) más uno, es menor que el contador existente en la tabla.
- ✓ Número de secuencia desconocido.

3.2.2.2. Listas de Precursores

Para cada ruta válida que un nodo mantiene en su tabla de rutas, también se mantiene una lista de precursores (nodos vecinos hacia los cuales se generó o reenvió una respuesta de ruta) que pueden enviar paquetes a través de ese camino. Los precursores recibirán notificaciones si dicho nodo detecta pérdida del enlace en el próximo salto.

3.2.2.3. Descubrimiento de Ruta

Un nodo difunde un mensaje RREQ cuando necesita una ruta hacia un destino y no tiene ninguna disponible, ya sea porque el nodo que intenta alcanzar es desconocido o porque la ruta es inválida o expiró.

El DSN del mensaje RREQ es el último conocido para ese destino y se copia desde la tabla de rutas. Si no se conoce, se marca como Número de Secuencia desconocido.

El número de secuencia del nodo origen es el propio y debe incrementarse antes de agregarse al mensaje RREQ.

El mensaje RREQ cuenta con un identificador (RREQ ID) que se incrementa en uno cada vez que se inicia un descubrimiento de ruta y es almacenado temporalmente por el origen para no reprocesar ni reenviar el mensaje si lo recibe a través de algún vecino.

Después de enviar un mensaje de solicitud, el origen espera una respuesta de ruta o cualquier mensaje de control con información actual sobre una ruta apropiada para el destino. Si no se recibe una respuesta dentro del tiempo definido por el parámetro NET_TRAVERSAL_TIME en milisegundos, el nodo puede difundir un nuevo RREQ.

Los paquetes de datos que esperan por una ruta, se almacenan en un búfer. Cuando se ha enviado el número máximo de mensajes de solicitud de ruta sin obtener respuesta, todos los paquetes se descartan y el destino se marca como inalcanzable.

Cuando un nodo recibe un mensaje RREQ, comprueba si ha recibido anteriormente una solicitud de ruta del mismo origen y con igual identificador, de ser así descarta el mensaje. Si por el contrario, no lo ha recibido, pueden presentarse tres situaciones:

- ✓ El destino recibe el mensaje de Solicitud de Ruta: responde con un mensaje RREP.
 - Actualiza el tiempo de vida del mensaje de respuesta de ruta, definido por la variable MY_ROUTE_TIMEOUT.
 - Incrementa en 1 su Número de Secuencia si el DSN del RREQ es igual al suyo.
 - Fija en cero el contador de saltos del RREP.
- ✓ Un nodo intermedio con ruta al destino recibe el mensaje RREQ: revisa si el número de secuencia de destino en la solicitud es menor o igual al que tiene en su tabla de rutas. De ser así, responde con un mensaje RREP.
 - El nodo copia en el RREP el DSN que conoce para el destino.
 - Actualiza la entrada de la ruta inversa para el último salto (del que recibió el RREQ) en la lista de precursores, junto con la entrada del nodo origen, agregando el próximo salto hacia el destino y su distancia.
- ✓ Un nodo sin conocimiento sobre el destino recibe el mensaje RREQ: el nodo reenvía la solicitud, con el fin de alcanzar la mayor cantidad de nodos posibles hasta encontrar el destino.
 - Incrementa en uno el contador de saltos.
 - Almacena temporalmente la información del mensaje de solicitud de ruta, para descartarla si la recibe nuevamente.

Cuando un nodo recibe un mensaje RREP actualiza su tabla de rutas si:

- ✓ El DSN de su tabla está marcado como ruta inválida.
- ✓ El DSN en el RREP es mayor que el DSN en la tabla.
- ✓ Ambos DSN son iguales, pero la ruta estaba marcada como inactiva.
- ✓ DSN iguales pero el nuevo contador de saltos es menor al almacenado en la tabla.

Si se crea o actualiza la entrada para el nodo destino:

- ✓ La ruta se marca como activa.
- ✓ El DSN se marca como válido.
- ✓ El próximo salto en la tabla es el nodo del que se recibe el mensaje RREP.
- ✓ El contador de saltos se fija al valor del nuevo contador.
- ✓ El tiempo de expiración es el tiempo actual más el tiempo de vida del mensaje RREP.
- ✓ El DSN en la tabla es el mismo que viene en el mensaje RREP.

En las tablas 3.1 y 3.2 se describen los campos correspondientes a los mensajes RREQ y RREP, respectivamente.

Campo	Descripción
Tipo	Indica el tipo de mensaje: Solicitud de Ruta
Opciones	Permiten modificar el comportamiento de la petición. - J y R: Opciones para <i>multicast</i> . - G: RREP Gratuito. Si un nodo intermedio responde a la petición, enviará otro RREP al nodo destino de la petición para que sea notificado. - D: Sólo destino. Indica que sólo el destino puede responder a este RREQ. - U: Número de Secuencia desconocido. Se activa cuando no se ha recibido información del destino y por lo tanto no se puede enviar su número de secuencia.
Contador de saltos	Número de saltos desde el Origen hasta el nodo que está manejando la petición.
RREQ ID	Número de secuencia que junto a la IP de origen, identifican la petición de manera única.
Dirección IP del Destino	Dirección IP del nodo para el que se requiere la ruta.
Número de Secuencia de Destino	Último número de secuencia del destino recibido por el origen.
Dirección IP del Originador	Dirección IP del nodo que origina el RREQ.

Tabla 3.1. Campos del mensaje de Solicitud de Ruta (RREQ). Basado en [67].

Campo	Descripción
Tipo	Indica el tipo de mensaje: Respuesta de Ruta.
Opciones	Permiten modificar el comportamiento del mensaje. - R: Reparación. Para <i>multicast</i> . - A: Cuando se requiere un ACK.
Tamaño prefijo	Especifica que el siguiente salto se puede usar por cualquier nodo con el mismo prefijo de enrutamiento que el destino solicitado.
Contador de saltos	Número saltos desde el Originador hasta el Destino.
Dirección IP de Destino	IP del nodo para el que se requiere la ruta.
Número de Secuencia de Destino	Número de Secuencia de Destino asociado a la ruta.
Dirección IP de Originador	Dirección IP del nodo que originó el RREQ y a quien va dirigido el RREP.
Tiempo de Vida	Tiempo en milisegundos para que la ruta se considere válida por los nodos que reciben el mensaje.

Tabla 3.2. Campos del mensaje de Respuesta de Ruta (RREP). Basado en [67].

La figura 3.1 ilustra los procesos de descubrimiento de ruta y establecimiento de la comunicación mediante el protocolo de enrutamiento AODV.

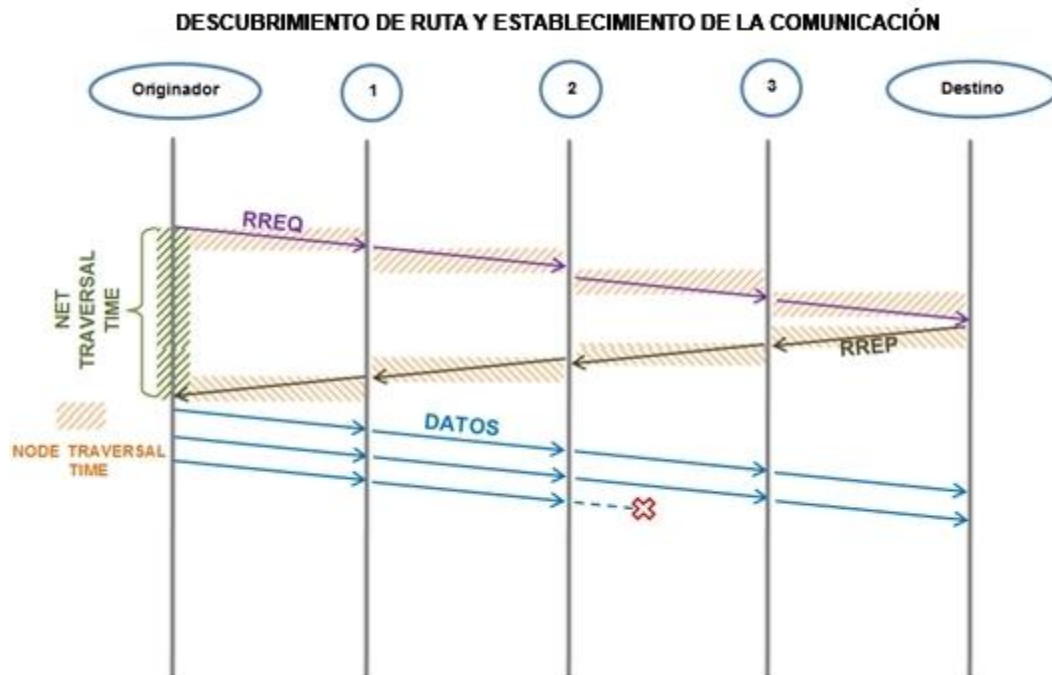


Figura 3.1. Descubrimiento de Ruta y Comunicación. Por los Autores.

3.2.2.4. Mensajes HELLO

Los mensajes HELLO son utilizados para monitorear los enlaces entre los nodos que pertenecen a una ruta activa.

En cada intervalo de tiempo definido por el parámetro HELLO_INTERVAL, el nodo revisa si ha enviado un mensaje *broadcast* (por ejemplo un RREQ) a sus vecinos, de no ser así, debe enviar un RREP con un TTL igual a 1, llamado mensaje HELLO.

Un nodo puede determinar conectividad utilizando los mensajes de sus vecinos. Si ha pasado un tiempo (definido por los parámetros ALLOWED_HELLO_LOSS y HELLO_INTERVAL) y no ha recibido un mensaje HELLO u otro tipo de paquetes de un nodo, asume que el enlace se perdió.

Cuando un nodo recibe un HELLO, se asegura de tener una ruta hacia ese vecino, creándola de ser necesario. Si dicha ruta ya existe, se actualiza su tiempo de vida.

Las rutas creadas usando mensajes HELLO que no son utilizadas por otras rutas activas, tendrán listas de precursores vacías y no ocasionarán RERR (*Route Error*, Error de Ruta) si el vecino se mueve lejos o se agota su tiempo.

3.2.2.5. Reparación Local

Cuando se rompe el enlace de una ruta activa, el nodo contiguo a la falla puede elegir repararlo localmente si el destino se encuentra dentro de un número máximo de saltos determinado por el parámetro MAX_REPAIR_TTL. Para ello, incrementa el DSN y difunde una solicitud hacia ese destino. Este procedimiento es invisible para el nodo origen.

La reparación local se realiza únicamente para el destino hacia el cual iban los datos, por lo tanto se deben invalidar las otras rutas que utilizan el mismo enlace.

En la figura 3.2 se presenta el proceso de reparación local y cómo se utilizan los mensajes HELLO.

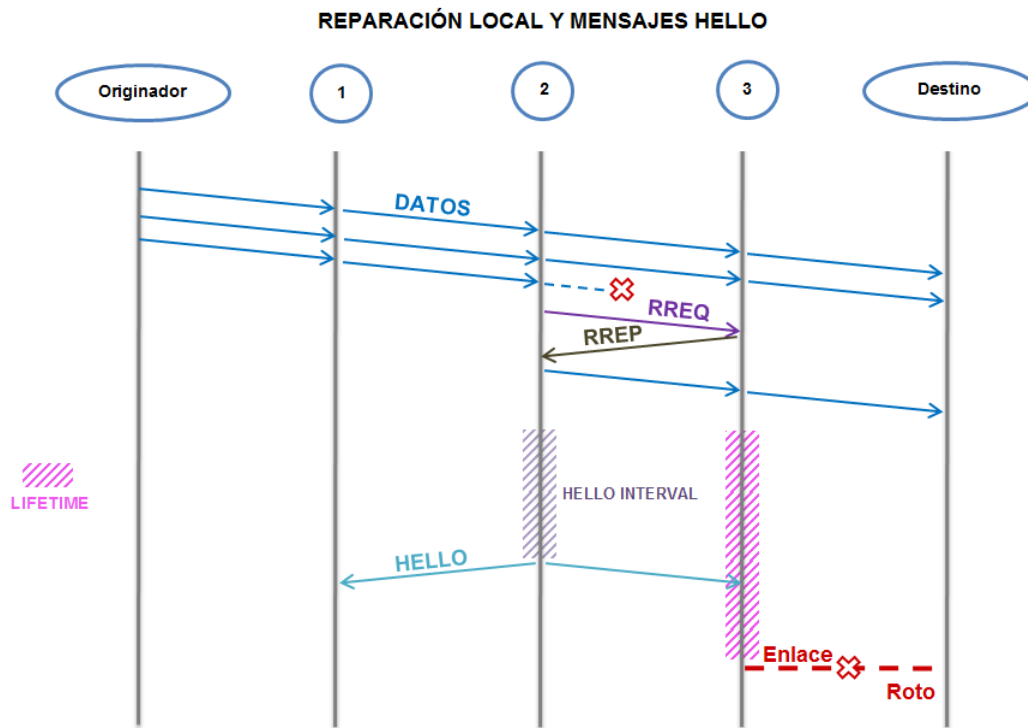


Figura 3.2. Reparación Local y Mensajes HELLO. Por los Autores.

3.2.2.6. Mantenimiento de Conectividad Local

Cada nodo debe hacer seguimiento de conectividad con sus próximos saltos activos, es decir con aquellos que ha intercambiado mensajes durante el tiempo de vida de la ruta activa.

3.2.2.7. Mantenimiento de Ruta.

Los nodos deben realizar mantenimiento de rutas, en caso de que algún enlace se pierda. El procesamiento de un error de ruta o ruptura de enlace requiere los siguientes pasos:

- ✓ Invalidar rutas existentes.
- ✓ Escuchar destinos afectados.
- ✓ Determinar vecinos afectados.
- ✓ Entregar un mensaje RERR (*Route Error*, Error de Ruta) a los vecinos afectados.

El proceso para generar mensajes de error de ruta se inicia cuando:

- ✓ Se detecta un enlace roto hacia el siguiente salto en una ruta activa durante la transmisión de datos.
- ✓ Se obtiene un paquete de datos para un nodo que no tiene ruta activa.
- ✓ Se recibe un RERR de un vecino, invalidando una o más rutas activas.

Los nodos que deberían recibir el RERR son todos aquellos que pertenecen a la lista de precursores de al menos uno de los destinos inalcanzables. En la Tabla 3.3 se presentan los campos correspondientes a los mensajes de Error de Ruta, mientras que la figura 3.3 ilustra el proceso de mantenimiento de ruta realizado por los nodos en AODV.

Campo	Descripción
Tipo	Utilizado para identificar el tipo de mensaje: Error de Ruta son tipo.
Opciones	Permiten modificar el comportamiento del mensaje. - N: No Borrar. Se configura cuando un nodo ha realizado una reparación local de un enlace y avisa a los demás nodos que no deberían borrar la ruta.
Contador de Destinos	Número de destinos inalcanzables incluidos en el mensaje. Debe ser al menos 1.
Dirección IP del Destino Inalcanzable	Dirección IP del destino que se ha vuelto inalcanzable por un enlace roto.
Número de Secuencia del Destino Inalcanzable	Último número de secuencia en la tabla de rutas para dicho destino.

Tabla 3.3. Campos correspondientes al Mensaje de Error de Ruta (REER). Basado en [67].

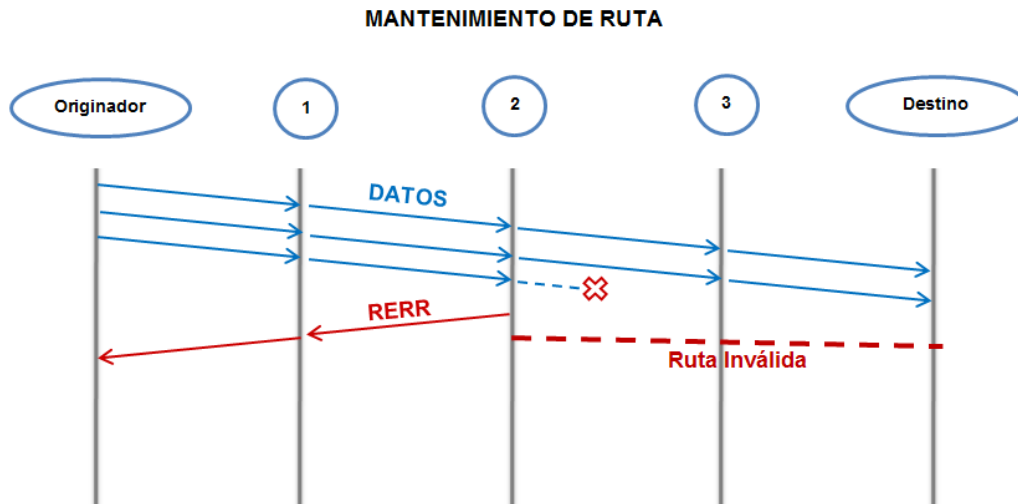


Figura 3.3. Mantenimiento de Ruta. Por los Autores.

3.2.2.8. Parámetros de Configuración

La tabla 3.1 presenta los parámetros de configuración más importantes del protocolo de enrutamiento AODV.

Parámetro	Descripción	Valor
ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT	Tiempo de vida de una entrada en una tabla de rutas.	3000 ms → 3 s
ALLOWED_HELLO_LOSS	Número de mensajes HELLO perdidos que se permiten antes de invalidar el enlace.	2
DELETE_PERIOD	Tiempo máximo que transcurre antes de que se borre una ruta hacia un destino inalcanzable	Max {ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT, HELLO_INTERVAL}
HELLO_INTERVAL	Frecuencia con que se envían mensajes HELLO.	1000 ms → 1 s
MAX_REPAIR_TTL	Distancia máxima a la que puede estar el destino para que un nodo pueda reparar localmente una falla.	0.3 * NET_TRAVERSAL_TIME
MY_ROUTE_TIMEOUT	Tiempo de espera configurado por el destino, asignado en el RREP.	2 * ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT
NET_DIAMETER	Número de saltos entre Origen y Destino.	35
NET_TRAVERSAL_TIME	Tiempo que tarda un paquete en atravesar la red.	2*NODE_TRAVERSAL_TIME*NET_DIAMETER
NODE_TRAVERSAL_TIME	Tiempo promedio que tardan los paquetes en atravesar un salto, incluye retardos de encolamiento, tiempo de transferencia y tiempos de interrupción de procesamiento.	40 ms
PATH_DISCOVERY_TIME	Tiempo máximo que un nodo origen espera un RREP y almacena el RREQ ID.	2 * NET_TRAVERSAL_TIME
RERR_RATELIMIT	Máxima cantidad de mensajes de error enviados por segundo.	10
RREQ_RETRIES	Máxima cantidad de RREQ que se pueden enviar para descubrir una ruta.	2
RREQ_RATELIMIT	Máxima cantidad de mensajes RREQ enviados por segundo.	10
TIMEOUT_BUFFER	Tiempo de espera máximo de los RREP en el búfer.	2 s.

Tabla 3.4. Parámetros de Configuración por defecto de AODV. Basado en [67].

Como se aprecia en la tabla 3.4, los parámetros que mayor impacto pueden tener sobre la red son **ACTIVE_ROUTE_TIMEOUT** y **NET_TRAVERSAL_TIME**, relacionados con el tiempo de vida de la ruta activa y el tiempo requerido por los paquetes para alcanzar el destino, debido a su influencia sobre los procesos de descubrimiento y mantenimiento de ruta.

El protocolo AODV a pesar de tener un enfoque reactivo, se caracteriza principalmente por utilizar mensajes HELLO para monitorear el estado de los enlaces pertenecientes a una ruta activa, manteniendo así la conectividad entre los nodos implicados en la comunicación y reduciendo la sobrecarga de la red ocasionada por actualizaciones periódicas innecesarias.

3.3. DYNAMIC SOURCE ROUTING (DSR)

El protocolo de enrutamiento DSR fue diseñado para redes móviles ad hoc. Propuesto por D. Johnson en febrero de 1994, su fundamentación se encuentra consignada en el RFC 4728 de categoría experimental y cuya última actualización es de 2007 [70].

DSR permite que una red sea completamente auto organizada, sin necesidad de infraestructura permanente, razón por la cual ha sido implementado en redes VANET [41], [46].

3.3.1. Características

Las características más importantes que definen el protocolo de enrutamiento DSR [4], [68]-[70] son:

- ✓ Permite múltiples rutas a cualquier destino proporcionando balance de carga y mayor robustez.
- ✓ Cada remitente puede seleccionar y controlar las rutas que siguen sus paquetes.
- ✓ Utiliza enrutamiento de Fuente.
- ✓ Detecta rápidamente cambios en la topología de red, adaptando las rutas oportunamente.
- ✓ Introduce latencia inicial en comunicaciones con nodos que no han sido descubiertos.
- ✓ Evita bucles de enrutamiento.
- ✓ No es escalable, debido a que a partir de un número de nodos las cabeceras crecen demasiado y deja de funcionar correctamente.
- ✓ Reduce la carga de red debida al tráfico de control y actualización de rutas ya que no requiere inundaciones periódicas de actualización.
- ✓ En este protocolo, el nodo que inicia el descubrimiento de ruta se denomina Iniciador.

3.3.2. Operación de DSR

Con base en [4], [41], [46], [68] y el RFC 4827 [70], se describen los escenarios, situaciones y procesos que se presentan en DSR, en los cuales se generan mensajes de solicitud, respuesta y error de ruta.

3.3.2.1. Descubrimiento de Ruta

Cuando un nodo fuente desea transmitir un paquete, envía un mensaje *broadcast* de solicitud de ruta (RREQ), el cual es recibido por todos los nodos que se encuentran dentro de su rango de transmisión.

El iniciador busca en su tabla de rutas el trayecto hacia un nodo; cuando lo encuentra crea un nuevo mensaje, cuya cabecera contiene los saltos que debe seguir hasta llegar al destino.

Cuando se inicia un descubrimiento de ruta, el iniciador guarda una copia del mensaje original en un buffer llamado buffer de envío o “*send buffer*”, donde se almacena cada paquete que no puede ser transmitido, por no disponer de una ruta hacia el destino.

Cuando un nodo recibe un mensaje de solicitud de ruta:

- ✓ Comprueba si es el destino ó ha recibido recientemente otro RREQ del mismo origen, con igual destino e identificador, de ser así, lo descarta.
- ✓ Si no encuentra ninguna ruta, añade su dirección en el mensaje y lo reenvía de forma *broadcast*.
- ✓ Si es el destino, contesta la solicitud, enviando un mensaje de respuesta de ruta (RREP) hacia el origen.
- ✓ El mensaje de respuesta de ruta se transmite de forma *unicast*, siguiendo la ruta indicada en la cabecera del paquete hasta llegar al origen.

Cuando el origen recibe un mensaje RREP, almacena la ruta para incluirla en la cabecera de cada paquete que envíe. Así, todos los nodos que reciben la información conocen su próximo salto.

Un nodo puede contestar con un mensaje de respuesta de ruta si:

- ✓ Es el destino: envía un RREP con una copia de las direcciones acumuladas en el mensaje de solicitud de ruta.
- ✓ Es un nodo intermedio que conoce una ruta hacia el destino: responde con la nueva ruta hacia el destino.

Con el fin de evitar fluctuaciones y reducir sobrecarga en los enlaces debido al gran número de solicitudes de ruta, después del primer descubrimiento, el origen debe duplicar el tiempo de espera entre cada nueva solicitud.

Las tablas 3.5 y 3.6 describen los campos correspondientes a los mensajes RREQ y RREP, respectivamente.

Campo	Descripción
Tipo	Identifica el tipo de mensaje: RREQ.
Tamaño	Tamaño del mensaje.
Identificador	Valor incremental generado por el nodo fuente para identificar el tipo de petición.
IP destino	La dirección destino de la petición.
Lista de IPs de ruta	Cada vez que se reenvía la petición el nodo se agrega al final de la lista e incrementa el tamaño en 4.
Dirección Origen	IP del nodo que origina el mensaje.
Dirección Destino	IP del nodo destino.
TTL	Tiempo de vida del mensaje.

Tabla 3.5. Campos del mensaje de Solicitud de Ruta (RREQ). Basado en [70].

Campo	Descripción
Tipo	Identifica el tipo de mensaje: RREP.
Tamaño	Tamaño del mensaje.
Identificador	Valor incremental generado por el nodo fuente para identificar el tipo de petición.
Lista de IPs de ruta	Cada vez que se reenvía la petición el nodo se agrega al final de la lista e incrementa el tamaño en 4.

Tabla 3.6. Campos del mensaje de Respuesta de Ruta (RREP). Basado en [70].

La figura 3.4 ilustra los procesos de descubrimiento de ruta y establecimiento de la comunicación mediante el protocolo de enrutamiento DSR.

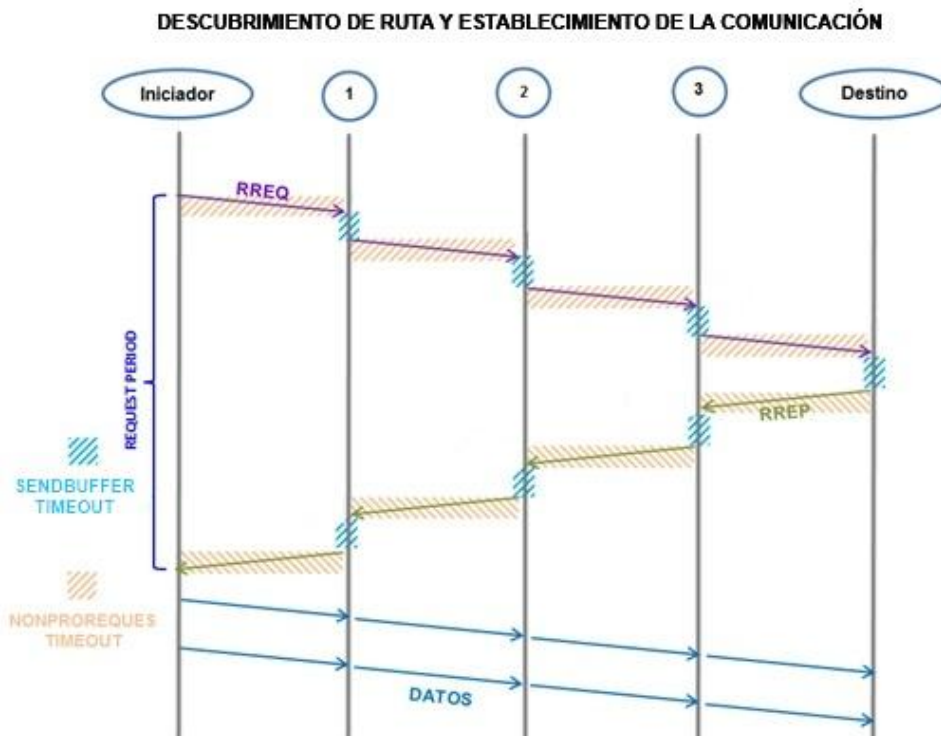


Figura 3.4. Descubrimiento de Ruta y Comunicación del protocolo DSR. Por los Autores.

3.3.2.2. Mantenimiento de Ruta

Cuando un nodo recibe un mensaje de Error de Ruta (RERR, *Route Error*) comprueba si tiene alguna ruta que contenga el salto que se ha perdido o si es el destino de ese mensaje, si no lo es, reenvía el mensaje de error.

Cuando el mensaje de error llega al origen, se eliminan todos los enlaces invalidados y empieza un proceso de salvamento del mensaje, para buscar otras rutas para transmitir la información que no se ha podido enviar. En caso de que no tenga almacenado otro camino, inicia un nuevo descubrimiento de ruta, enviando junto con la petición de ruta, el mensaje de error recibido para informar a los demás nodos del enlace roto y así evitar que respondan con una ruta obsoleta.

La Tabla 3.7 describe los campos correspondientes al mensaje de Error de Ruta, mientras que la figura 3.5 ilustra el proceso de mantenimiento de ruta realizado por los nodos en DSR.

Campo	Descripción
Tipo	Tipo de mensaje: RERR.
Tamaño	Tamaño del mensaje.
Tipo de error	Existen 3 tipos de errores. 1. NODE_UNREACHABLE : Cuando un nodo detecta que no puede comunicarse con otro y necesita enviarle información. 2. OPTION_NOT_SUPPORTED : Cuando un nodo recibe alguna opción extra que no tiene implementada, devuelve un RERR con este tipo de error. 3. FLOW_STATE_NOT_SUPPORTED : Existe una funcionalidad adicional de DSR que es conocer el estado de flujo de una ruta. Esto necesita de una cabecera diferente. Cuando los nodos reciben un mensaje de este tipo y no tienen implementada esa opción deben responder con un RERR.
Dirección origen del error	IP del nodo que origina el error de la ruta.
Dirección destino del error	IP del nodo al que el error de ruta debe ser entregado.
Información específica del error	Para la situación en el que el error sea nodo inalcanzable este campo contendrá el nodo con el que se perdió la conexión.
Salvamento	Entero de 4 bits que indica el número de veces que ha sido rescatado ³ el mensaje.

Tabla 3.7. Campos del Mensaje de Error de Ruta (RERR). Basado en [70].

³ Se refiere al proceso mediante el cual un nodo intermedio intenta encontrar un camino alternativo para enviar el mensaje hacia el destino, antes de que el origen deba iniciar un nuevo descubrimiento de ruta.

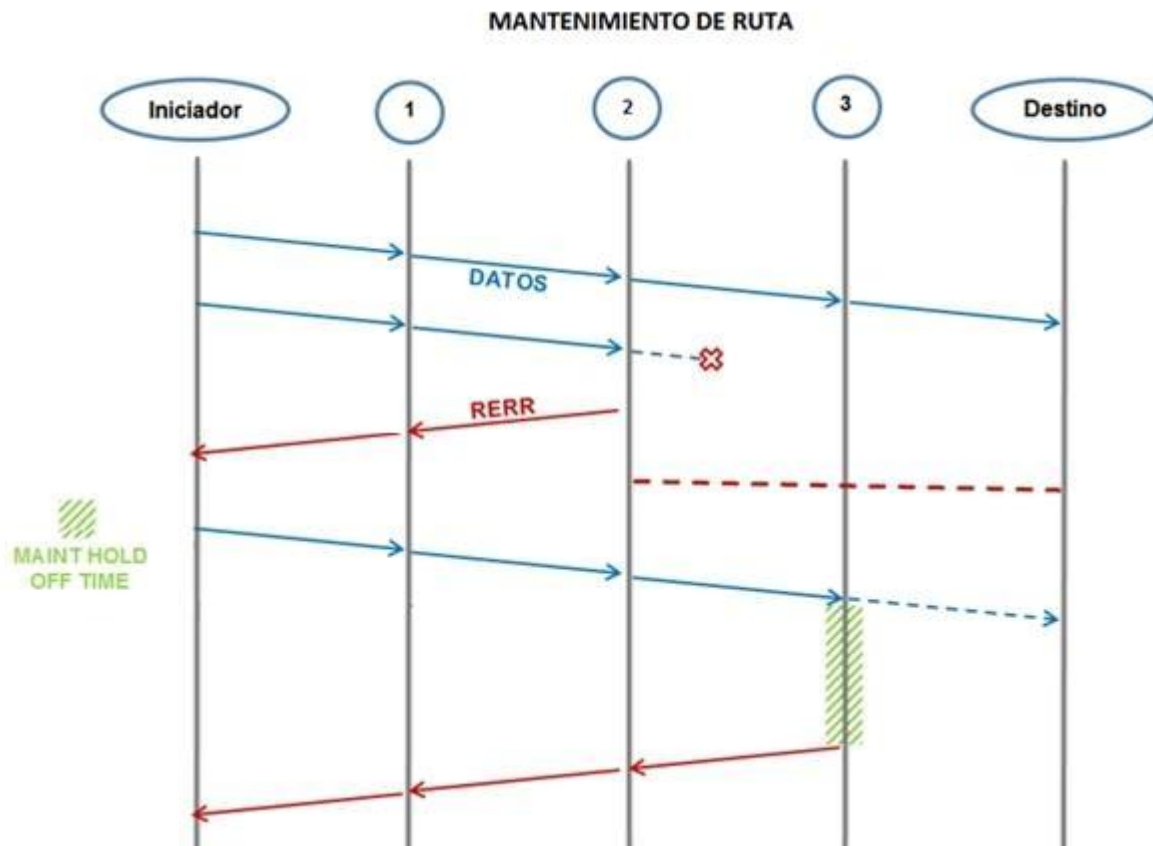


Figura 3.5. Mantenimiento de Ruta. Por los Autores.

3.3.2.3. Parámetros de Configuración

Los valores contenidos en la tabla 3.8 son los parámetros de configuración definidos en el RFC 4827 para el Protocolo DSR.

Parámetro	Descripción	Valor
DiscoveryHopLimit	Límite del número de nodos intermedios que pueden reenviar un mensaje RREQ	255 saltos
RouteCacheTimeout	Tiempo de eficacia de una ruta.	300 segundos
SendBufferTimeout	Tiempo de espera de un paquete en el búfer.	30 segundos
RequestTableSize	Número de entradas que puede contener la tabla de solicitudes recibidas.	64 nodos
RequestTableIds	Número de identificadores de las peticiones de solicitud de ruta más recientes recibidas por el nodo.	16 identificadores
MaxRequestRexmt	Número máximo de veces que se puede retransmitir una solicitud de ruta.	16 retransmisiones
MaxRequestPeriod	Tiempo máximo entre dos retransmisiones consecutivas.	10 segundos
RequestPeriod	Intervalo inicial entre dos Solicitudes de Ruta consecutivas.	500 milisegundos
NonPropRequestTimeout	Tiempo de funcionamiento de acuerdo al algoritmo <i>Non-Propagating Route Request</i> .	30 milisegundos
MaintHoldoffTime	Tiempo en el cual se espera recibir una confirmación sobre la disponibilidad del siguiente salto en la ruta.	250 milisegundos
MaxMaintRexmt	Cantidad máxima de veces que puede retransmitirse un paquete de datos.	2 retransmisiones
MAX_SALVAGE_COUNT	Número máximo de salvamentos de un paquete.	15 salvamentos

Tabla 3.8. Parámetros de Configuración por defecto de DSR. Basado en [70].

Como se aprecia en la tabla 3.8, los valores establecidos por defecto en el RFC de DSR, corresponden a unos tiempos considerablemente altos, que podrían generar un fuerte impacto sobre la convergencia del protocolo de enrutamiento.

Partiendo de lo anterior, DSR es un protocolo bajo demanda que reduce el *overhead* de enrutamiento ocasionado por el tráfico de control, pues no realiza inundaciones periódicas de actualización; debido a que utiliza enrutamiento de fuente (la ruta que deben seguir los paquetes se agrega a la cabecera de los mismos), su correcto funcionamiento se limita únicamente a entornos de baja densidad de nodos.

La tabla 3.9 presenta una síntesis comparativa entre los protocolos AODV y DSR.

	AODV	DSR
Autores	C. Perkins, E. Belding-Royer y S. Das	D. Johnson.
Primera Versión	Noviembre de 1997	Febrero de 1994
Versión Actual	RFC-3561, Julio de 2003	RFC-4728, Febrero de 2007
Métrica	Camino más corto	Camino más corto
Frecuencia de Actualizaciones	Cuando se requiere	Cuando se requiere
Número de Secuencia	Si	No
Bucles de Enrutamiento	No	No
Cabeceras de Enrutamiento	No	Si
Conocimiento de la Topología	Parcial, solo vecinos	Parcial, rutas completas.
Escalable	Si	No
Tráfico de Control	Bajo	Bajo
Rutas	Única Ruta	Múltiples rutas
Tipo de mensajes	RREQ, RREP, RRER, HELLO	RRER, RREP, RREQ
Latencia inicial	Alta	Alta
Cantidad de Mensajes de control para Descubrimiento de Ruta	Alto	Moderado
Overhead de Enrutamiento	Bajo	Alto
Tiempo de Convergencia	Medio	Medio

Tabla 3.9. Síntesis de los protocolos AODV y DSR. Por los Autores.

Aunque aparentemente AODV y DSR por ser protocolos de enrutamiento reactivos tienen muchos parámetros en común, en la tabla 3.9 se evidencian ciertas diferencias entre ellos que definen sus respectivos modos de operación, como por ejemplo la utilización de números de secuencia en AODV, la información sobre la ruta contenida en la cabecera de los paquetes de datos en DSR, entre otras.

En el siguiente capítulo se realiza una descripción general de las distintas herramientas de simulación, además se definen los escenarios de trabajo con el fin de evaluar el impacto del enrutamiento en el desempeño de una comunicación de datos en una red vehicular.

4. CAPÍTULO IV. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe la metodología de simulación utilizada para evaluar el desempeño de la red, con los protocolos de enrutamiento AODV y DSR descritos en el capítulo anterior. Finalmente se presentan los resultados obtenidos, en términos de latencia, pérdida de paquetes y *throughput* promedio, que permiten analizar el efecto del enrutamiento sobre una comunicación de datos en una red VANET.

4.2. SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

Para la realización de este proyecto es necesario seleccionar una herramienta de simulación adecuada para redes vehiculares, que cumpla los siguientes requerimientos:

- ✓ Soporte del estándar IEEE 802.11p.
- ✓ Soporte para varios protocolos de enrutamiento para redes vehiculares.
- ✓ Velocidad variable para los nodos.
- ✓ Facilidad para incorporar áreas de trabajo reales (vías y calles).
- ✓ Soporte de características de movilidad vehicular.
- ✓ Generación de resultados de simulación que permitan realizar análisis.

La implementación de aplicaciones para redes VANET en herramientas software, no sólo requiere la simulación de comunicaciones inalámbricas entre los vehículos, sino que también se debe soportar la movilidad de los mismos; por lo tanto, se necesita un módulo encargado de controlar la comunicación y otro para generar las trazas de movimiento de los nodos.

En la tabla 4.1 se describen los tipos de herramientas de simulación para redes vehiculares.

	Descripción	Simuladores
Generador de Movilidad	Un generador de movilidad en un escenario VANET modela y esquematiza las señales de radiofrecuencia con el fin de brindar posiciones exactas de los nodos simulados. Aspectos como los descritos a continuación influyen en el tráfico de los vehículos: Topología de la carretera, movimientos de automóviles, límites de velocidad por carretera, mapas, cruces, intersecciones, señales de tráfico.	SUMO
Simulador de Red	Estos simuladores permiten probar nuevos protocolos de enrutamiento, así como también caracterizar lo relacionado a los escenarios de comunicación y métodos de acceso.	OMNeT++ NS-3
Simulador Integrado	Los simuladores VANET incluyen un simulador de tráfico y simulador de red con el fin de evitar el proceso de integrar dos herramientas de simulación y así poder evaluar de manera efectiva el rendimiento de los sistemas vehiculares.	TraNS Veins EstiNet 8.1

Tabla 4.1. Descripción de los Tipos de Herramientas de Simulación para Redes Vehiculares. Por los Autores.

Con base en la información presentada en la tabla 4.1, se concluyó que la mejor opción para simular una red vehicular es utilizar herramientas de simulación integradas, entre las que se encuentran:

- ✓ **TraNS (Traffic and Network Simulator Environment):** considerado el primer simulador puro de VANET. TraNS es una herramienta que integra un generador de movilidad (SUMO) y un simulador de red (NS-3) con el fin de implementar simulaciones realistas para VANET, provee una retroalimentación entre el comportamiento del vehículo y el modelo de movilidad. TraNS está desarrollado en Java y en C++ [19], [86]-[87].
- ✓ **Veins (Vehicles in Network Simulation):** simulador de redes vehiculares que unifica el simulador de red OMNeT++ y el generador de movilidad SUMO, permitiendo establecer una comunicación bidireccional, interactiva y realista de manera que la comunicación entre vehículos tiene efectos en la movilidad del tráfico; Veins controla la comunicación con un módulo manager por medio de un *socket* TCP [19], [86]-[87].
- ✓ **EstiNet 8.1:** simulador de tráfico, basado en interfaz gráfica de usuario, compatible con el sistema operativo Fedora. Estinet es un simulador desarrollado en C++ que soporta varios estándares IEEE 802.11 a,b,p con el fin de realizar una mejor comunicación en sistemas de transporte inteligente (ITS). Simula diferentes protocolos que se utilizan en

redes cableadas e inalámbricas, implementa directamente el stack de protocolos TCP/IP de fedora para generar los resultados de simulación [12], [19], [51], [56], [87]-[99].

La Tabla 4.2 resume las principales características de los simuladores previamente descritos.

Características	Simulador de VANET		
	Veins	TraNS	EstiNet 8.1
Protocolo 802.11 p	✓	✓	✓
Opensource	✓	✓	✗
Freeware	✓	✓	✗
GUI	✗	✓	✓
Facilidad al Configurar	✓	✗	✓
Facilidad de uso	✓	✗	✓
Mapas reales	✗	✗	✓
Soporte de Protocolos de enrutamiento para VANET	✓	✓	✓

Tabla 4.2. Tabla comparativa de las herramientas de simulación. Por los Autores.

Se eligió el software de simulación EstiNet 8.1 a pesar de ser una herramienta de carácter licenciado, ya que cumple con todos los requerimientos mencionados. Adicionalmente, cuenta con una interfaz gráfica de usuario que permite desplegar y configurar los escenarios de simulación.

4.3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

La metodología de simulación adoptada para llevar a cabo el desarrollo del proyecto, se basa en [83], [84] y consta de los pasos descritos a continuación:

- a. Definición de los escenarios y casos de simulación: se definen los escenarios con los respectivos casos, a partir de los cuales se ejecutarán las simulaciones.
- b. Definición de las características de los escenarios de simulación: se presentan los parámetros definidos en cada escenario para la ejecución de las simulaciones.
- c. Ejecución de las simulaciones: con los escenarios, los casos y los parámetros técnicos completamente definidos, se ejecutarán las simulaciones.
- d. Análisis de resultados: teniendo en cuenta los parámetros de desempeño a evaluar y finalizada la ejecución de las simulaciones, se presentan los resultados arrojados por el simulador con su análisis correspondiente.

4.3.1. Definición de los Escenarios y Casos de Simulación

Los escenarios de simulación definidos toman como variable principal la densidad de nodos en la red. En los respectivos casos de simulación se varían la distancia y velocidad de los vehículos y se implementa en cada uno de ellos los protocolos de enrutamiento escogidos. El mapa conceptual de este proceso se muestra en la Figura 4.1 y las variables que definen los escenarios y casos de simulación se presentan en la tabla 4.3.

Escenarios de Simulación	
Escenario 1	Escenario 2
Red VANET con 25 vehículos ⁴	Red VANET con 50 vehículos
	Red VANET con 75 vehículos ⁵
Casos de Simulación	
Caso 1	Caso 2
Se establece la comunicación entre dos nodos cercanos	Se establece la comunicación entre dos nodos lejanos
Sub Casos de Simulación	
Sub-Caso a	Sub-Caso b
Velocidad máxima ⁶ de 17 m/s	Velocidad máxima de 8.5 m/s

Tabla 4.3. Escenarios y Casos de Simulación

⁴ Mínima cantidad de vehículos circulando en la zona de interés durante cuatro minutos a las 10:00 am.

⁵ Máxima cantidad de vehículos circulando en la zona de interés durante cuatro minutos a las 10:00 am.

⁶ Con base en estudios realizados por la Secretaría de Tránsito Municipal de la ciudad de Popayán [100].

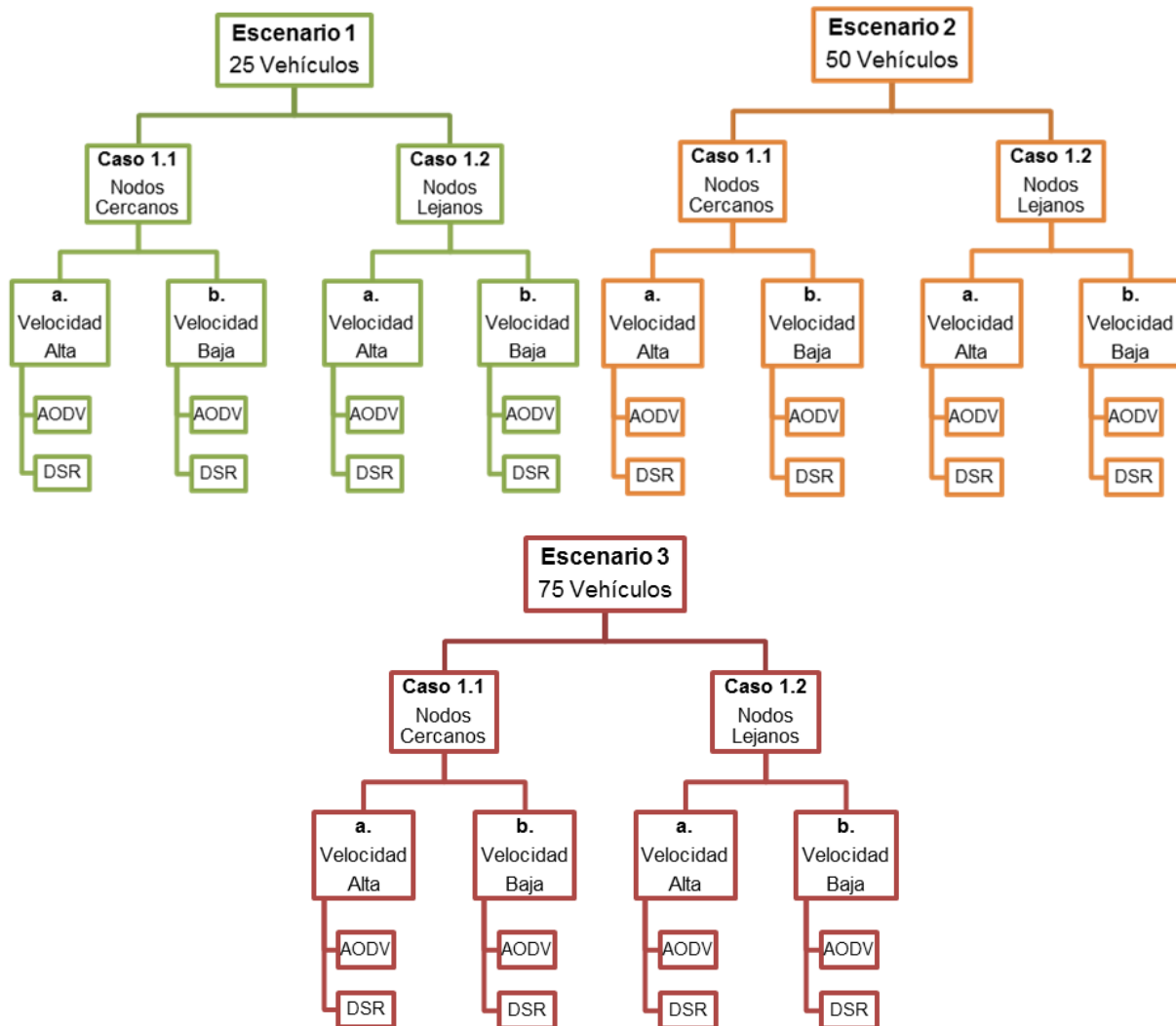


Figura 4.1. Escenarios de Simulación. Por los Autores

4.3.2. Definición de las Características de los Escenarios de Simulación

En esta sección se presentan las características de los escenarios descritos, en función de la zona de estudio seleccionada y de los parámetros técnicos definidos para el desarrollo de la simulación.

✓ Área de Estudio

El área de estudio elegida para desplegar los escenarios de simulación, corresponde a un sector de la ciudad de Popayán. Se consideró un sitio particular en donde el flujo de

vehículos fuera elevado y tuviera características especiales (cruces y semáforos). En consecuencia, se seleccionó la zona delimitada por la carrera 9, la calle 25 N, la carrera 6 y la calle 27 N, con sus respectivas vías internas (ilustrado en la figura 4.2). En este sector se tiene una gran movilidad que se ve afectada por las condiciones del entorno, determinadas principalmente por la densidad vehicular de la zona y los semáforos ubicados en tres intersecciones de la zona.



Figura 4.2. Área seleccionada para la simulación. Tomada de Google Earth.

El área de simulación descrita anteriormente se adecuó al simulador EstiNet 8.1. La figura 4.3 muestra el mapa del sector elegido, importado desde *OpenStreetMap* y la figura 4.4 ilustra el área de simulación adaptada para realizar las simulaciones en EstiNet.

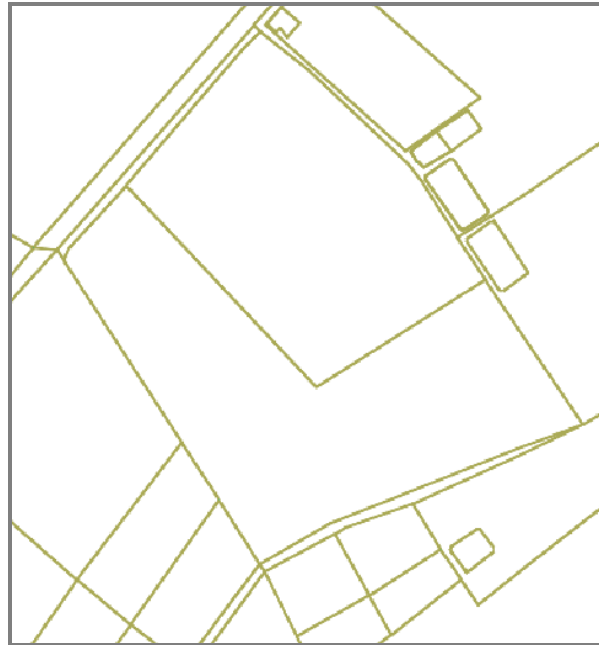


Figura 4.3. Mapa de la zona importado a EstiNet.

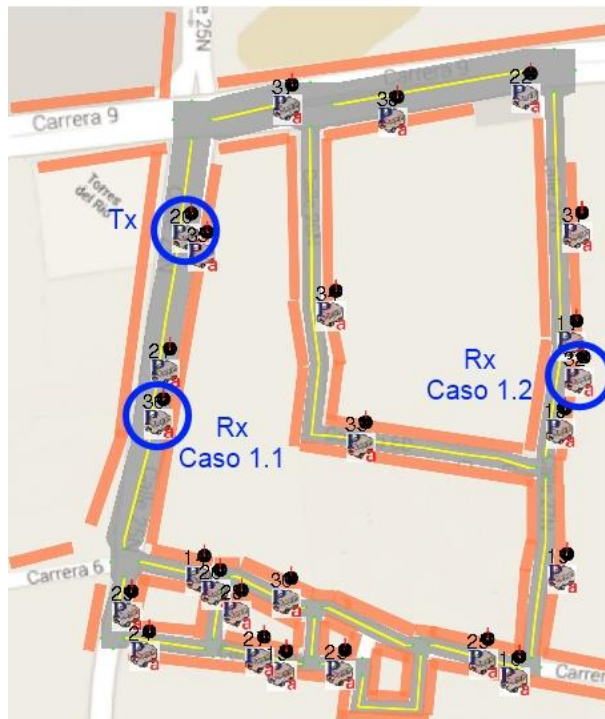


Figura 4.4. Área de simulación adaptada para EstiNet.

✓ Parámetros de los Escenarios de Simulación

En cada escenario se implementa un dominio Ad hoc, con comunicación V2V establecida en la banda de 5.89 GHz, cuya capacidad es de 6 Mbps y utiliza el protocolo WSMP como protocolo de transporte, según se especifica en el estándar IEEE 802.11p [27].

Los principales parámetros de los escenarios de simulación se presentan en la tabla 4.3.

Parámetros de los Escenarios		
Densidad de Nodos	25, 50 y 75 vehículos	
Velocidad Máxima	8.5 m/s y 17 m/s	
Dominio	Ad Hoc, Comunicación V2V	
Tasa de Transmisión de Datos	6 Mbps	
Protocolo de Transporte	WSMP	
Estándar	802.11p	
Tipo de Datos	UDP	
CBR	4 Mbps	
Tamaño de los paquetes	1200 bytes	
Banda de Frecuencia	5.89 GHz	
Canal de Operación	172	
Potencia de Transmisión	28.80814 dBm	
Sensitividad de los Receptores	-82 dBm	
Modelo de Movilidad	Random Waypoint	
Modelo de Propagación	Espacio Libre	
Atenuación	Árboles 5 dB	Edificios/Casas 12 dB

Tabla 4.4. Parámetros de los Escenarios. Por los Autores.

4.3.3. Ejecución de las Simulaciones

La ejecución de las simulaciones se llevó a cabo en la herramienta EstiNet 8.1. El tiempo de simulación establecido es de 240 segundos, durante el cual los nodos circulan por el área seleccionada, transmitiendo información de tipo *unicast*, que corresponde a una fuente de tráfico UDP con Tasa de Bit Constante (CBR, *Constant Bit Rate*) de 4 Mbps (416 paquetes/s). Al desplegarse la misma topología y al utilizarse la misma configuración de entorno, los resultados arrojados por EstiNet son determinísticos [99], por lo tanto se realizó una única simulación para cada caso planteado.

4.3.4. Análisis de Resultados

El análisis de resultados se basa en los datos arrojados por el simulador EstiNet 8.1, donde se toman en cuenta los parámetros mencionados en la sección 2.4, con el fin de establecer el impacto del protocolo de enrutamiento sobre la comunicación de datos en una red VANET. La simulación y el análisis de resultados se hizo tomando como referencia los nodos transmisor (Nodo 20) y receptor (Nodos 36 y 32 para los casos 1.1 y 1.2, respectivamente), sin considerarse el efecto global sobre la red, debido a que los valores totales podrían generar una percepción errónea sobre el comportamiento real de la comunicación.

4.3.4.1. Escenario de Simulación No. 1

✓ Descubrimiento de Ruta y Establecimiento de la Comunicación

Se decidió analizar el primer descubrimiento de ruta ocurrido ya que se utilizan los mismos mensajes de control cada vez que la comunicación se interrumpe y se debe restablecer la conexión. Para dicho análisis se tomó la traza proporcionada por EstiNet, sobre la cual se llevó a cabo un proceso de filtrado, con el fin de observar claramente los mensajes de control intercambiados y los nodos involucrados en el procedimiento. En la tabla 4.5 se muestran los nodos que conforman la ruta para cada caso del escenario 1.

Ruta Caso	AODV	DSR
1.1.a	20, 36	20, 36
1.1.b	20, 36	20, 36
1.2.a	20, 32	20, 32
1.2.b	20, 37, 22, 31, 32	20, 37, 22, 32

Tabla 4.5. Nodos que conforman las rutas establecidas. Escenario 1.

▪ Caso 1.1 a y b: Nodos Cercanos, Velocidad Alta y Baja.

Estos dos casos se presentan de forma conjunta debido a que los instantes de tiempo en que se registran los mensajes de control, son los mismos.

En la figura 4.5 se muestra en una línea de tiempo la ocurrencia del primer proceso de descubrimiento de ruta para los protocolos de enrutamiento AODV (arriba) y DSR (abajo).

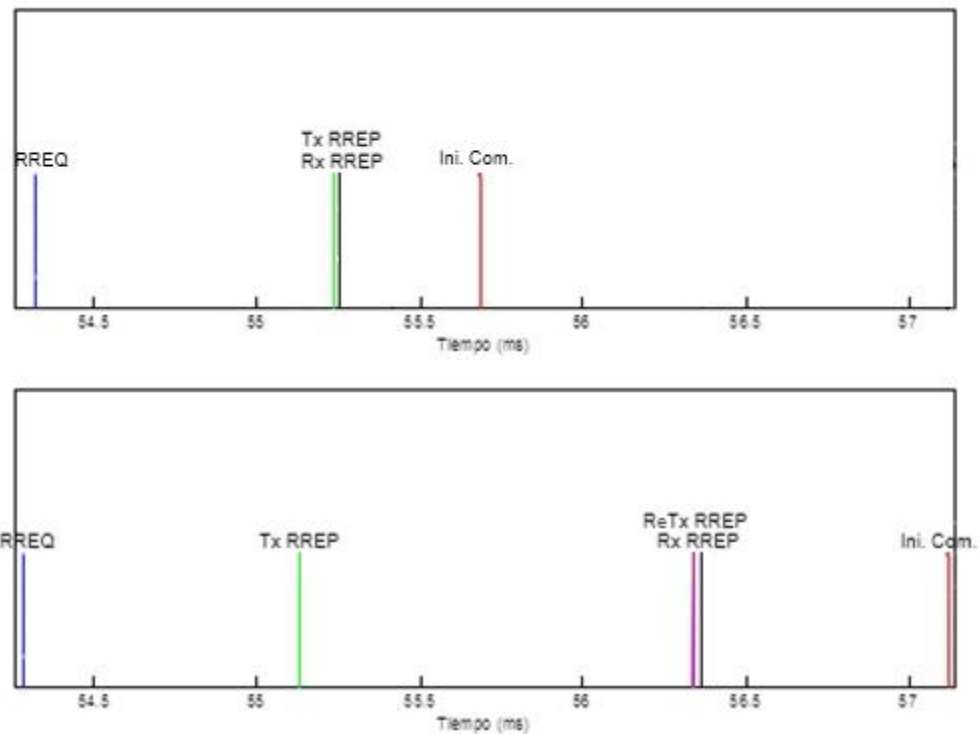


Figura 4.5. Ocurrencia del primer descubrimiento de ruta. Caso 1.1.a y b.

En la tabla 4.6 se indican los diferentes eventos ocurridos durante el primer descubrimiento de ruta y el instante en el que se realizó cada uno.

Eventos	Instante de Tiempo	
	AODV	DSR
Solicitud de Ruta	54.37 ms	54.279 ms
Tx de la Respuesta de Ruta	55.335705 ms	55.129061 ms
ReTx de la Respuesta de Ruta	-	56.361423 ms
Rx de la Respuesta de Ruta	55.336375 ms	56.362093 ms
Inicio de la Comunicación	55.737375 ms	57.121093 ms

Tabla 4.6. Eventos durante el establecimiento de la comunicación. Caso 1.1.a y b.

En la tabla anterior se observa que el establecimiento de la comunicación para el protocolo AODV tuvo menor duración que el llevado a cabo por el protocolo DSR, ya que en este último, se realiza una retransmisión del mensaje de Respuesta de Ruta.

▪ **Caso 1.2 a: Nodos Lejanos, Velocidad Alta.**

En la figura 4.6 se muestra en una línea de tiempo la ocurrencia del primer proceso de descubrimiento de ruta para los protocolos de enrutamiento AODV y DSR.

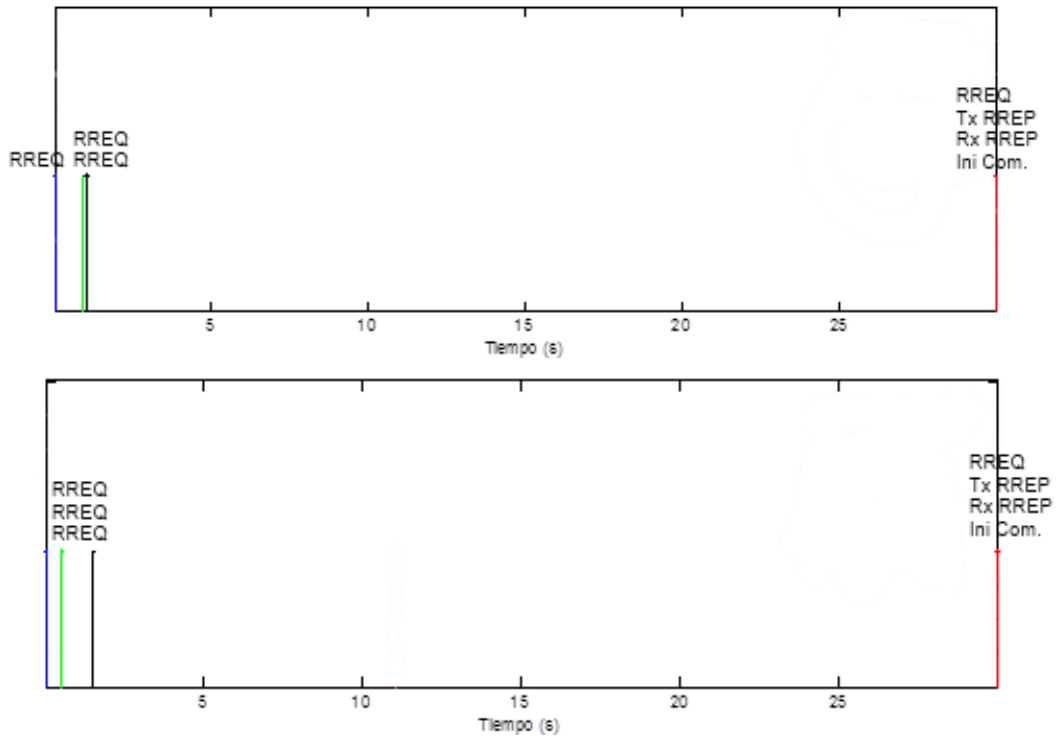


Figura 4.6. Ocurrencia del primer descubrimiento de ruta. Caso 1.2.a.

En la tabla 4.7 se indican los diferentes eventos ocurridos durante la simulación y el instante en el que se realizó cada uno.

Eventos	Instante de Tiempo	
	AODV	DSR
Solicitud de Ruta	54.37 ms	54.279 ms
Solicitud de Ruta	954.162 ms	554.278 ms
Solicitud de Ruta	1.056074492 s	1.554474 s
Solicitud de Ruta	29.983210475 s	29.97727494 s
Tx de la Respuesta de Ruta	29.993714549 s	29.980035807 s
Rx de la Respuesta de Ruta	29.993715862 s	29.98003712 s
Inicio de la Comunicación	29.996791627 s	29.984212953 s

Tabla 4.7. Eventos durante el establecimiento de la comunicación. Caso 1.2.a.

En la tabla 4.6 se observa que los procesos de descubrimiento de ruta para los protocolos AODV y DSR tienen una duración significativamente alta, ya que por la baja densidad de vehículos y a la velocidad con que se desplazan, la

comunicación no se logra establecer antes de que los nodos transmisor y receptor se encuentren lo suficientemente cerca.

▪ **Caso 1.2 b: Nodos Lejanos, Velocidad Baja.**

En la figura 4.7 se muestra en una línea de tiempo la ocurrencia del primer proceso de descubrimiento de ruta para los protocolos de enrutamiento AODV y DSR.

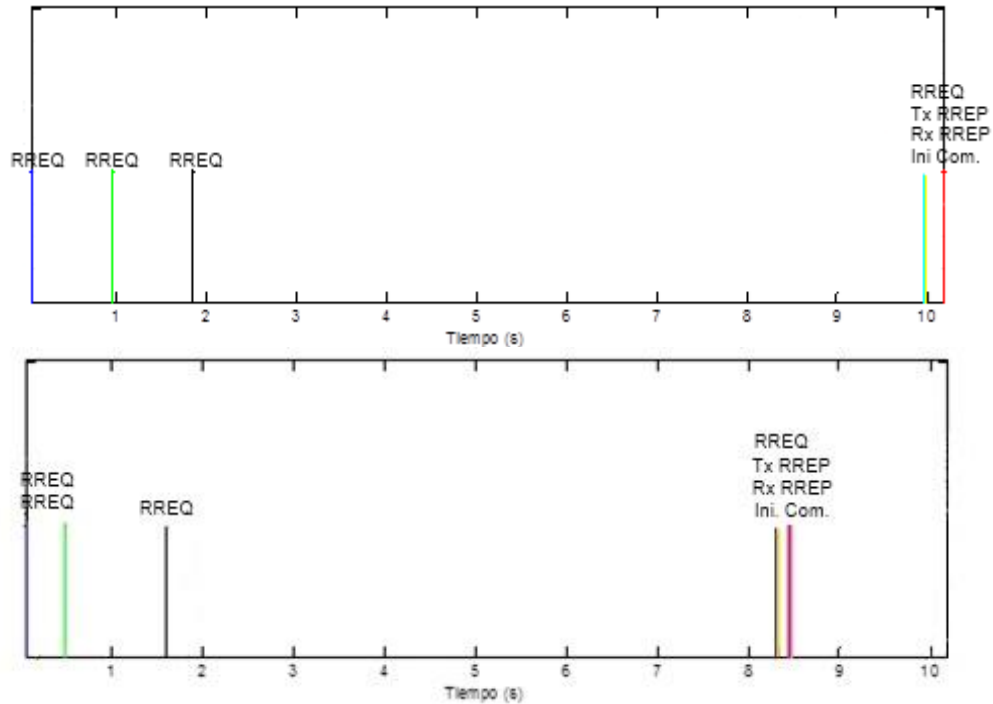


Figura 4.7. Ocurrencia del primer descubrimiento de ruta. Caso 1.2.b.

En la tabla 4.6 se indican los diferentes eventos ocurridos durante la simulación y el instante en el que se realizó cada uno.

Eventos	Instante de Tiempo	
	AODV	DSR
Solicitud de Ruta	54.37 ms	54.279 ms
Solicitud de Ruta	954.162 ms	554.279 ms
Solicitud de Ruta	1.854487 s	1.554474 s
Solicitud de Ruta	9.962520883 s	8.464620844 s
Tx de la Respuesta de Ruta	9.968462424 s	8.46694059 s
Rx de la Respuesta de Ruta	9.982622014 s	8.472559756 s
Inicio de la Comunicación	10.183128628 s	8.473305756 s

Tabla 4.8. Eventos durante el establecimiento de la comunicación. Caso 1.2.b.

El tiempo tomado por el protocolo de enrutamiento AODV para establecer la comunicación es superior al requerido por DSR, debido a que su ruta tiene mayor longitud.

Comparando los resultados de las tablas 4.7 y 4.8, pertenecientes al caso 1.2, con los resultados del caso 1.1 (Tabla 4.6) implementando los protocolos AODV y DSR, se observa un incremento significativo en el tiempo necesario para realizar el descubrimiento de ruta y establecer la comunicación; debido a la distancia existente entre los nodos implicados y a la baja densidad vehicular, ya que inicialmente no se cuenta con vehículos intermedios dentro del rango de cobertura del transmisor o receptor para crear la ruta.

✓ **Pérdida de Paquetes**

El análisis de paquetes perdidos se hizo con base en la ecuación (1). La figura 4.8 ilustra el porcentaje de paquetes perdidos en todos los casos del escenario 1.

$$\text{Porcentaje de Paquetes Perdidos} = \frac{\text{Paquetes}_{Tx} - \text{Paquetes}_{Rx}}{\text{Paquetes}_{Tx}} \times 100 \quad (1)$$

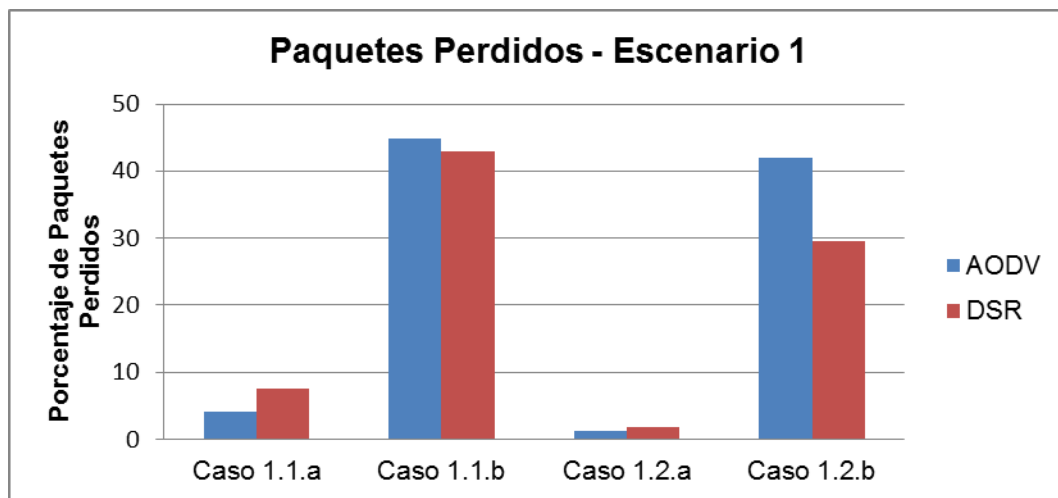


Figura 4.8. Porcentaje de Paquetes Perdidos en el Escenario 1.

En la figura anterior, se puede observar que el menor porcentaje de pérdidas se obtuvo en el caso 1.2 a, mientras que en los casos 1.1 b y 1.2 b, se presentó una mayor cantidad de paquetes perdidos; debido a la baja densidad de vehículos, la poca

velocidad con que se desplazan y a la presencia de semáforos en la vía, que pueden ocasionar inestabilidad en los enlaces.

✓ **Throughput Promedio**

Para observar el comportamiento de éste parámetro en los diferentes casos de simulación, se calculó el *throughput* promedio en el nodo destino. En la figura 4.9 se presenta el *throughput* promedio registrado en todos los casos definidos para el escenario 1.

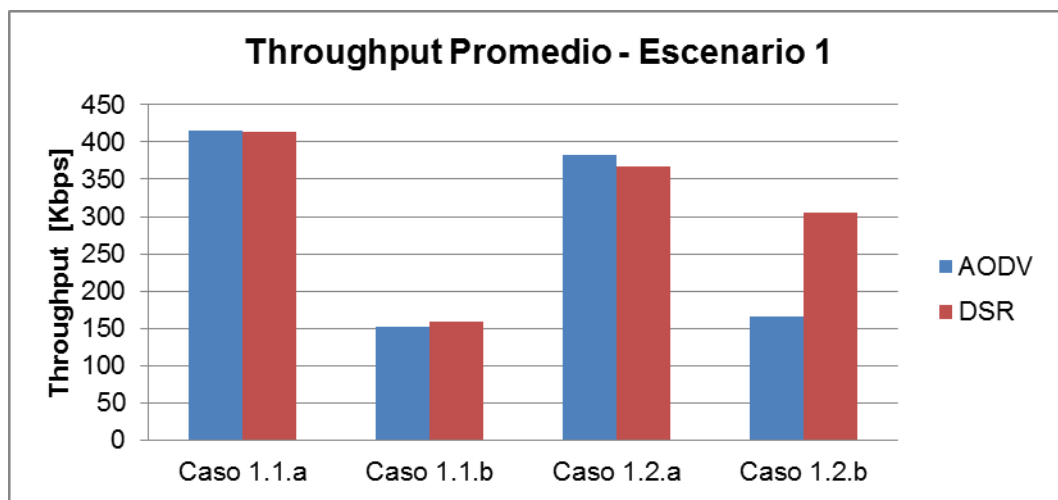


Figura 4.9. *Throughput* Promedio en el Escenario 1.

De la figura anterior se puede concluir que el mayor *throughput* se presentó en caso 1.1 a, mientras que el valor más bajo se registró en el caso 1.1 b, debido a que la inestabilidad de ruta establecida ocasionó rupturas en los enlaces, por lo tanto se requirió una mayor cantidad de mensajes de control para restablecer las conexiones, incrementándose el *overhead* de enrutamiento.

✓ **Latencia**

Para analizar este parámetro, se calculó el retardo promedio experimentado por los paquetes de datos durante el tiempo de simulación. En la figura 4.10 se registra la latencia promedio de todos los casos definidos para el escenario 1.

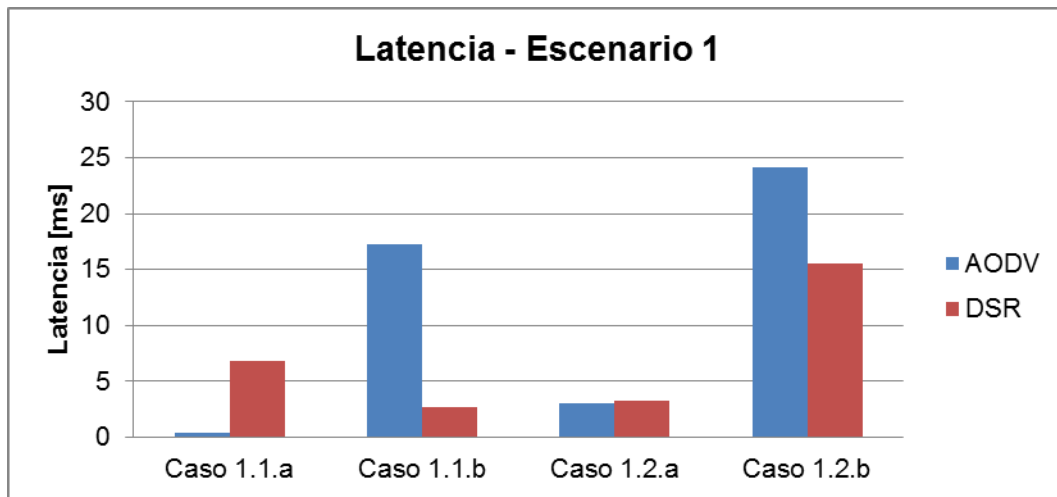


Figura 4.10. Latencia Promedio para el Escenario 1.

En la figura anterior se puede observar que la mayor latencia se presenta en los casos 1.1 b y 1.2 b donde se implementa el protocolo de enrutamiento AODV, ya que ante la ocurrencia de una falla, los paquetes de datos se almacenan durante el proceso de reparación local, para después ser reenviados hacia el destino correspondiente. Además, la longitud de la ruta entre nodos lejanos es mayor, por lo que se incrementa el retardo extremo a extremo experimentado por los paquetes.

4.3.4.2. Escenario de Simulación No. 2

✓ Descubrimiento de Ruta y Establecimiento de la Comunicación

En la tabla 4.9 se presentan los nodos que conforman la ruta para cada caso del escenario 2.

Ruta Caso	AODV	DSR
1.1.a	20, 36	20, 36
1.1.b	20, 36	20, 36
1.2.a	20, 56, 63, 62, 45, 32	20, 56, 63, 62, 32
1.2.b	20, 56, 63, 62, 45, 32	20, 56, 63, 62, 32

Tabla 4.9. Nodos que conforman las rutas establecidas. Escenario 2.

▪ Caso 1.1 a y b: Nodos Cercanos, Velocidad Alta y Baja.

El descubrimiento de ruta y establecimiento de la comunicación en estos casos se presenta en forma conjunta, por las razones descritas en el escenario 1.

En la figura 4.11 se muestra en una línea de tiempo la ocurrencia del primer proceso de descubrimiento de ruta para los protocolos de enrutamiento AODV y DSR.

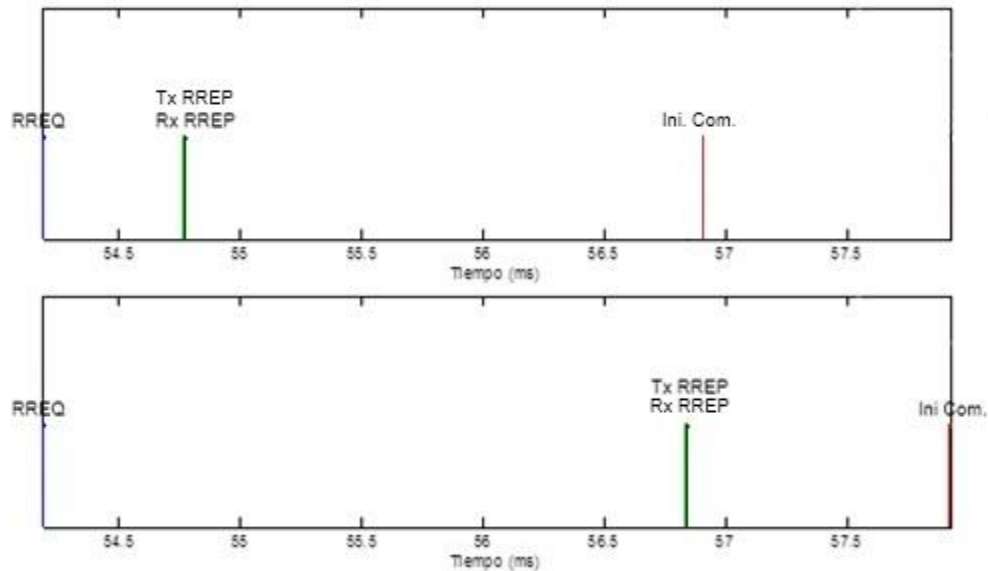


Figura 4.11. Ocurrencia del primer descubrimiento de ruta. Caso 1.1.a y b.

En la tabla 4.10 se indican los diferentes eventos ocurridos durante el primer descubrimiento de ruta y el instante en el que se realizó cada uno.

Eventos	Instante de Tiempo	
	AODV	DSR
Solicitud de Ruta	54.383 ms	54.188 ms
Tx de la Respuesta de Ruta	54.65767 ms	56.844056 ms
Rx de la Respuesta de Ruta	54.65834 ms	56.844726 ms
Inicio de la Comunicación	56.77085 ms	57.925838 ms

Tabla 4.10. Eventos durante el establecimiento de la comunicación. Caso 1.1.a y b.

De la tabla anterior se observa que el establecimiento de la comunicación al implementar el protocolo de enrutamiento DSR tomó más tiempo que con el protocolo AODV, debido a que en el primero, el nodo destino tarda más en enviar el mensaje de Respuesta de Ruta hacia el origen.

▪ **Caso 1.2 a y b: Nodos Lejanos, Velocidad Alta y Baja.**

En la figura 4.12 se muestra en una línea de tiempo la ocurrencia del primer proceso de descubrimiento de ruta para los protocolos de enrutamiento AODV y DSR, en los casos 1.2 a y b.

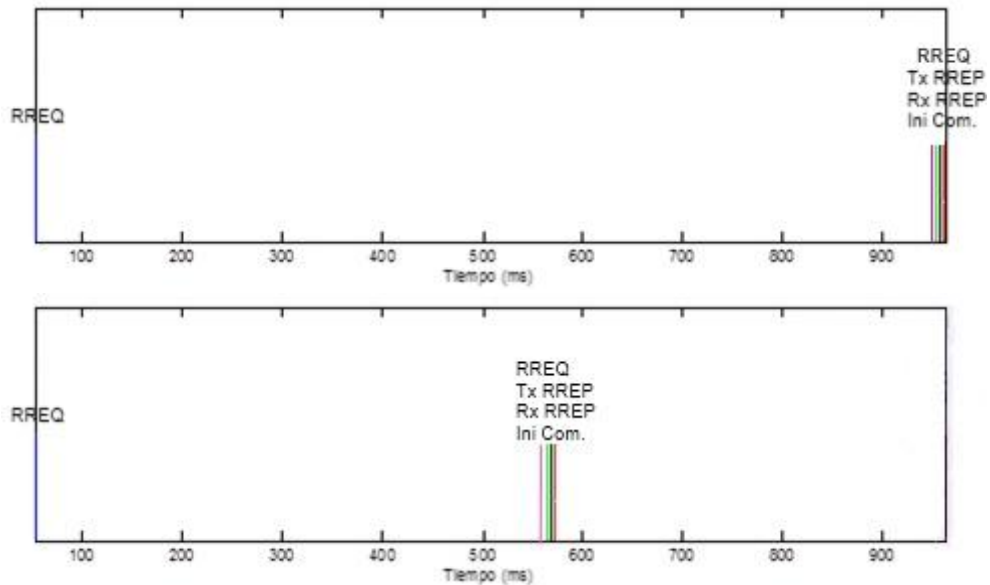


Figura 4.12. Ocurrencia del primer descubrimiento de ruta. Caso 1.2.a y b.

En la tabla 4.11 se indican los diferentes eventos ocurridos durante la simulación y el instante en el que se realizó cada uno.

Eventos	Instante de Tiempo	
	AODV	DSR
Solicitud de Ruta	54.383 ms	54.188 ms
Solicitud de Ruta	954.24 ms	555.267679 ms
Tx de la Respuesta de Ruta	957.441721 ms	561.29144 ms
Rx de la Respuesta de Ruta	960.641534 ms	565.550802 ms
Inicio de la Comunicación	961.068534 ms	566.322802 ms

Tabla 4.11. Eventos durante el establecimiento de la comunicación. Caso 1.2.a y b.

En la tabla anterior se observa que el protocolo de enrutamiento AODV requiere más tiempo para realizar el establecimiento de la comunicación, debido a que la ruta descubierta tiene mayor longitud que la definida por el protocolo DSR.

Comparando los resultados de las tablas 4.10 y 4.11, se observa que en los casos de simulación donde el receptor se encuentra más alejado del transmisor (Caso 1.2 a y b), el establecimiento de la comunicación tarda más que en los nodos cercanos; debido a

que se requiere una mayor cantidad de nodos intermedios para crear una ruta desde el origen hacia el destino.

✓ **Pérdida de Paquetes**

En la figura 4.13 se registra el porcentaje de paquetes perdidos durante la comunicación, para los protocolos AODV y DSR.

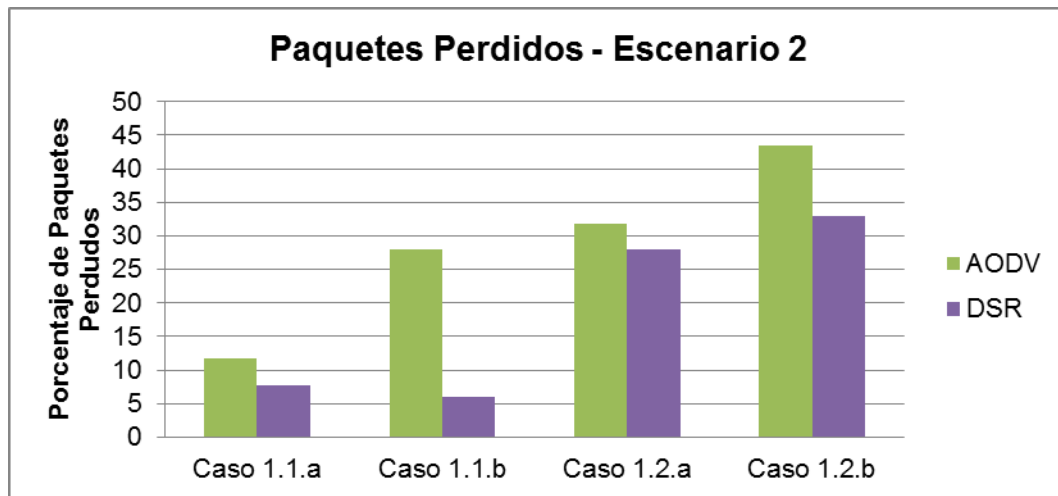


Figura 4.13. Porcentaje de Paquetes Perdidos en el Escenario 2.

En la figura 4.13 se puede observar que la mayor cantidad de paquetes perdidos se presenta en la comunicación entre nodos lejanos; debido a la longitud e inestabilidad de la ruta entre transmisor y receptor, pues al contar con varios saltos, la información puede perderse ante la ocurrencia de alguna desconexión o en algún nodo intermedio; siendo el protocolo AODV el que tiene más pérdidas tuvo, ya que estableció rutas de mayor longitud.

✓ **Throughput Promedio**

En la figura 4.14 se presentan los diferentes valores de *throughput* promedio registrados en el nodo destino durante la simulación.

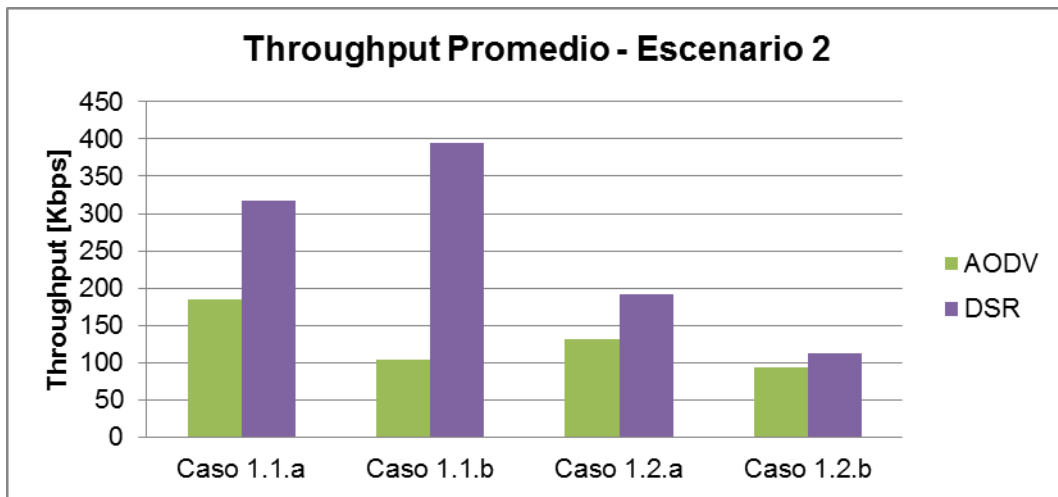


Figura 4.14. *Throughput* Promedio en el Escenario 2.

En la figura anterior se observa que al implementar el protocolo de enrutamiento DSR en el escenario 2, se logra un valor de *throughput* promedio mayor que al utilizar el protocolo AODV. El menor valor de *throughput* se consigue al comunicar dos nodos lejanos moviéndose a baja velocidad, ya que las rutas tienen una mayor longitud y pueden presentarse rupturas en los enlaces, generando una gran cantidad de *overhead* de enrutamiento.

✓ **Latencia**

En la figura 4.15 se presenta el retardo promedio registrado en todos los casos pertenecientes al escenario 2.

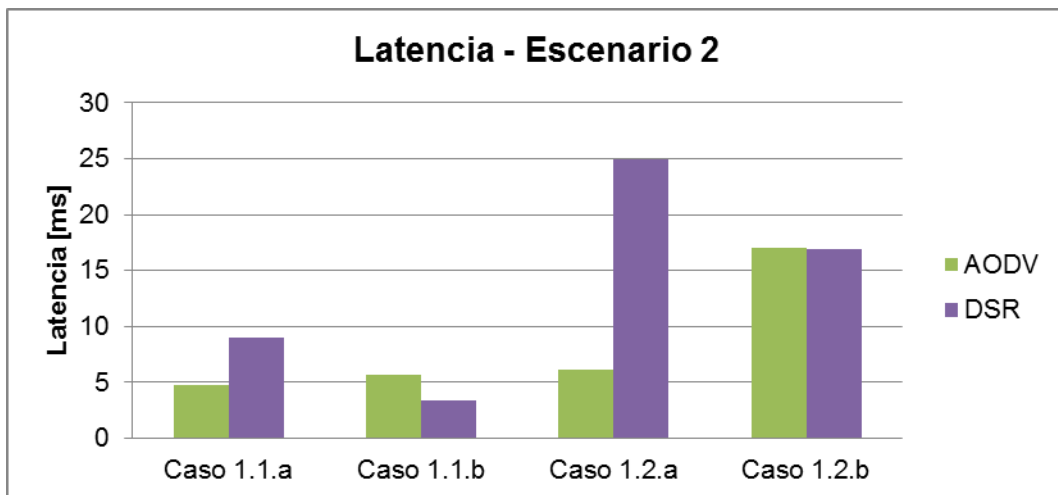


Figura 4.15. Latencia Promedio para el Escenario 2.

En la figura se observa que el mayor retardo promedio se presenta en el caso 1.2, debido a que las rutas establecidas contienen varios nodos intermedios, por lo que tienden a ser inestables, ocasionando pérdidas de información y retransmisiones que incrementan el tiempo requerido por los paquetes para alcanzar el destino.

4.3.4.3. Escenario de Simulación No. 3

✓ Descubrimiento de Ruta y Establecimiento de la Comunicación

En la tabla 4.12 se presentan los nodos que conforman la ruta para cada caso del escenario 2.

Ruta Caso	AODV	DSR
1.1.a	20, 36	20, 36
1.1.b	20, 36	20, 36
1.2.a	20, 56, 87, 22, 32	20, 56, 63, 62, 45, 32
1.2.b	20, 38, 87, 22, 32	20, 56, 63, 62, 45, 32

Tabla 4.12. Nodos que conforman las rutas establecidas. Escenario 3.

▪ Caso 1.1 a: Nodos Cercanos, Velocidad Alta.

En la figura 4.16 se muestra en una línea de tiempo la ocurrencia del primer proceso de descubrimiento de ruta para los protocolos de enrutamiento AODV y DSR.

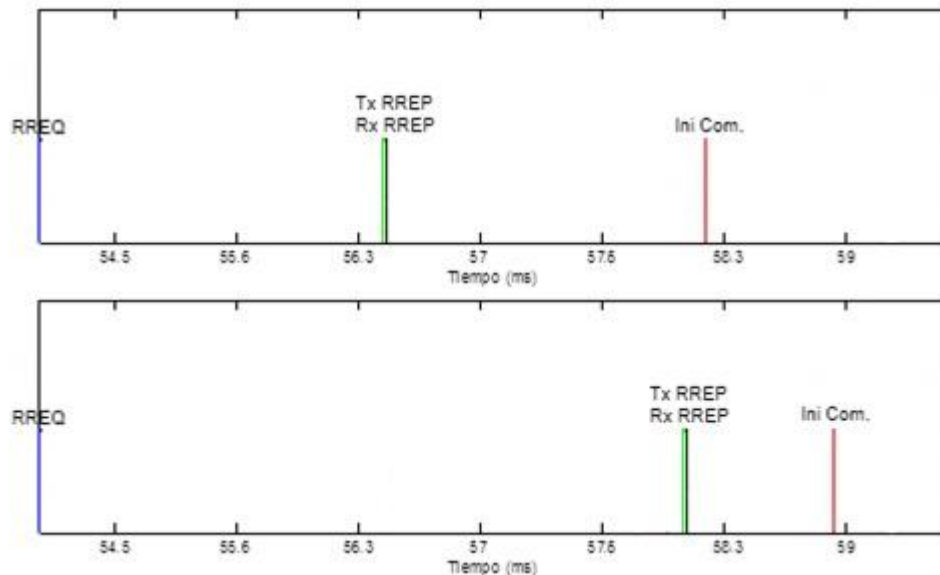


Figura 4.16. Ocurrencia del primer descubrimiento de ruta. Caso 1.1.a.

En la tabla 4.13 se indican los diferentes eventos ocurridos durante el primer descubrimiento de ruta y el instante en el que se realizó cada uno.

Eventos	Instante de Tiempo	
	AODV	DSR
Solicitud de Ruta	54.279 ms	54.37 ms
Tx de la Respuesta de Ruta	56.382393 ms	58.188784 ms
Rx de la Respuesta de Ruta	56.383063 ms	58.189454 ms
Inicio de la Comunicación	58.158726 ms	58.933186 ms

Tabla 4.13. Eventos durante el establecimiento de la comunicación. Caso 1.1.a.

En la tabla anterior se evidencia que el protocolo de enrutamiento AODV tarda menos que el protocolo DSR en establecer la comunicación. Al analizar la traza obtenida para este caso, se observó que con ambos protocolos el mensaje RREQ tarda lo mismo en alcanzar el destino, pero al implementarse AODV el mensaje de respuesta de ruta se genera y se envía hacia el origen en menos tiempo.

▪ **Caso 1.1 b: Nodos Cercanos, Velocidad Baja.**

En la figura 4.17 se muestra en una línea de tiempo la ocurrencia del primer proceso de descubrimiento de ruta para los protocolos de enrutamiento AODV y DSR.

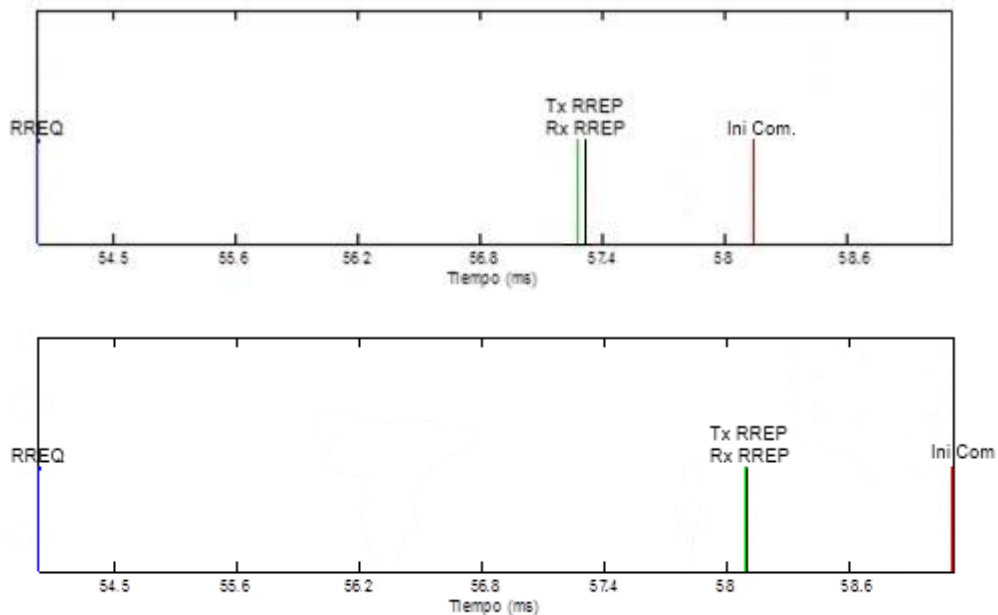


Figura 4.17. Ocurrencia del primer descubrimiento de ruta. Caso 1.1.b.

En la tabla 4.14 se indican los diferentes eventos ocurridos durante el primer descubrimiento de ruta y el instante en el que se realizó cada uno.

Eventos	Instante de Tiempo	
	AODV	DSR
Solicitud de Ruta	54.279 ms	54.37 ms
Tx de la Respuesta de Ruta	56.94046 ms	58.188784 ms
Rx de la Respuesta de Ruta	57.24251 ms	58.189454 ms
Inicio de la Comunicación	58.14303 ms	58.933186 ms

Tabla 4.14. Eventos durante el establecimiento de la comunicación. Caso 1.1.b.

En la tabla anterior se observa que el protocolo de enrutamiento DSR tarda más que el protocolo AODV en establecer la comunicación, debido a que en el primero, el nodo destino tomó más tiempo para generar el mensaje de respuesta de ruta.

▪ **Caso 1.2 a y b: Nodos Lejanos, Velocidad Alta y Baja.**

En la figura 4.18 se muestra en una línea de tiempo la ocurrencia del primer proceso de descubrimiento de ruta para los protocolos de enrutamiento AODV y DSR.

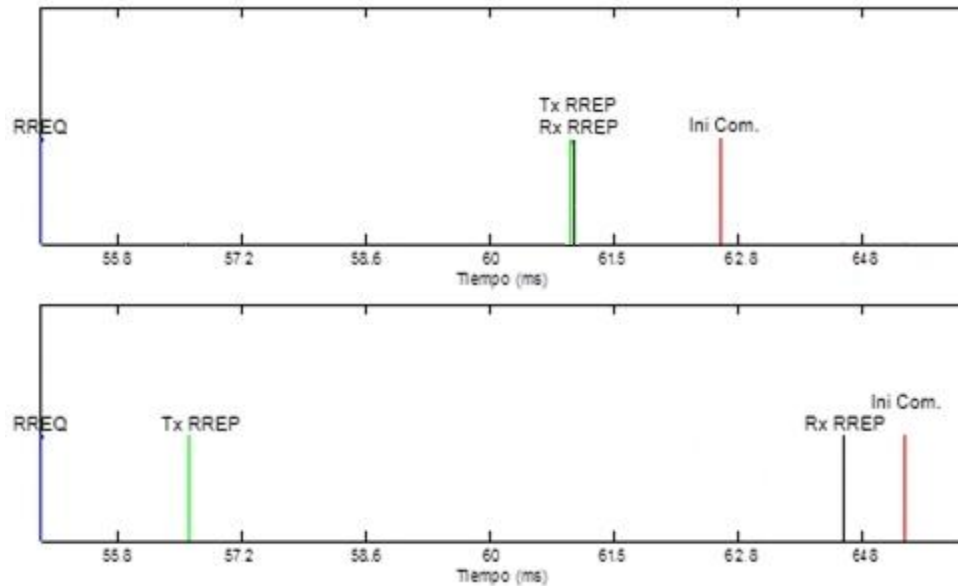


Figura 4.18. Ocurrencia del primer descubrimiento de ruta. Caso 1.2.a y b.

En la tabla 4.15 se indican los diferentes eventos ocurridos durante la simulación y el instante en el que se realizó cada uno.

Eventos	Instante de Tiempo	
	AODV	DSR
Solicitud de Ruta	54,514087 ms	54,37 ms
Tx de la Respuesta de Ruta	60,7801505 ms	56,808051 ms
Rx de la Respuesta de Ruta	60,7801512 ms	64,373864 ms
Inicio de la Comunicación	62,5862101 ms	64,964122 ms

Tabla 4.15. Eventos durante el establecimiento de la comunicación. Caso 1.2.a y b.

En la tabla se puede ver que el protocolo de enrutamiento AODV establece la comunicación en menos tiempo que DSR, debido a que la ruta descubierta por este último tiene de más saltos intermedios.

Con base las tablas 4.13, 4.14 y 4.15, se concluye que el descubrimiento de ruta presenta mayor duración en los casos donde el nodo receptor se encuentra más distanciado del transmisor, siendo el protocolo DSR el que toma más tiempo en este proceso; debido a que la longitud de las rutas establecidas es mayor que en AODV.

✓ Pérdida de Paquetes

En la figura 4.19 se presenta un registro del porcentaje de paquetes perdidos durante la comunicación para el escenario 3.

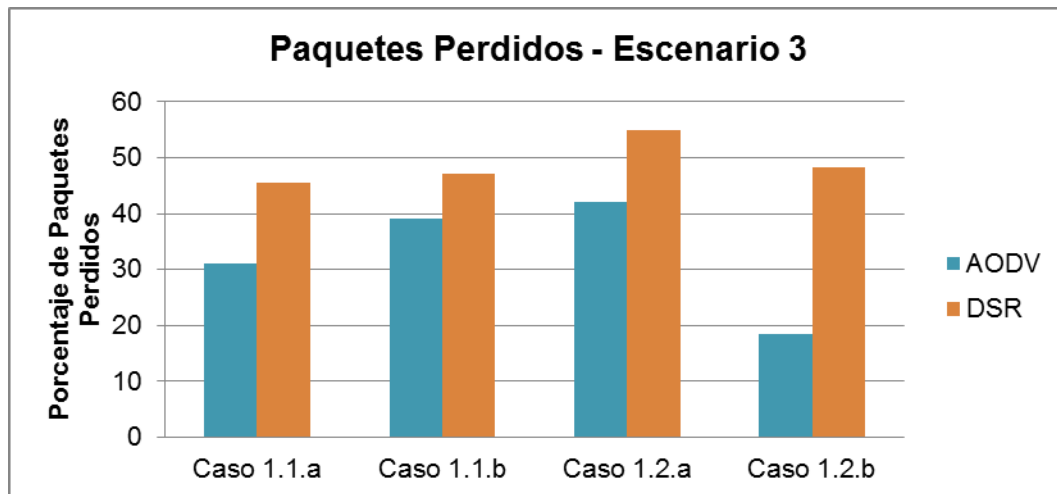


Figura 4.19. Porcentaje de Paquetes Perdidos en el Escenario 3.

De la figura anterior, se concluye que para una red VANET de alta densidad vehicular, el mayor porcentaje de paquetes perdidos se tiene al implementar el protocolo de enrutamiento DSR, especialmente en la comunicación entre nodos lejanos, ya que al incrementar la cantidad de vehículos, aumenta el número de saltos intermedios en la ruta, donde puede la información perderse antes de alcanzar el destino.

✓ **Throughput Promedio**

En la figura 4.20 se presenta el throughput promedio registrado para cada caso del escenario 3.

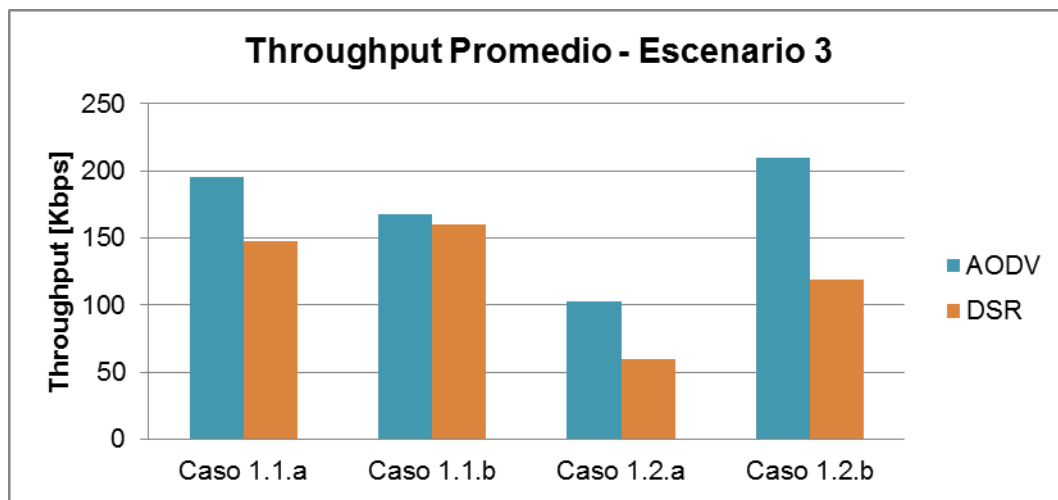


Figura 4.20. *Throughput Promedio* en el Escenario 3.

En la figura 4.20 se observa que el protocolo DSR presenta un menor valor de *throughput* en todos los casos de este escenario, registrándose sus cotas mínimas cuando la comunicación se establece entre dos nodos lejanos, ya que al incrementarse la densidad vehicular, crecen las cabeceras de los paquetes y se requiere mayor cantidad de retransmisiones, introduciendo un gran *overhead* de enrutamiento, por lo tanto el *throughput* se reduce.

✓ **Latencia**

En la figura 4.21 se presenta un histograma para el retardo promedio registrado en el escenario de simulación 3.

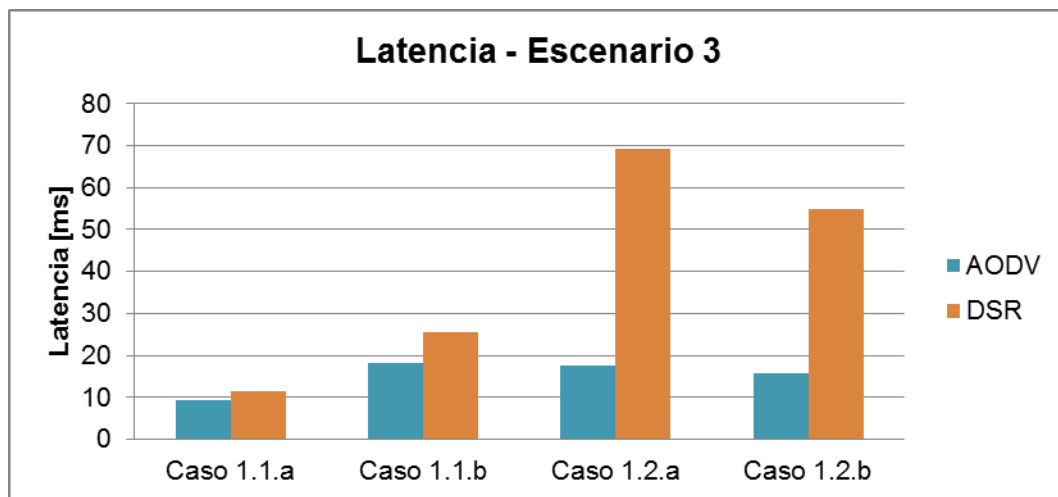


Figura 4.21. Latencia Promedio para el Escenario 3.

En la tabla anterior se observa que los mayores retardos experimentados en el escenario 3, corresponden a la comunicación establecida entre nodos lejanos, donde se implementó el protocolo de enrutamiento DSR, debido a que los caminos descubiertos contienen más saltos intermedios que AODV; además cada vez que ocurre una desconexión y el origen debe encontrar una nueva ruta, busca primero en su memoria caché, con el riesgo de enviar los paquetes a través de un camino obsoleto, donde se generen nuevas pérdidas y se deba realizar un nuevo descubrimiento de ruta, incrementando el tiempo requerido para enviar los datos hacia el destino.

En resumen, la densidad de nodos, la distancia entre de los mismos y la velocidad con que se desplazan, afectan el desempeño de una comunicación de datos en una red VANET.

Después analizar los resultados obtenidos, la tabla 4.16 presenta un resumen del desempeño en la comunicación de datos de la red VANET al implementar los protocolos de enrutamiento AODV y DSR, con el fin de llegar a una conclusión general en la que se visualice cuál de los casos arrojó mejores resultados.

Escenario	Caso	Descubrimiento Ruta		Paquetes Perdidos		Throughput Promedio		Latencia Promedio	
		AODV	DSR	AODV	DSR	AODV	DSR	AODV	DSR
1	1.1 a	1.367375 ms	2.842093 ms	4.06 %	7.51 %	415.29 Kbps	413.136 Kbps	0.43132 ms	6.82482 ms
	1.1 b	1.367375 ms	2.842093 ms	44.7518 %	42.8919 %	151.9059 Kbps	159.7263 Kbps	17.229 ms	2.67302 ms
	1.2 a	29.94242163 s	29.92993395 s	1.227 %	1.7898 %	382.822 Kbps	367.044 Kbps	3.08403 ms	3.25335 ms
	1.2 b	10.12875863 s	8.419026756 s	41.884 %	29.5259 %	165.0606 Kbps	304.746 Kbps	24.1727 ms	15.5597 ms
2	1.1 a	2.38785 ms	3.737838 ms	7.7437 %	11.6799 %	184.133 Kbps	317.51 Kbps	4.80598 ms	8.979 ms
	1.1 b	2.38785 ms	3.737838 ms	28.041 %	5.9744 %	103.554 Kbps	393.807 Kbps	5.72332 ms	3.34215 ms
	1.2 a	906.685534 ms	512.134802 ms	31.86 %	27.9988 %	131.1484 Kbps	192.165 Kbps	6.07613 ms	24.8794 ms
	1.2 b	906.685534 ms	512.134802 ms	43.385 %	33.003 %	94.121 Kbps	112.249 Kbps	17.0575 ms	16.904 ms
3	1.1 a	3.880726 ms	4.563186 ms	31.042 %	45.49 %	195.4714 Kbps	147.296 Kbps	9.37973 ms	11.5191 ms
	1.1 b	3.862028 ms	4.563186 ms	39.133 %	47.077 %	167.6798 Kbps	160.022 Kbps	18.3135 ms	25.6497 ms
	1.2 a	8.072123098 ms	10.594122 ms	42.0268 %	54.921 %	102.7291 Kbps	59.7389 Kbps	17.5964 ms	69.1817 ms
	1.2 b	8.072123098 ms	10.594122 ms	18.537 %	48.159 %	209.689 Kbps	118.662 Kbps	15.7382 ms	54.7385 ms

Tabla 4.16. Resumen del desempeño en una comunicación de datos en una VANET con los protocolos AODV y DSR. Por los Autores.

De la tabla 4.16 y de la ejecución de todos los casos de simulación, se presentan las siguientes conclusiones:

- ✓ El protocolo de enrutamiento AODV tomó menos tiempo que DSR para realizar el descubrimiento de ruta y establecer la comunicación inicial en los escenarios 1 y 2 donde los nodos transmisor y receptor se encontraban más cerca (caso 1.1.a y b).
- ✓ Para los casos donde el transmisor y receptor son cercanos, se observó que a medida que la densidad de vehículos aumenta, el tiempo necesario para realizar el descubrimiento de ruta también se incrementa. Por otro lado, en los casos donde los nodos se encuentran más alejados, la duración del descubrimiento de ruta y establecimiento de la comunicación se redujo considerablemente. Siendo los casos 1.1 (a y b) del escenario 1 y 1.2 (a y b) del escenario 2, los que tardaron menos tiempo en llevar a cabo este proceso.
- ✓ En el escenario 1 caso 1.1, escenario 2 (todos los casos) y escenario 3 caso 1.1 (con el protocolo DSR) y caso 1.2, los procesos de descubrimiento de ruta y establecimiento de la comunicación no se vieron influenciados por la velocidad a la cual se desplazan los nodos.
- ✓ En el escenario con baja densidad de nodos que se desplazan a gran velocidad (Escenario 1, casos 1.1 a y 1.2 a), se registró la menor cantidad de paquetes perdidos.
- ✓ Las grandes pérdidas de datos registradas en los escenarios 1 y 2 donde se implementó el protocolo de enrutamiento AODV, ocurren porque el nodo transmisor continúa enviando mensajes durante el tiempo en que se realiza la reparación local de la ruta, por lo que en varias ocasiones se excede el tiempo de espera máximo del búfer y se descartan los paquetes.
- ✓ El mayor porcentaje de paquetes perdidos se obtuvo en el escenario 3, caso 1.2.a; debido a que las rutas pueden ser inestables por la cantidad de nodos intermedios y la velocidad a la cual se desplazan.
- ✓ En los escenarios con densidad vehicular baja y media, el protocolo de enrutamiento DSR presentó mejores resultados, pero en el escenario 3, los valores de *throughput*, paquetes perdidos y latencia del protocolo AODV, fueron mejores.
- ✓ A medida que la densidad de nodos aumenta, el porcentaje de paquetes perdidos se incrementa, siendo el escenario 3 el que peores resultados presenta en términos de éste parámetro.

- ✓ El protocolo de enrutamiento DSR presentó un mejor desempeño en todos los casos del escenario 2.
- ✓ El menor *throughput* promedio se obtuvo en el escenario con mayor densidad vehicular, donde los nodos se desplazan a gran velocidad; siendo los casos donde se implementa el protocolo de enrutamiento DSR el que registró el valor de *throughput* mínimo.
- ✓ El menor retardo promedio se presentó al implementar el protocolo AODV en el escenario 1, en los casos 1.1.a y 1.2.a, respectivamente.
- ✓ La mayor latencia se registró en la comunicación establecida por nodos lejanos en una red con alta densidad de nodos, donde se utilizó el protocolo de enrutamiento DSR.
- ✓ El mejor desempeño se presentó en el escenario 1, caso 1.1.a, al implementarse el protocolo de enrutamiento AODV, aunque se perdió el 4.22% de los paquetes enviados, la comunicación tiene el valor más alto *throughput* (415.29 Kbps) y la menor latencia registrada (0.43132 ms).

Este capítulo presentó los resultados obtenidos al simular los 3 escenarios que componen el plan de pruebas, con los cuales se realizó el análisis de los principales parámetros de los protocolos de enrutamiento y su efecto en el desempeño de una comunicación de datos en la red VANET.

El capítulo 5 presenta las conclusiones obtenidas después del desarrollo del proyecto, recomendaciones y trabajos futuros que se pueden implementar con referencia a esta temática.

5. CAPÍTULO V. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

5.1. INTRODUCCIÓN

Después de finalizar la investigación, ejecutar el proyecto y alcanzar los objetivos propuestos, en este capítulo se exponen las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros. Las conclusiones se basan en los objetivos propuestos y en su desarrollo, tal como se ha registrado en este documento. Las recomendaciones se dan acerca de la metodología implementada y los trabajos futuros con respecto a las herramientas de simulación, protocolos de enrutamiento y escenarios de simulación.

5.2. CONCLUSIONES

5.2.1. Respecto a los Protocolos de Enrutamiento

- ✓ Con los protocolos de enrutamiento proactivo los paquetes experimentan un bajo retardo extremo a extremo, ya que cada nodo mantiene información sobre todas las posibles rutas hacia un destino en la red, aunque se introduce gran cantidad de *overhead* de enrutamiento por los mensajes de actualización difundidos periódicamente.
- ✓ Los protocolos de enrutamiento reactivo introducen menos sobrecarga en la red en comparación con los mecanismos proactivos, ya que los mensajes de control de enrutamiento sólo se envían cuando se tiene información para transmitir entre dos nodos; por otro lado, se experimenta cierta latencia inicial debido al proceso de descubrimiento de ruta.
- ✓ Los protocolos de enrutamiento híbrido generan poco *overhead* y presentan bajo retardo extremo a extremo, ya que combinan las ventajas de los protocolos proactivos y reactivos.
- ✓ Los protocolos de enrutamiento basados en localización dependen de RSUs desplegadas en las carreteras y de nodos coordinadores ubicados en intersecciones o puntos estratégicos de las vías, restringiendo su funcionamiento.
- ✓ En general, los protocolos basados en localización presentan baja latencia e introducen poco *overhead* de enrutamiento, ya que mejoran o combinan características de algunos mecanismos basados en topología implementados con anterioridad. Aunque estos protocolos aún se encuentran en una etapa experimental, se espera que superen las deficiencias de los protocolos adaptados de las redes MANET.

- ✓ El protocolo AODV evita la formación de bucles de enrutamiento, ya que implementa números de secuencia para descartar información relacionada con rutas obsoletas.
- ✓ Ante las fallas, el protocolo de enrutamiento AODV se recupera rápidamente, ya que los nodos intermedios pueden realizar una reparación local del enlace y entregar los paquetes de datos en el destino sin involucrar al transmisor; a diferencia del protocolo DSR, que emplea un mecanismo de enrutamiento de fuente, donde el nodo origen inicia un nuevo descubrimiento de ruta cada vez que se presenta un error.
- ✓ El protocolo AODV genera un bajo *overhead* de enrutamiento en comparación con los mecanismos proactivos, ya que sólo mantiene información relacionada con la ruta activa.
- ✓ En redes con alta densidad de nodos, el protocolo DSR puede fallar, ya que cada vez que se necesita establecer una nueva comunicación, busca en su memoria caché información aprendida en descubrimientos de ruta pasados que en algunos casos puede ser obsoleta.
- ✓ Actualmente los protocolos de enrutamiento basados en localización son los de mayor interés en redes vehiculares, debido a las características que integran, siendo el más reciente y prometedor el protocolo de enrutamiento CAR (*Connectivity Aware Routing*).

5.2.2. Respecto al Desarrollo de la Simulación y a la Herramienta de Simulación

- ✓ Todo proceso de simulación debe tener en cuenta ciertas características determinadas por el estándar, el protocolo de enrutamiento y por el medio.
- ✓ El tiempo de simulación establecido debe permitir la observación de todos los eventos importantes que ocurran en el escenario. En el caso de las VANET, es posible realizar simulaciones de corta duración, ya que el tiempo de vida de los enlaces es muy pequeño.
- ✓ EstiNet no grafica automáticamente los resultados de simulación, por lo tanto cada vez que se necesiten, se deben cargar los archivos correspondientes en el módulo de graficación.
- ✓ Tras ejecutar una prueba de simulación, para variar un parámetro específico, se debe realizar nuevamente la configuración y ejecución de todo el escenario, lo cual hace difícil realizar cambios.

5.2.3. Respecto a los Resultados de la Simulación

- ✓ Las variables que afectan el desempeño de una comunicación de datos en una red VANET son la densidad de nodos, la velocidad con que se desplazan, el tiempo de establecimiento de la conexión, el *overhead* de enrutamiento, la estabilidad y la longitud de la ruta.
- ✓ El incremento en el número de nodos influye directamente en el aumento del porcentaje de paquetes perdidos y en la disminución del *throughput*, ya que la longitud de la ruta tiende a aumentar y con ello los enlaces se vuelven más inestables, ocasionando mayores desconexiones.
- ✓ El tiempo requerido por la fuente para establecer una ruta hacia el destino se ve influenciado directamente por la distancia existente entre los nodos transmisor y receptor.
- ✓ El tiempo de establecimiento de la comunicación no se ve afectado por la velocidad máxima a la cual se desplazan los vehículos.
- ✓ El retardo promedio experimentado por los paquetes de datos aumenta conforme al crecimiento de la red.
- ✓ A nivel general, el protocolo de enrutamiento DSR tuvo un mejor desempeño en escenarios de baja densidad de nodos, mientras que en el entorno con mayor cantidad de nodos, AODV presentó los mejores resultados.
- ✓ La distancia entre los vehículos y la densidad de nodos influyen directamente sobre el tiempo requerido para establecer la comunicación, la cantidad de paquetes perdidos, el *throughput* promedio y el retardo extremo a extremo.

5.3. RECOMENDACIONES

- ✓ Para seleccionar una herramienta de simulación particular, es necesario hacer un estudio previo y detallado de las características de la misma, que permita determinar si ésta cumple con todos los requisitos necesarios para simular los escenarios planteados, dado que esto permite obtener variables que entreguen resultados más precisos para el análisis.
- ✓ Cuando se trabaje con herramientas de simulación licenciadas, es necesario tener claro el tipo de soporte técnico ofrecido por la empresa desarrolladora, pues en muchos casos se debe pagar cierta cantidad de dinero para obtenerlo.

- ✓ Al utilizar software licenciado, es conveniente llevar un registro de los errores e inconvenientes detectados en la herramienta y enviarlo a la empresa desarrolladora para que puedan ser corregidos.
- ✓ Se recomienda instalar EstiNet sobre el sistema operativo Fedora, no en una máquina virtual, debido a que el número de reservas permitidas se reduce a 4 oportunidades de re-instalación, por lo tanto, si durante el periodo de la licencia se generan más de cuatro actualizaciones de la herramienta, ya no se puede utilizar.
- ✓ Antes de llevar a un entorno de simulación los casos deseados, es necesario conocer a fondo la teoría relacionada con el proyecto, con el fin de realizar una correcta configuración de los escenarios y comprender los resultados obtenidos.
- ✓ Cuando se desarrolle un trabajo en simulación, es importante definir claramente los escenarios y casos a tener en cuenta, ya que esto permite estructurar adecuadamente las simulaciones para validar lo que se quiere comprobar.

5.4. TRABAJOS FUTUROS

- ✓ **Estudios comparativos entre los protocolos de enrutamiento basados en topología y los basados en localización:** en este trabajo sólo se evaluó el impacto de dos protocolos basados en topología en una red vehicular, por lo que sería interesante analizar el efecto que los mecanismos de enrutamiento basados en localización tienen sobre una comunicación de datos en las VANET.
- ✓ **Simulación de diferentes tipos de aplicaciones en redes vehiculares:** en este proyecto se envió información tipo UDP con tasa de bit constante desde el origen hacia el destino, por lo tanto se propone implementar varios tipos de aplicaciones, con el fin de evaluar el impacto de los protocolos de enrutamiento, observando si se cumplen los requerimientos de latencia servicios de entretenimiento o seguridad vial.
- ✓ **Análisis a bajo nivel sobre los protocolos de enrutamiento para redes vehiculares:** todo el análisis realizado en esta tesis se hizo con base en las variables que impactan el desempeño de la red. Se propone una modificación de los parámetros del protocolo de enrutamiento que pueden afectar el rendimiento en la comunicación de datos en una red VANET.
- ✓ **Evaluar el impacto del enrutamiento sobre una comunicación de datos en una VANET, teniendo en cuenta modelos de movilidad y de canal adecuados:** en este proyecto se utilizó el modelo de movilidad *Random Waypoint* y el modelo de pérdidas

de espacio libre. Se propone la implementación de modelos más realistas que se adecúen al entorno vehicular de la ciudad de Popayán.

REFERENCIAS

- [1] H. Wu, "Analysis and Design of Vehicular Networks," Tesis de PhD. en Ciencias de la Computación, Instituto de Tecnología de Georgia, USA, Diciembre 2005.
- [2] A. Hassan, "VANET Simulation," Tesis de MsC. en Ingeniería Eléctrica, Escuela de Ciencias de Información, Computación e Ingeniería Eléctrica, Universidad de Halmstad, Halmstad: Suecia, 2009.
- [3] Loulloudes, N.; Pallis, G.; Dikaiakos, M.D., "On the performance evaluation of VANET routing protocols in large-scale urban environments (Poster)," *Vehicular Networking Conference (VNC), 2012 IEEE*, pp.129 -136, 14-16, Nov. 2012.
- [4] Bijan, P.; Ibrahim, Md.; et al. "VANET Routing Protocols: Pros and Cons," *International Journal of Computer Applications*, vol.20, no.3, April 2011.
- [5] Moustafa, H.; Senouci, S. M.; Jerbi, M., "Introduction to Vehicular Networks." *Vehicular Networks: Techniques, Standards and Applications (2009)*.
- [6] Pallares, J., "Redes Ad Hoc entre vehículos," Trabajo Fin de Carrera, Universidad Politécnica de Catalunya, 2008.
- [7] Al-Sultan, S.; Al-Doori, M. M.; Al-Bayatti A. H.; Zedan H., "A comprehensive survey on vehicular Ad Hoc network," *Journal of Network and Computer Applications*, 2013.
- [8] Rawashdeh, Z. Y., & Mahmud, S. M. "Communications in Vehicular Networks", *Mobile Ad-Hoc Networks: Applications*, Cap 2, pp 20-40, ISBN: 978-953-307-416-0, InTech (2011).
- [9] Doumenc, H., "Estudio Comparativo De Protocolos De Encaminamiento En Redes VANET", *Trabajo Fin de Carrera, Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid*, 2008.
- [10] Maldonado, V., "Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad para Redes Ad-Hoc Vehiculares usando mapas reales," Trabajo fin de Carrera, Universidad Técnica de Loja, 2012.
- [11] Caicedo, A.; Martínez, J.; Agredo, G., "Evaluación del Desempeño de Redes 802.11p/WAVE en la Transmisión de Datos, Voz y Video IP," *Revista Universitaria en Telecomunicaciones, Informática y Control*, vol.1, no.1, Marzo 2012.
- [12] Navarro, D.; "Performance evaluation of Vehicular Ad Hoc Networks over high speed environment using NCTUns." Trabajo fin de Carrera, Universidad Politécnica de Cataluña (2011).
- [13] Sichertiu, M.L.; Kihl, M., "Inter-vehicle communication systems: a survey," *Second Quarter Communications Surveys & Tutorials, IEEE* 2008, vol.10, no.2, pp.88-105.
- [14] Willke, T.L.; Tientrakool, P.; Maxemchuk, N.F., "A survey of inter-vehicle communication protocols and their applications," *Second Quarter Communications Surveys & Tutorials, IEEE* 2009, vol.11, no.2, pp.3-20
- [15] Luo, J.; Hubaux, J.P., "A Survey of Inter-Vehicle Communications," *Reporte Técnico IC EPFL*, Marzo 2004.
- [16] Pinto, G.; López, D.; et al. "Simulación y análisis de desempeño de protocolos unicast para Redes VANET," *Revista Universidad Distrital*, vol.16, no. 31, 2012.

- [17] Nieto, C.; Velasco, M., "Modelos de comportamiento de las redes vehiculares en sus escenarios más representativos, utilizando simulación en la herramienta NCTUns," *Sistemas y Telemática, Universidad ICESI*, pp.13-25, Marzo 2010.
- [18] Orozco, A.; Llano, G.; et al, "Redes Vehiculares Ad-hoc: Aplicaciones basadas en simulación," *Ingenium Universidad Santiago de Cali*, vol.6, pp. 11-22, Junio 2012.
- [19] Daunou, A.; "Design of a privacy-aware routing protocol for vehicular ad hoc networks," Tesis de Maestría, Escuela Técnica Superior de Ingenierías de Telecomunicaciones de Barcelona, 2012.
- [20] Campos, X., Pastor, D.; "Performance Evaluation of Manhattan Downtown Scenarios For Vehicular Ad Hoc Networks With Citymob and NCTUns," Trabajo de Grado, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Junio 2012.
- [21] López, N. P.; "Performance Evaluation of BandwidthAware Routing Protocol in Urban Scenarios for Vehicular Ad hoc NETWORKS," Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Abril 2012.
- [22] Rohde & Schwarz: "WLAN 802.11p Measurements for Vehicle to Vehicle (V2V) DSRC", pp. 1-24, September 2009.
- [23] Kenney, J.B., "Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States," *Proceedings of the IEEE*, vol.99, no.7, pp.1162-1182, July 2011.
- [24] "IEEE Draft Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Architecture," IEEE P1609.0/D6, June 2013, vol., no., pp.1-74."
- [25] "IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments Security Services for Applications and Management Messages," IEEE Std 1609.2-2013 (Revision of IEEE Std 1609.2-2006), vol., no., pp.1-289, April 26 2013.
- [26] "IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Networking Services," IEEE Std P1609.3-2010 (Revision of IEEE Std 1609.3-2007), pp.1,144, December 30 2013.
- [27] "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments," IEEE Std 802.11p-2010, 2010.
- [28] Yi Wang; Ahmed, A.; Krishnamachari, B.; Psounis, K., "IEEE 802.11p performance evaluation and protocol enhancement," IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety, ICVES 2008., vol., no., pp.317,322, 22-24 Sept. 2008.
- [29] Jiang, D.; Delgrossi, L., "IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments," *Vehicular Technology Conference, VTC Spring 2008. IEEE 2008*, vol., no., pp.2036-2040, May 2008.
- [30] Karagiannis, G.; Altintas, O.; et al., "Vehicular networking: A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 13, no 4, p. 584-616. 2011.
- [31] Pesel, R.; Maslouh, O.; "Vehicular Ad-Hoc Networks (VANET) applied to Intelligent Transportation Systems (ITS)," University of Limones, 2012.
- [32] Stampoulis, A.; Chai Z.; "A Survey of Security in Vehicular Networks," Proyecto CPSC 534, Universidad de Yale, 2007.
- [33] Jakubiak, J., & Koucheryavy, Y; "State of the art and research challenges for VANETs," *5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC 2008*. pp. 912-916, Enero 2008.

- [34] Ford, M., Stevenson, T., Lew, H. K., & Spanier, S., "Internetworking technologies handbook," Cisco. Macmillan Publishing Co. 1997, Inc.. Chapter 5: Routing Basics.
- [35] DiMarzio, J. F., "Sams Teach Yourself Routing in 24 Hours". 2002.
- [36] Majma, M., & TakhtFoladi, M. D., "Comparison and Performance Evaluation of Routing Algorithms between Wireless Sensor Networks and Interconnection Networks," 5th Symposium on Advances in Science & Technology, SASTech, Irán, 11-17 Mayo 2011.
- [37] Medhi, D., & Ramasamy, K. "Network routing: algorithms, protocols, and architectures, Capítulo 3: Routing Protocols: Framework and Principles," *Morgan Kaufmann Publishers Inc.*, ISBN 0120885883, 2010.
- [38] Chen, S., Routing Overview. [Diapositivas], University of Southampton.
- [39] W. Buchanan, Routing Protocols. [Dispositivas], Napier University.
- [40] Kumar, R.; Dave, M.; "A comparative study of Various Routing Protocols in VANET," 2011.
- [41] Altayeb, M.; Mahgoub, I.; "A Survey of Vehicular Ad hoc Networks Routing Protocols," *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 3, pp. 829-846, 2013.
- [42] Li, F.; Wang, Y.; "Routing in vehicular ad hoc networks: Toward Road-Connectivity Based Routing," *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, pp 12-22. 2007.
- [43] Busch, C., Tirthapura, S.; "Analysis of link reversal routing algorithms," *SIAM Journal on Computing*, 35(2), 305-326. 2005.
- [44] Busch, C., Surapaneni, S., Tirthapura, S.; "Analysis of link reversal routing algorithms for mobile ad hoc networks," In *Proceedings of the fifteenth annual ACM symposium on Parallel algorithms and architectures*. ACM. pp. 210-219 Junio 2003.
- [45] Vainio, M.; "Link reversal routing," *Nokia Group*, 2002.
- [46] Raju, C. S.; Sailaja, M.; Balaswamy, C.; "Adaptability of MANET Routing Protocols for VANETS." *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, vol. 2, 2013.
- [47] Vijayalaskhmi, M.; Avinash, P.; Linganagouda K.; "QoS Parameter Analysis on AODV and DSDV Protocols in a wireless Network," *International Journal of Communication Network & Security* 1.1, 2011.
- [48] Rani, P.; Sharma, N.; et al. "Performance Comparison of VANET Routing Protocols," 2011 7th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM), pp.6-10, 23-25 Sept. 2011.
- [49] Brahmi N.; Boussedjra M.; et al. "Routing in Vehicular Ad Hoc Networks: Towards Road-Connectivity Based Routing," *Mobile Ad-Hoc Networks: Applications*, January 2011.
- [50] Nagaraj, U.; Kharat, M. U.; et al. "Study of Various Routing Protocols in VANET," *International Journal on Computer Science and Technology*, vol.2, 2011.

- [51] Mumtaz, W.; Niaz, B., "Performance Evaluation of Ad-hoc Routing Protocols through NCTUns 6.0," *International Journal of Computer Applications*, vol.19, No.5, April 2011.
- [52] Khan, I.; "Performance Evaluation Of Ad Hoc Routing Protocols For Vehicular Ad Hoc Networks," Tesis de maestría, Mohammad Ali Jinnah University, Fall 2009.
- [53] Patel, V. J.; Anuradha, P. G.; "A Review on Routing Overhead in Broadcast Based Protocol on VANET," *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, vol. 2, 2012.
- [54] Kakarla, J.; Sathya, S.; Laxmi, G., "A Survey on Routing Protocols and its Issues in VANET," *International Journal of Computer Applications*, vol. 28, no.4, August 2011.
- [55] Chowdhury, S.I.; Lee, W.; et al. "Performance Evaluation of Reactive Routing Protocols in VANET," 2011 17th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), 2011 IEEE, pp.559-564, 2-5 October 2011.
- [56] Dalal, K.; Chaudhary, P.; et al. "Performance Evaluation of AODV and ADV Protocols in VANET Scenarios," *International Journal of Computer Technology and Applications*, vol.3, pp. 50-55, January-February 2012.
- [57] Mustafa B.; Waqas U.; "Issues of Routing in VANET," Tesis de Maestría, Blekinge Institute of Technology June 2010.
- [58] Ranjan, P.; Kant, K.; "Comparative Study of VANET and MANET Routing Protocols," *International Conference on Advanced Computing and Communication Technologies*, 2011.
- [59] Abedi, O.; Fathy, M.; et al. "Enhancing AODV routing protocol using mobility parameters in VANET," *International Conference on Computer Systems and Applications*, 2008. AICCSA 2008. IEEE/ACS, pp.229, 235, March 31 - April 4 2008.
- [60] Xi, Y.; Huaqun, G.; et al. "A reliable routing protocol for VANET communications," 7th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), pp.1748, 1753, 4-8 July 2011.
- [61] Canales, J.; "Redes Ad hoc entre vehículos", Tesis de especialización, Universidad Politecnica de Catalunya, Barcelona, Enero 2008.
- [62] Mahesh, M.; Samir, D., "Ad hoc on-demand multipath distance vector routing," *Wireless Communications And Mobile Computing*, vol. 6, pp. 969–988, 2006.
- [63] Yufeng, C.; Zhengtao, X.; Wei Jian; Weirong Jiang, "A Cross-Layer AOMDV Routing Protocol for V2V Communication in Urban VANET," 5th International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, 2009, pp.353,359, 14-16 Dec. 2009.
- [64] Nagaraju, A.; Krishna, C.R., "Performance Evaluation of ADV with AODV for Mobile Ad-hoc Networks," *First International Conference on Networks and Communications*, 2009. NETCOM '09. pp.376,380, 27-29 Dec. 2009.
- [65] Boppana, R. V.; Konduru, S., P., "An adaptive distance vector routing algorithm for mobile, ad hoc networks," *Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies Proceedings INFOCOM 2001*, vol. 3, pp. 1753-1762. IEEE 2001.
- [66] Sharma, N.; Thakur J., "Performance analysis of AODV &GPSR routing protocol in VANET," *International Journal of Computer Science & Engineering Technology (IJCSET)*, vol. 4 No. 02, Feb 2013.

- [67] Perkins, C., Belding-Royer, E., & Das, S. "RFC 3561 Ad hoc On-demand Distance Vector (AODV) routing," *Internet Engineering Task Force (IETF) 2003*
- [68] Batiste Troyano, A.; "Protocolos de encaminamiento en redes inalámbricas mesh: un estudio teórico y experimental," Tesis de Maestría, Universidad Abierta de Cataluña, junio 2011.
- [69] Ortuño, M., A.; "Encaminamiento en redes Ad-Hoc," Septiembre de 2010.
- [70] Johnson, D., "RFC 4728 The Dynamic Source Routing Protocol (DSR)," *Internet Engineering Task Force (IETF) 2007*.
- [71] Wa Y.; Wu T.; Lee W.; et al. "A Novel Geographic Routing Strategy over VANET," *Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), 2010 IEEE 24th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), pp.873,879, 20-23 April 2010*.
- [72] Luo, J.; Gu, X.; Zhao, T.; et al. "A Mobile Infrastructure Based VANET Routing Protocol in the Urban Environment," *International Conference on Communications and Mobile Computing, vol.3, pp.432-437, 12-14 April 2010*.
- [73] Huijing S.; Zhizhong D., "IDVR: An Intersection Dispatch-Based VANET Routing Protocol," *7th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), pp.1,4, 23-25 September 2011*.
- [74] Yun, G.; Xin F.; Xing W., "A stable routing protocol using segment-by-segment way in VANET," *International Conference on Computer Science and Information Processing (CSIP), pp.1078,1081, 24-26 August 2012*.
- [75] Tee, C. A T H; et al. "Adaptive Reactive Routing for VANET in City Environments," *10th International Symposium on Pervasive Systems, Algorithms, and Networks (ISPAN), pp.610,614, 14-16 December 2009*.
- [76] Xue, G., Feng J.; et al. "A Passive Geographical Routing Protocol in VANET," *Conference IEEE Asia-Pacific Services Computing, 2008*.
- [77] Trivedi, H.; Veeraraghavan, P.; et al. "Routing mechanisms and cross-layer design for Vehicular Ad Hoc Networks: A survey," *IEEE Symposium on Computers & Informatics (ISCI), 2011, pp.243,248, 20-23 March 2011*.
- [78] Jeng-Wei, L.; Chun-Chih, L.; et al. "A hybrid traffic geographic routing with cooperative traffic information collection scheme in VANET," *13th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), 2011, vol., no., pp.1496-1501, 13-16 Feb. 2011*.
- [79] Guoqing, Z.; Dejunet, M.; "A survey on the routing schemes of urban Vehicular Ad Hoc Networks," *27th Chinese Conference Control, 2008., pp.338,343, July 2008*.
- [80] Bernsen, J.; Manivannan, D., "Greedy Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks," *Conference International Wireless Communications and Mobile Computing 2008. IWCMC '08, pp.632, 637, 6-8 Aug. 2008*.
- [81] Naumov, V.; Gross, T. "Connectivity-aware routing (CAR) in vehicular ad-hoc networks," *26th IEEE International Conference on Computer Communications. IEEE INFOCOM 2007, pp. 1919-1927, 2007*.
- [82] Kamini, K.; Kumar, R.; "VANET Parameters and Applications: A Review," *Global Journal of Computer Science and Technology, vol.10, pp 72-77, Sept. 2010*.
- [83] Ulgen, M., Black, J., Johnsonbaugh, B., Klungle, R. "Simulation Methodolgy – A Practitioner's Perspective," *Michigan Simulation User Group, Technical Committee on Simulation Methodology, 2006*.

- [84] Wojcik, V.; "Steps in Simulation and Model Building", Simulation Methodology – Discrete Event Simulation, 2003.
- [85] Varga, A. "The OMNeT++ discrete event simulation system," In Proceedings of the European Simulation Multiconference (ESM'2001), vol. 9, pp. 185-192, June 2001.
- [86] Martinez F.; Toh K.; et al; "A survey and comparative study of simulators for vehicular ad hoc networks (VANETs)," Wireless Communications and Mobile Computing, pag. 813-828, 2011.
- [87] Rehman O.; Bourdoucen H.; et al; "Impact of NS-2 as FOSS Simulation Tool for Research in Vehicular Ad-hoc Networks," Free And Open Source Software Conference, 2013.
- [88] Wang, S. Y., et al. "NCTUns 4.0: an integrated simulation platform for vehicular traffic, communication, and network researches." IEEE 66th Vehicular Technology Conference, 2007. VTC-2007 Fall. 2007.
- [89] Wang, S. Y.; Chou, C. L.; "NCTUns Simulator for Wireless Vehicular Ad Hoc Network Research," a chapter of the "Ad Hoc Networks: New Research" book, Nova Science Publishers.
- [90] Venkata, M.D.; Pai, M.M.M.; Pai, R.M.; Mouzna, J., "Traffic monitoring and routing in VANETs A cluster based approach," 11th International Conference on ITS Telecommunications (ITST), pp.27,32, 23-25, August, 2011.
- [91] Wang, S. Y., Chou, C. L., & Lin, C. C. (2007). "The design and implementation of the NCTUns network simulation engine," Simulation Modelling Practice and Theory, pp. 57-81, 2007.
- [92] Khan, K.; Zaman, R.; "Performance comparison of on-demand and table driven ad hoc routing protocols using NCTUns," In Tenth International Conference on Computer Modeling and Simulation, pp. 336-341, April 2008.
- [93] Wang, S.; Chou, C.; et al.; "OpenFlow Controllers over EstiNet Network Simulator and Emulator: Functional Validation and Performance Evaluation," <http://nsl.csie.nctu.edu.tw/nctuns.html>.
- [94] Wang, S.; Lin, C. "NCTUns 6.0: A Simulator for Advanced Wireless Vehicular Network Research," In IEEE 71st Vehicular Technology Conference 2010 (VTC 2010-Spring), pp. 1-2. 16-19 May 2010.
- [95] Sanjay; B.; Devan; T.; et al ; "Comparative Reliability Analysis of AODV and DSR Protocols in VANET using ESTINET Simulator," Institute of Research Engineers and Doctors,2013.
- [96] Shie-Yuan; W.; Po-Fan; W.; et al ; "Design and implementation of a more realistic radio propagation model for wireless Vehicular Networks over the NCTUns network simulator," Conference Wireless Communications and Networking (WCNC), pp.1937-1942, 2011.
- [97] Shie-Yuan W.; Yu-Wei L.; "Evaluations of intelligent traffic signal control algorithms under realistic landmark-based traffic patterns over the NCTUns network simulator," International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pp.379, 384, 2012.
- [98] Wang S.; Lin Ch.;. "NCTUns 5.0: A network simulator for IEEE 802.11 (p) and 1609 wireless vehicular network researches," IEEE 68th Conference in Vehicular Technology VTC, pp. 1-2, 2008.
- [99] *The GUI User Manual for the EstiNet 8.0 Network Simulator and Emulator*, EstiNet Technologies Inc., Taipei, 2013.

[100] Muñoz Salamanca, M. H.; Respuesta a Derecho de Petición, Secretaría de Tránsito Municipal, Popayán, Cauca, Abril de 2013.