



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

TITULACIÓN DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

**Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de
movilidad para Redes Ad-Hoc Vehiculares
usando mapas reales**

Trabajo de fin de titulación

AUTOR:

Maldonado Narváez, Verónica Elizabeth

DIRECTOR:

Quiñones Cuenca, Manuel Fernando, Ing.

LOJA - ECUADOR

2012

CERTIFICACIÓN

Ing. Manuel Fernando Quiñones Cuenca,
DIRECTOR DEL PROYECTO DE FIN DE TITULACIÓN

CERTIFICA:

Que el proyecto: *Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad para Redes Ad-Hoc Vehiculares usando mapas reales*, realizado por la Srta. *Verónica Elizabeth Maldonado Narváez*; de la titulación de *ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES*, ha sido dirigido y revisado en todas sus partes; por lo mismo, cumple con las exigencias y requisitos legales establecidos por la Universidad Técnica Particular de Loja, quedando autorizada su presentación.

Loja, Octubre de 2012

F. _____

Ing. Manuel Fernando Quiñones Cuenca

Visto Bueno del Coordinador de Titulación

F. _____

Ing. Jorge Luis Jaramillo Pacheco
COORDINADOR DE LA TITULACIÓN DE
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
Octubre, 2012

CESIÓN DE DERECHOS

Yo, *Verónica Elizabeth Maldonado Narváez*; declaro ser autora del presente trabajo y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 67 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja, que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado que se realicen a través, o con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”.

F. _____
Verónica Elizabeth Maldonado Narváez
C.I.: 1104717184

AUTORÍA

Las ideas, opiniones, conclusiones, recomendaciones y demás contenido expuesto en el presente informe de tesis; son de absoluta responsabilidad de la autora.

Queda expresamente señalado que la información de otros autores incluida en el presente, se encuentra debidamente citada en las fuentes de referencia y bibliografía.

F. _____

Verónica Elizabeth Maldonado Narváez

C.I.: 1104717184

DEDICATORIA

A Ti Dios Verdadero, por tu infinito amor que me sostiene en todo momento.

A mi familia, en especial a mis padres y hermanos; que en unidad me han apoyado y alentado siempre a perseverar en las causas buenas aún cuando sobrevienen las dificultades, por ser la lumbre que encendía mi vida cuando estaba a punto de desfallecer.

A mis compañeros de estudio con los que he compartido buenos y malos momentos, por hacer llevadero el aprendizaje con sus bromas y alegrías, por el esfuerzo compartido y porque ciertamente de ellos; también aprendí.

A ustedes, a quienes con gran afecto llamo amigos, por estar pendientes y cuando más se les necesita. Presente les llevo en la mente y en el corazón.

Verónica

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento profundo a Dios, Amigo que nunca falla y siempre acompaña, por permitirme vivir y ver cumplida esta meta; por su gracia y el tesoro invaluable de su amistad.

A mis padres, por su apoyo incondicional y confianza. A mis hermanos, por alentar mi vida; porque cada uno en particular ha ayudado a mantener viva la llama de la esperanza hasta el final. Gracias por creer en mí.

A mi director de tesis: Ing. Manuel Quiñones, por su acertada dirección, su tiempo, su apoyo en la revisión, la motivación y confianza puesta en mi trabajo, y por haber guiado en buena forma; la realización de este proyecto de investigación.

A los ingenieros: Rommel Torres y Katty Rohoden, por dedicar su tiempo a la revisión final de este trabajo y de igual forma; a quienes aportaron positivamente a mi formación personal y académica, no solamente universitaria sino desde mis primeros años de escuela, que sin subir los peldaños uno a uno no se obtiene finalmente lo logrado.

Por último, agradezco muy sinceramente a aquellos amigos y amigas; por su apoyo y compañía, por alegrarse conmigo y marcar huellas profundas e imborrables en mi vida.

Verónica

Resumen

La presente tesis incluye un estudio comparativo de los protocolos de enrutamiento: AODV, DSDV y CBRP, sobre dos escenarios que describen el tráfico vehicular ‘urbano’ en la zona centro de la ciudad de Loja, y ‘en carretera’ tomando como referencia el tramo Catamayo - Loja. Ambos escenarios son generados con Citymob for Roadmaps (C4R), usando mapas reales y aplicando distintos modelos de movilidad: Krauss, Wagner, Kerner e IDM. Se configura la red ad-hoc vehicular (VANET) con interfaces inalámbricas bajo los estándares IEEE: 802.11p y 802.11b, con la intención de obtener resultados que permitan distinguir la tecnología apropiada para cada escenario prueba y a su vez examinar las prestaciones de dichas tarjetas con los protocolos antes citados.

La evaluación de la VANET se efectúa con las métricas: throughput (rendimiento), PDR (relación de entrega de paquetes), average delay (retardo promedio) y NRL (carga de enrutamiento normalizada), mismas que se presentan como resultado de la simulación; mediante tablas y gráficas. El desempeño de la red resulta óptimo cuando se obtienen altos niveles de throughput y PDR, con bajos niveles de retardo y NRL.

Índice general

CERTIFICACIÓN	I
CESIÓN DE DERECHOS	II
AUTORÍA	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
Resumen	VI
Índice de figuras	X
Índice de tablas	XIV
1. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1. Objetivos	1
1.1.1. Objetivo general	1
1.1.2. Objetivos específicos	1
1.2. Justificación	1
1.3. Metodología	2
2. ESTADO DEL ARTE	4
2.1. Introducción	4
2.2. Redes Móviles Ad-Hoc (MANETs)	5
2.3. Redes Ad-Hoc Vehiculares (VANETs)	6
2.3.1. Arquitectura VANET	7
2.3.2. Estándar IEEE 802.11p - WAVE	9
2.3.3. Características	12
2.4. Protocolos de Enrutamiento	13
2.4.1. Destination-Sequenced Distance-Vector (DSDV)	14

2.4.2.	Ad-Hoc On-Demand Distance Vector (AODV)	15
2.4.3.	Cluster Based Routing Protocol (CBRP)	16
2.5.	Modelos de Movilidad	19
2.5.1.	Modelo Krauss	20
2.5.2.	Modelo Wagner	20
2.5.3.	Modelo Kerner	21
2.5.4.	Modelo de Conducción Inteligente - IDM	22
2.6.	Trabajo Relacionado	24
2.7.	Trabajo Futuro	25
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	26
3.1.	Software de simulación	26
3.1.1.	Simulador de Tráfico: CityMob for RoadMaps C4R	28
3.1.2.	Simulador de Red: NS-2	29
3.2.	Preparación de Simuladores	30
3.2.1.	Diagrama de procesos para la simulación	31
3.2.2.	Generación del escenario móvil con C4R	31
3.2.3.	Generación de conexiones de tráfico CBR	35
3.2.4.	Selección del modelo de propagación	36
3.2.5.	Creación del TCL-script en NS-2	36
3.2.6.	Definición de Escenarios	39
3.2.6.1.	Escenario 1: Tráfico vehicular urbano en la ciudad de Loja	39
3.2.6.2.	Escenario 2: Tráfico vehicular en carretera / vía Ca- tamayo - Loja	39
3.3.	Métricas de simulación	39
3.3.1.	Throughput (Rendimiento)	40
3.3.2.	Packet Delivery Ratio (Relación de entrega de paquetes)	40
3.3.3.	Average end to end delay (Retardo promedio)	41
3.3.4.	Normalized Routing Load (Carga de enrutamiento normalizada)	41
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
4.1.	Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 1	44
4.2.	Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 2	53
4.3.	Comparación de escenarios	61

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
5.1. Conclusiones	69
5.2. Recomendaciones	72
Bibliografía	73
ANEXOS	77
A. Instalación del Simulador de Red NS-2	78
A.1. Descarga e instalación de ns-2.34	78
A.2. Configuración de variables de entorno	78
A.3. Validación	79
A.4. Ejecución	80
B. Instalación del Generador de Tráfico CityMob for Roadmaps (C4R)	82
B.1. Instalación de SUMO	82
B.2. Instalación de JDK6 (Java Development Kit)	85
B.3. Configuraciones previas a la ejecución de C4R	86
C. Generación de escenarios con C4R	89
C.1. Creación de un nuevo proyecto	89
C.2. Selección de entorno	89
C.3. Caracterización del escenario	90
C.4. Selección del modelo de movilidad	91
C.5. Generación de las trazas de movilidad	92
C.6. Visualización del escenario generado	93
D. Scripts utilizados para la simulación	94
D.1. Aplicando estándar 802.11p y modelo de propagación Nakagami	94
D.2. Aplicando estándar 802.11b y modelo de propagación Nakagami	97
E. Filtrado AWK de las trazas *.tr	101
E.1. Filtro AWK	103
F. Tabulación de Resultados	105
G. Paper	114

Índice de figuras

1.1. Etapas comprendidas en la fase experimental	3
2.1. Jerarquía general de las redes ad-hoc inalámbricas [11]	5
2.2. a) Redes móviles ad-hoc; b) Redes móviles convencionales	6
2.3. Aquitectura de referencia para redes vehiculares C2C-CC. [13]	7
2.4. Equipamiento para comunicaciones vehiculares: a) Unidad a bordo (OBU), b) Unidad de aplicaciones (AU) [15]	8
2.5. Comunicación vehículo a vehículo (V2V) [14]	8
2.6. Comunicación vehicular: a) Vehículo - Infraestructura (V2I), b) Híbrida (V2V y V2I) [14]	9
2.7. Asignación de espectro para DSRC [18]	10
2.8. Canales disponibles para DSRC [19]	11
2.9. Pila de protocolos de comunicación WAVE [19]	11
2.10. Jerarquía de protocolos de enrutamiento en VANETs [23]	13
2.11. Descubrimiento de ruta del protocolo AODV: (a) Propagación de solicitudes de ruta (RREQs), (b) Respuestas de ruta hacia la fuente (RREPs) [29]	15
2.12. Formación de clusters y enlaces uni y bi-direccionales en CBRP [31]	17
2.13. Ejemplo de optimización de enrutamiento en CBRP [31]	17
2.14. Clases de simulación de tráfico: (a) macroscópica, (b) microscópica, (c) submicroscópica y (d) mesoscópica [33]	19
2.15. Flujo sincronizado: (a) Velocidad media en el tiempo y el espacio, (b) Representación en el plano espacio-tiempo [39]	22
3.1. Relación de C4R con otras aplicaciones [37]	28
3.2. Pila de objetos de dos nodos móviles implementados en NS-2 [52]	29
3.3. Esquema básico funcional de NS-2 en redes móviles	30
3.4. Diagrama de procesos para la simulación y análisis de resultados	31
3.5. Esquema básico funcional de C4R, elaborado con referencia a [34]	32

3.6. Área de simulación del Escenario 1 – Centro urbano de la ciudad de Loja, a) representación en C4R, b) representación en SUMO	33
3.7. Área de simulación del Escenario 2 – Trayecto Catamayo - Loja, a) representación en C4R, b) representación en SUMO	34
3.8. Paquetes entregados exitosamente para diferentes distancias entre emisor y receptor utilizando diferentes modelos de propagación [51] .	36
4.1. Diagrama de procesos para la obtención de resultados	44
4.2. Evaluación de protocolos de enrutamiento con la métrica Throughput sobre el escenario ‘urbano’. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM	45
4.3. Evaluación de Modelos de movilidad con la métrica Throughput sobre el escenario ‘urbano’. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV	46
4.4. Evaluación de protocolos de enrutamiento con la métrica PDR sobre el escenario ‘urbano’. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM	47
4.5. Evaluación de modelos de movilidad con la métrica PDR sobre el escenario ‘urbano’. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV	48
4.6. Evaluación de protocolos de enrutamiento con la métrica Average delay sobre el escenario ‘urbano’. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM	49
4.7. Evaluación de modelos de movilidad con la métrica Average delay sobre el escenario ‘urbano’. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV	50
4.8. Evaluación de protocolos de enrutamiento con la métrica NRL sobre el escenario ‘urbano’. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM	51
4.9. Evaluación de modelos de movilidad con la métrica NRL sobre el escenario ‘urbano’. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV	52
4.10. Evaluación de protocolos de enrutamiento con la métrica Throughput sobre el escenario ‘en carretera’. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM	53
4.11. Evaluación de Modelos de movilidad con la métrica Throughput sobre el escenario ‘en carretera’. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV	54

4.12. Evaluación de Protocolos de enrutamiento con la métrica PDR sobre el escenario ‘en carretera’. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM	55
4.13. Evaluación de Modelos de movilidad con la métrica PDR sobre el escenario ‘en carretera’. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV	56
4.14. Evaluación de Protocolos de enrutamiento con la métrica Average Delay sobre el escenario ‘en carretera’. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM	57
4.15. Evaluación de Modelos de movilidad con la métrica Average Delay sobre el escenario ‘en carretera’. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV	58
4.16. Evaluación de Protocolos de enrutamiento con la métrica NRL sobre el escenario ‘en carretera’. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM	59
4.17. Evaluación de Modelos de movilidad con la métrica NRL sobre el escenario ‘en carretera’. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV	60
4.18. Comparación de escenarios: ‘urbano’ y ‘en carretera’ con la métrica Throughput. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV	62
4.19. Comparación de escenarios: ‘urbano’ y ‘en carretera’ con la métrica PDR. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV	63
4.20. Comparación de escenarios: ‘urbano’ y ‘en carretera’ con la métrica Average delay. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV	64
4.21. Comparación de escenarios: ‘urbano’ y ‘en carretera’ con la métrica NRL. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV	65
A.1. Instalación correcta de ns2.34	79
A.2. Proceso de validación finalizado correctamente	80
A.3. Ejecución del TCL-script	80
A.4. Ejecución del Network Animator - NAM	81
B.1. Descarga del bash script para instalación de SUMO	82
B.2. Edición de ubuntuBuild.sh	83
B.3. Configuración de propiedad de ejecución de ubuntuBuild.sh	83
B.4. Ejecución de ubuntuBuild.sh para instalación de SUMO	84
B.5. Aprobando la sentencia para la construcción de SUMO GUI	84

B.6. Interfaz gráfica de SUMO	85
B.7. Configuración de sun-java6-jre	86
B.8. Aceptación de términos de licencia de sun-java6-jre	86
B.9. Acceso a CityMob for Roadmaps - C4R en ubuntu	87
B.10. Error de acceso a c4r por inexistencia de c4r.cfg	87
B.11. Error de configuración de archivo c4r.cfg	88
B.12. Edición del archivo de configuración c4r.cfg	88
B.13. Citymob for Roadmaps - cuadro de opciones	88
C.1. Creación de un nuevo proyecto en C4R	89
C.2. Seleccionar mapa en OpenStreetMap	89
C.3. Selección del área de simulación para generación del escenario móvil .	90
C.4. Escenario urbano en C4R, con zona de downtown	90
C.5. Escenario urbano en C4R, con zona de downtown	91
C.6. Generación de traza o trazas de movilidad	92
C.7. Simulación de movilidad vehicular proyectada desde SUMO	93
E.1. Ejemplo del nuevo formato de traza *.tr de ns-2	102
E.2. Ejecución de filtrado AWK	102

Índice de tablas

2.1. Parámetros de capa PHY utilizados en IEEE 802.11a y 802.11p [18]	10
2.2. Comparación de protocolos de enrutamiento: AODV, DSDV y CBRP [28, 29, 30]	18
2.3. Parámetros del modelo IDM para simular el comportamiento de tres clases de conductores y de conductores de camión [37]	23
3.1. Simuladores de Tráfico	27
3.2. Simuladores de Red	27
3.3. Simuladores Integrados	27
3.4. Simuladores Híbridos	27
3.5. Requerimientos mínimos para la ejecución de C4R [37]	29
3.6. Parámetros de generación de tráfico - Escenario 1	33
3.7. Parámetros de generación de tráfico - Escenario 2	34
3.8. Especificaciones de hardware de la OBU-102	37
3.9. Especificaciones de la WMIC Cisco 2301	38
3.10. Parámetros de simulación de red - Escenario 1	39
4.1. Análisis del desempeño de AODV en los escenarios: urbano y en carretera	66
4.2. Análisis del desempeño de CBRP en los escenarios: urbano y en carretera	67
4.3. Análisis del desempeño de DSDV en los escenarios: urbano y en carretera	68
E.1. Estructura de un archivo de trazas *.tr [55]	101
E.2. Estructura trazas *.tr dependiendo del tipo de paquete [55]	102
F.1. Resultados con aplicación del modelo de movilidad Krauss sobre el escenario 1 - ‘urbano’	106
F.2. Resultados con aplicación del modelo de movilidad Wagner sobre el escenario 1 - ‘urbano’	107

F.3. Resultados con aplicación del modelo de movilidad Kerner sobre el escenario 1 ‘urbano’	108
F.4. Resultados con aplicación del modelo de movilidad IDM sobre el escenario 1 - ‘urbano’	109
F.5. Resultados con aplicación del modelo de movilidad Krauss sobre el escenario 2 - ‘en carretera’	110
F.6. Resultados con aplicación del modelo de movilidad Wagner sobre el escenario 2 - ‘en carretera’	111
F.7. Resultados con aplicación del modelo de movilidad Kerner sobre el escenario 2 - ‘en carretera’	112
F.8. Resultados con aplicación del modelo de movilidad IDM sobre el escenario 2 - ‘en carretera’	113

1

ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Comparar protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad para Redes Ad-Hoc Vehiculares, usando mapas reales.

1.1.2. Objetivos específicos

- Elaborar el Estado del Arte
- Generar escenarios de movilidad, basados en mapas reales.
- Simular protocolos de enrutamiento.
- Simular modelos de movilidad.
- Analizar los resultados obtenidos.

1.2. Justificación

Actualmente la tendencia de las comunicaciones inalámbricas apunta a la expansión de las mismas sobre escenarios diversos y de topología cambiante, fundamentalmente sobre aquellos que reúnen condiciones de movilidad permanente; como es el caso de las redes vehiculares.

Comúnmente los clientes móviles (vehículos), utilizan tecnologías radio para conectarse a una estación base BS¹; que controla las comunicaciones de los vehículos que se encuentren dentro de su área de cobertura, y fuera de ella mediante un proceso denominado handover². Sin embargo las redes móviles adhoc, específicamente las VANETs, hacen posible una comunicación descentralizada entre los vehículos, mediante enlaces inalámbricos que se establecen de forma autónoma y cuya permanencia puede ser garantizada por los protocolos de enrutamiento, razón por la cual siguen siendo objeto de investigación y desarrollo.

Aunque la mayoría de estudios y simulaciones VANET, están sobre la base del estándar IEEE 802.11b; dada la aprobación del IEEE 802.11p - WAVE, se justifica el análisis y comparación del desempeño de los protocolos de enrutamiento sobre esta nueva plataforma. Sin embargo, no se descarta la simulación con el estándar 802.11b, por cuanto la disponibilidad de las tarjetas inalámbricas es relativamente mayor a las del estándar 802.11p, diseñado exclusivamente para VANETs.

Además, cabe señalar que tomando en cuenta los resultados de algunos estudios expuestos en [46], se considera la aplicación del modelo de propagación *Nakagami*³ para escenarios de tráfico urbano e interurbano. [50]. Los escenarios son generados a partir de mapas reales de la localidad (ciudad de Loja), con ajuste de los parámetros de simulación a lo señalado.

1.3. Metodología

En esta sección, se describe la forma en que se dará cumplimiento a los objetivos propuestos en el actual proyecto de tesis. La metodología divide la investigación en dos fases claramente definidas: explorativa y experimental.

En la fase explorativa, se realiza la investigación de trabajos relacionados, tales como: proyectos de tesis, revistas y publicaciones científicas, papers e informes técnicos, disponibles en la red de Internet; los cuales servirán de referencia para extraer las ideas principales y determinar los tópicos que formarán parte del Estado del Arte, a fin de abordar el tema con absoluta claridad. Al término de esta fase, se habrá cumplido con el primer objetivo propuesto en esta investigación.

¹http://es.wikipedia.org/wiki/Estaci%C3%B3n_base

²<http://es.wikipedia.org/wiki/Handover>

³<http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr03/ricenaka/nakagami.htm>

La fase experimental, involucra el seguimiento de tres etapas (figura 1.1) que sostienen el proceso fundamental para la consecución de los demás objetivos:

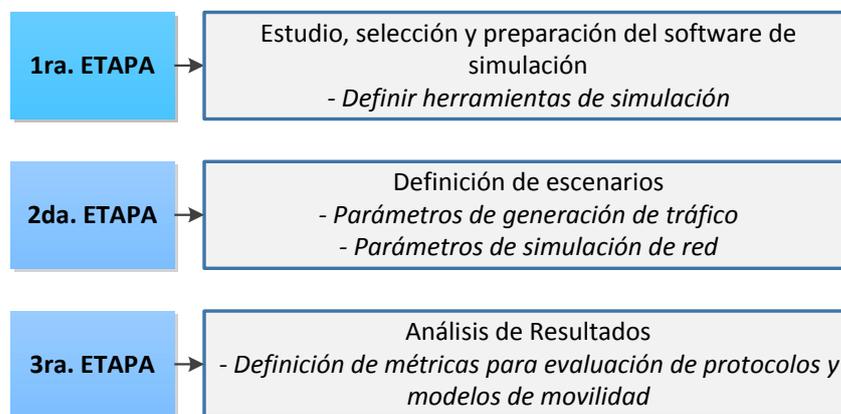


Figura 1.1: Etapas comprendidas en la fase experimental

En la etapa inicial, se investigan las posibles herramientas de simulación tanto de tráfico como de red; que permitan integrar detalles de movilidad de los vehículos sobre la carretera. Además para la selección, se considera que las trazas de movilidad arrojadas por el simulador de tráfico; sean compatibles y manejables con el simulador de red. Entonces, tomando en cuenta dichos criterios se han seleccionado para este estudio las herramientas: *Citymob for Roadmaps (C4R)* y *NS-2*.

En la segunda etapa, se definen los escenarios y parámetros específicos para la simulación, es la parte que requiere más cuidado; puesto que se trata de reproducir las condiciones reales de movilidad de los vehículos, posicionamiento, y las interfaces de comunicación con las que se han equipado. Para tales especificaciones se elaboran tablas, acompañadas de una breve descripción del escenario a simular.

Finalmente se presentan gráficas, que en función de las métricas; permiten evaluar la red, relacionando los diversos protocolos de enrutamiento y analizando además el comportamiento de cada uno de ellos, sobre distintos modelos de movilidad. Los *protocolos de enrutamiento* que se utilizan son: *AODV*, *DSDV* y *CBRP*. Los *modelos de movilidad* que se evalúan, son los incorporados en el simulador de tráfico *Citymob for Roadmaps (C4R)*, mismos que hacen referencia a los investigados y desarrollados por los siguientes autores: *S. Krauss*, *P. Wagner*, *Kerner* y *Treiber*.

2

ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

La conectividad inalámbrica ha experimentado una amplia evolución en los últimos diez años, el concepto de ubicuidad direcciona su crecimiento de una manera totalmente independiente de la ubicación; ejemplo inicial de esto, fue la evolución tecnológica a partir de los dispositivos conectados a dispositivos híbridos: smartphones, PDAs y tablets. La tendencia de conectividad se está extendiendo a otros dispositivos, como televisores, equipos de audio y vehículos [1].

El hecho de conseguir comunicación inalámbrica entre los vehículos, ha despertado el interés de industrias de automoción y el de entidades públicas y privadas que se ocupan de la gestión del tráfico. La mayoría de aportes provienen de países europeos [2], norteamericanos [3] y el Japón [4], grupos como: CVIS¹, DCAITI² y Walkie-Talkie³ llevan a cabo amplias investigaciones, con la intención principal de desarrollar aplicaciones que requieran altos niveles de conectividad y que contribuyan a un transporte más seguro y eficiente, de las cuales se mencionan: seguridad activa, detección de accidentes, gestión de tráfico (control de velocidad), rutas inteligentes (selección de rutas alternas en caso de detección de averías), gestión de flotas, monitoreo de vehículos, entretenimiento, confort y servicios dirigidos a reducir las emisiones de CO₂; a fin de conseguir un transporte más ecológico [5]. Estas aplicaciones dependen de la eficiente comunicación cooperativa, tanto en el dominio ad-hoc (V2V) como en el dominio infraestructura (V2I) que se tratarán más adelante.

¹<http://www.cvisproject.org/>

²<http://www.dcaiti.tu-berlin.de/>

³<http://www.grc.upv.es/walkietalkie/index.html>

En éste capítulo, se presenta una breve descripción de las Redes Móviles Ad-Hoc (MANETs) y a mayor profundidad se trata el tema de las Redes Ad-Hoc Vehiculares (VANETs), considerando que la investigación se basa en la comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad, que permitan describir dichos entornos de manera realista mediante la utilización de mapas. Por lo mismo, se definen los protocolos de enrutamiento que se usan en este estudio; y los modelos de movilidad desarrollados por diversos autores, para aportar a los simuladores de tráfico; aproximaciones del patrón de movimiento de los vehículos. Finalmente, se destacan los trabajos relacionados que se han llevado a cabo hasta el momento y el trabajo futuro, o las tendencias previstas por esta línea de investigación.

2.2. Redes Móviles Ad-Hoc (MANETs)

Tomando como referencia la jerarquía básica de las redes inalámbricas ad-hoc, en la figura 2.1, se identifican sus diversas categorías: Wireless Mesh Network(WMN), Wireless Sensor Network (WSN) y Mobile Adhoc Networks (MANET), todas ellas obedecen al concepto de comunicación nodo a nodo relativo a ad-hoc, sin embargo estas últimas son de interés para este tema, por cuanto ofrecen altos niveles de movilidad para el despliegue de las comunicaciones móviles.

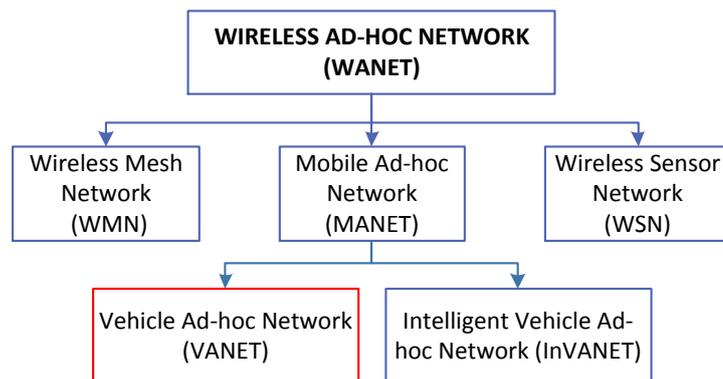


Figura 2.1: Jerarquía general de las redes ad-hoc inalámbricas [11]

Las MANETs, constituyen una colección autónoma de dispositivos móviles portátiles que se comunican entre si a través de enlaces inalámbricos de forma coordinada y distribuida. A diferencia de las redes con infraestructura, las MANETs no precisan de una infraestructura para su operación; (figura 2.2) más bien, se conciben como redes que se forman sin ninguna administración central, donde cada nodo emplea

un patrón de movilidad diferente y usa una interfaz inalámbrica para enviar paquetes de datos [7]. No obstante, la conectividad entre los nodos adyacentes dentro de una MANET, resulta intermitente y esporádica; a causa de las condiciones de propagación de radio, que varían con el tiempo y la posición [8].

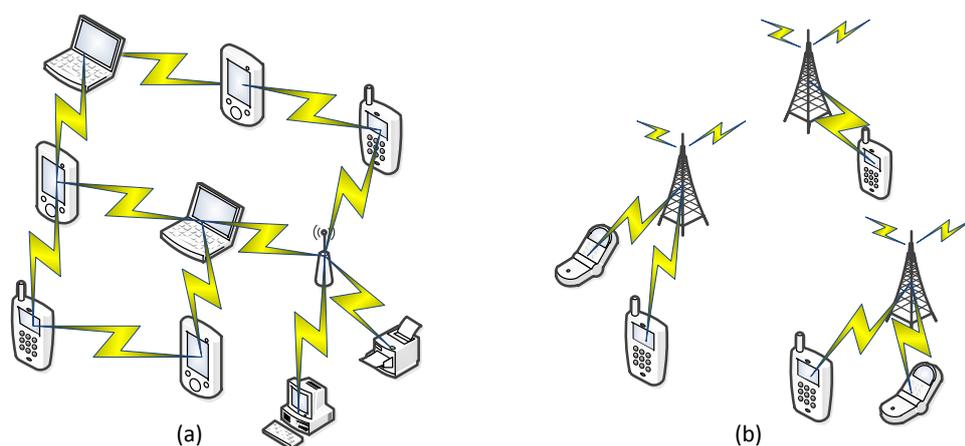


Figura 2.2: a) Redes móviles ad-hoc; b) Redes móviles convencionales

En resumen, los nodos de una MANET, realizan funciones que incluyen operaciones de enrutamiento, direccionamiento, seguridad, control de energía y administración de ancho de banda, pudiendo el sistema MANET funcionar en forma aislada, o asociada a una red convencional fija [6, 7].

Ahora, con la finalidad de diferenciar los entornos característicos de MANETs y VANETs, se presentan los detalles de éstas últimas.

2.3. Redes Ad-Hoc Vehiculares (VANETs)

Las redes adhoc vehiculares, como bien se observó en la figura 2.1, se consideran un subconjunto de las MANETs, pues propiamente son redes que se crean de forma espontánea, con el movimiento de vehículos equipados con interfaces inalámbricas (OBUs - On Board Units), que les permiten comunicarse unos con otros [12]. De no ser posible la comunicación directa entre dos vehículos (fuente y destino), se usa la técnica multi-hop (múltiples saltos) para enviar los paquetes de datos de vehículo a vehículo hasta alcanzar el destino correspondiente [8].

2.3.1. Arquitectura VANET

La arquitectura VANET de referencia, propuesta por el Car-to-Car Communication Consortium (C2C-CC)¹ que se aprecia en la figura 2.3; distingue tres dominios de comunicación en las redes vehiculares: *Dominio en Vehículo*, *Dominio Adhoc* y *Dominio Infraestructura*

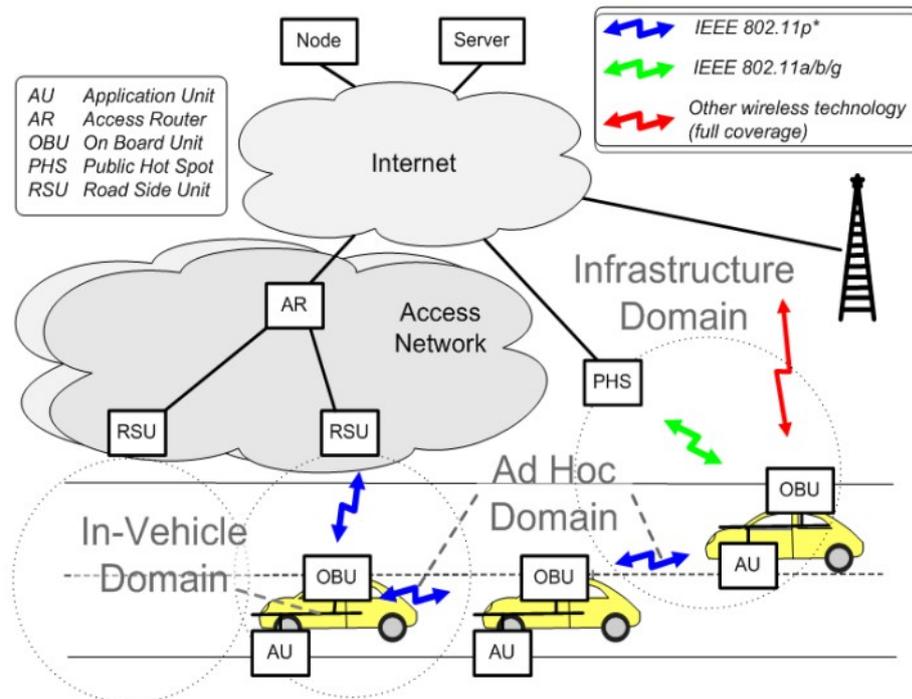


Figura 2.3: Aquitectura de referencia para redes vehiculares C2C-CC. [13]

- El **dominio en vehículo**, se refiere a una red local dentro de cada vehículo, compuesta lógicamente por dos tipos de unidades (figura 2.4): la On-Board Unit (OBU) y la Applications Unit (AU). Una OBU es un dispositivo en el vehículo, que tiene capacidades de comunicación inalámbrica o cableada y la AU, es un dispositivo que ejecuta una o múltiples aplicaciones; mientras hace uso de las capacidades de comunicación de la OBU [12]. Ejemplo de AUs pueden ser los computadores portátiles, PDAs, smartphones, que se conectan de forma dinámica a una OBU, o también algún dispositivo integrado (sensores) como parte del vehículo, conectado a ella de forma permanente. Esta conexión entre las dos unidades, a más de la conexión directa por cable; es posible de forma inalámbrica utilizando por ejemplo: Bluetooth², WUSB³ o UWB⁴.

¹<http://www.car-to-car.org/>

²<http://tecnio.com/bluetooth/>

³<http://www.xataka.com/otros/wireless-usb>

⁴<http://www.intel.com/technology/comms/uwb/download/ultra-wideband.pdf>



Figura 2.4: Equipamiento para comunicaciones vehiculares: a) Unidad a bordo (OBU), b) Unidad de aplicaciones (AU) [15]

- El **dominio ad-hoc**, se refiere a una comunicación vehículo a vehículo (V2V) sin apoyo de la red de infraestructura (figura 2.5). Aquí la red se compone por los vehículos equipados con OBUs y las RSUs que se fijan a lo largo de la carretera, para mejorar la seguridad vial; mediante la ejecución de aplicaciones especiales, o el envío, recepción y retransmisión de datos a las unidades vehiculares. Las OBUs de diferentes vehículos forman la red ad-hoc móvil (MANET), donde cada OBU integra características inalámbricas de comunicación; homogéneas o heterogéneas, que definen el rango de cobertura o limitan la propagación [12]. La integración de OBUs y RSUs; puede interpretarse como la agrupación de nodos móviles y estáticos de una red ad-hoc respectivamente.

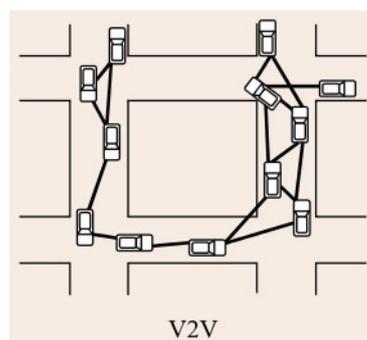


Figura 2.5: Comunicación vehículo a vehículo (V2V) [14]

- El **dominio infraestructura**, como su nombre lo indica; se refiere a la comunicación vehicular, con soporte de la red de infraestructura. El acceso a ella, puede ser por intermedio de las RSUs y hotspots públicos, comerciales o privados; o también aprovechando las capacidades de comunicación de las redes celulares y tecnologías radio (GSM, GPRS, UMTS, WIMAX) integradas como parte del equipamiento OBU de las unidades vehiculares, en caso de que

los terminales RSUs y hotspots sean insuficientes [12].

Ahora bien, como soporte de comunicación para los dominios adhoc e infraestructura; se emplean tecnologías inalámbricas diversas: la convencional WLAN basada en el estándar IEEE 802.11, la comunicación dedicada de corto alcance (DSRC¹); y la tecnología GPRS²/UMTS³ [8, 16].

En el dominio infraestructura se distingue además un modelo híbrido, en donde coexisten las comunicaciones vehículo a vehículo (V2V), vehículo a infraestructura (V2I) y viceversa (figura 2.6).

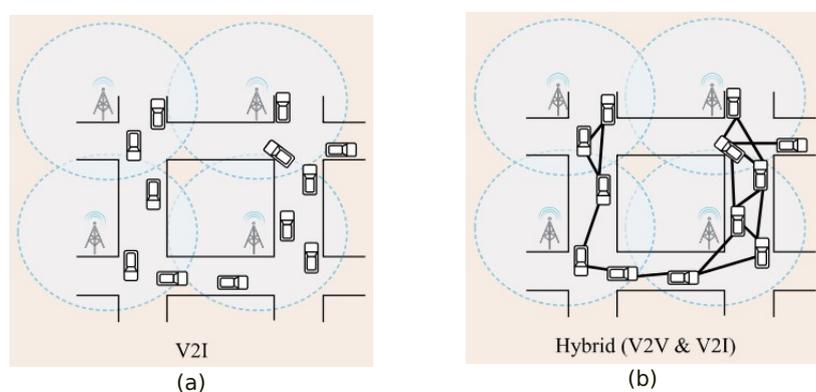


Figura 2.6: Comunicación vehicular: a) Vehículo - Infraestructura (V2I), b) Híbrida (V2V y V2I) [14]

Una vez conocida la arquitectura de referencia para las redes vehiculares, se pone de manifiesto que la perspectiva de esta investigación, y los resultados de la misma, son considerables expresamente para la *comunicación vehicular en el dominio ad-hoc*. Entonces, antes de pasar a las características de las VANETs; es importante conocer el progreso de la estandarización IEEE⁴ en WAVE (Wireless Ad-Hoc Vehicular Environment).

2.3.2. Estándar IEEE 802.11p - WAVE

Los principales logros en este estándar, han sido proporcionar disponibilidad del espectro de frecuencias y reducir la tasa de fallos; como garantía para la seguridad de las aplicaciones en entornos vehiculares [17]. El protocolo 802.11p, constituye la base para comunicaciones dedicadas de corto alcance (DSRC) y de los Sistemas de

¹http://www.standards.its.dot.gov/Documents/advisories/dsrc_advisory.htm

²<http://searchmobilecomputing.techtarget.com/definition/GPRS>

³<http://searchmobilecomputing.techtarget.com/definition/UMTS>

⁴<http://standards.ieee.org/findstds/standard/802.11p-2010.html>

2.3 Redes Ad-Hoc Vehiculares (VANETs)

Transporte Inteligente (ITS), cuya visión final; es permitir la comunicación en cada uno o simultáneamente en todos los dominios de conexión expuestos en el apartado anterior. La asignación del espectro para DSRC en el mundo, se muestra en la figura 2.7.

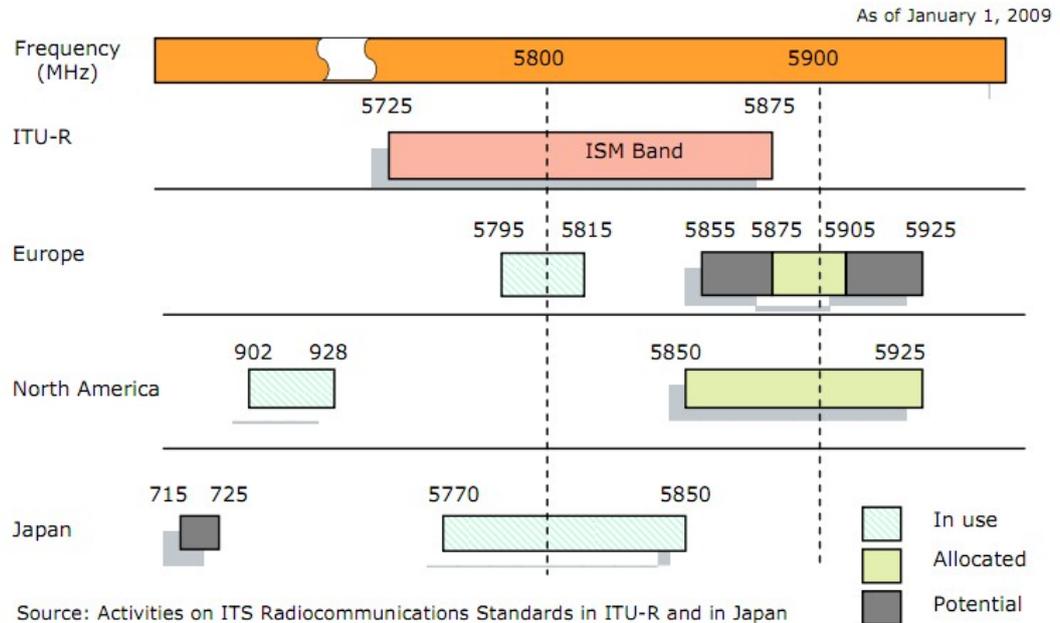


Figura 2.7: Asignación de espectro para DSRC [18]

Las modificaciones a nivel de capa física (PHY) y de acceso al medio (MAC), aseguran una conexión robusta y una rápida configuración, que responde a la alta movilidad de los nodos vehiculares. Tales modificaciones, están dadas sobre la base del estándar 802.11a, por lo tanto también utiliza OFDM; como técnica de modulación, a mas de las diferencias expuestas en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Parámetros de capa PHY utilizados en IEEE 802.11a y 802.11p [18]

Parameters	IEEE 802.11a	IEEE 802.11p half clocked mode	Changes
Bit rate (Mbit/s)	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, 27	Half
Modulation mode	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	No change
Code rate	1/2, 2/3, 3/4	1/2, 2/3, 3/4	No change
Number of subcarriers	52	52	No change
Symbol duration	4 μ s	8 μ s	Double
Guard time	0.8 μ s	1.6 μ s	Double
FFT period	3.2 μ s	6.4 μ s	Double
Preamble duration	16 μ s	32 μ s	Double
Subcarrier spacing	0.3125 MHz	0.15625 MHz	Half

2.3 Redes Ad-Hoc Vehiculares (VANETs)

La banda de frecuencias asignada, se divide en siete canales no solapables de 10Mhz cada uno, donde cuatro de ellos son de servicio (SCH), uno para evasión de accidentes y seguridad de vida, otro para altas potencias de largo alcance y el que resta se reserva para la difusión de los mensajes de control (CCH), figura 2.8.

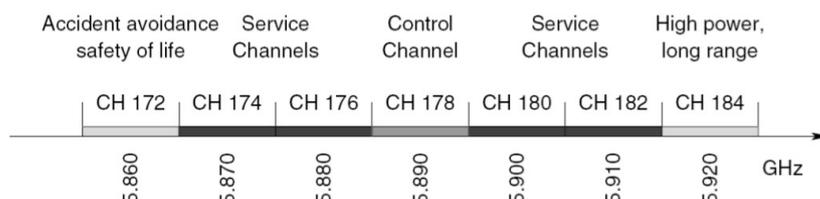


Figura 2.8: Canales disponibles para DSRC [19]

En la capa MAC, WAVE utiliza el método de acceso, basado en CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance) para contrarrestar el problema del nodo oculto, manteniendo igualmente el intercambio de mensajes RTS/CTS, para sensar si el canal está libre u ocupado, antes de iniciar la transferencia de los paquetes de datos. Además la capa MAC de 802.11p, está basada en las extensiones EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) y QoS (Calidad de Servicio) del IEEE 802.11e, para establecer prioridades de tráfico y calidad de servicio respectivamente; por lo tanto los mensajes de aplicación se clasifican en distintas categorías de acceso (ACs), donde AC0 tiene baja prioridad y AC3 la prioridad más alta [20].

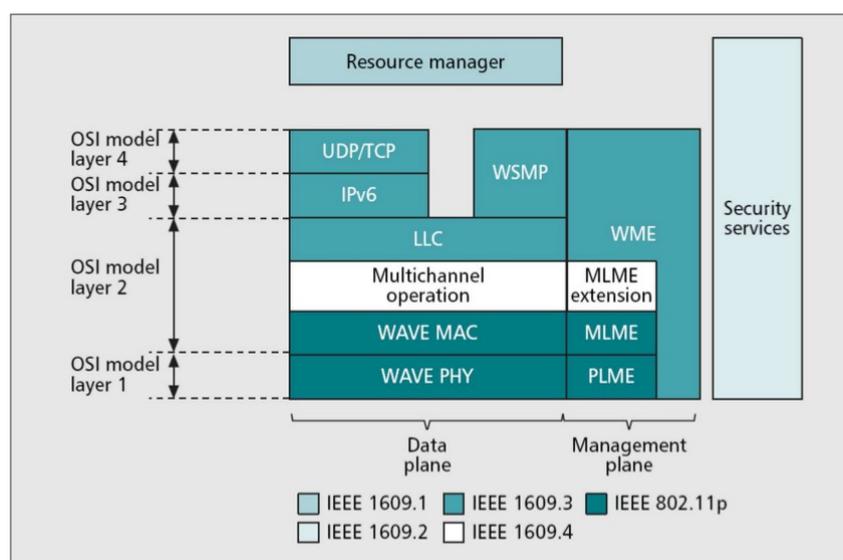


Figura 2.9: Pila de protocolos de comunicación WAVE [19]

En la figura 2.9, se pueden identificar las normas que operan sobre cada conjunto de capas de la red; con referencia al modelo OSI. El IEEE 1609.1¹ define un

¹http://www.standards.its.dot.gov/fact_sheet.asp?f=80

administrador de recursos, encargado de arbitrar las solicitudes de comunicación de los dispositivos Rx/Tx, el IEEE 1609.2 define el tema de seguridad en el formato, procesamiento e intercambio de mensajes. La canalización y las capas superiores a la pila de red; están definidas por el estándar IEEE 1609.4 e IEEE 1609.3 respectivamente y las especificaciones de capa física (PHY) y de control de acceso al medio (MAC), están dadas por el estándar IEEE 802.11p [20, 21].

2.3.3. Características

Aunque las VANETs son consideradas un subconjunto de las MANETs, poseen características bien diferenciadas [12, 22]. Así tenemos:

1. *Energía ilimitada:* Los inconvenientes de alimentación de los dispositivos móviles, no constituyen una limitación importante para las redes vehiculares, ya que el propio nodo (vehículo); puede proporcionar energía permanente a los dispositivos informáticos y de comunicación.
2. *Mayor capacidad computacional:* En efecto, las redes vehiculares requieren a menudo brindar mayores capacidades de detección, comunicación y cómputo.
3. *Movilidad Predecible:* Por lo general los vehículos tienden a tener movimientos de fácil predicción, al estar limitados por el diseño de las carreteras. Con la tecnología GPS, es posible conocer la posición exacta del vehículo, con esta información y sabiendo además la trayectoria y velocidad de desplazamiento del mismo, se puede predecir su posición futura.
4. *Escala potencialmente grande:* las redes vehiculares se extienden sobre toda la red vial, aumentando de tal forma el tamaño de la red; esto implicaría la participación de un elevado número de nodos, que requieren niveles de potencia elevados para ampliar su rango de cobertura y mantener las comunicaciones.
5. *Alta Movilidad:* Las redes vehiculares operan sobre un entorno altamente dinámico. Los vehículos en las carreteras viajan a velocidades muy altas (relativamente 100Km/h en autopistas y 60Km/h en la ciudad), lo cual conlleva a predecir que el periodo de comunicación inter-vehicular pueda ser muy corto. Los incrementos de velocidad ocurren cuando la densidad vehicular es baja y si ésta aumenta (especialmente en horas pico) la velocidad consecuentemente disminuye. Las altas velocidades pueden ocasionar tablas de enrutamiento hacia los nodos vecinos; obsoletas, es decir la decisión de envío podría ser incorrecta, debido a las entradas antiguas o inexistentes en la tabla.

6. *Partición de Red:* Debido a la naturaleza dinámica del tráfico, las redes vehiculares se particionan con frecuencia. Por ejemplo en escenarios de baja densidad poblacional (zonas rurales), el tráfico puede llegar a ser tan escaso y por lo tanto haber varios clusters de nodos aislados.
7. *Topología y conectividad de red:* Dado que los vehículos se mueven y cambian de posición constantemente, los escenarios son muy dinámicos y tanto la topología, como los enlaces de conexión y desconexión, cambian con frecuencia. El grado de conectividad a la red, depende en gran medida de la gama de conexiones inalámbricas y el número de los vehículos participantes, es decir no todos los vehículos en la carretera; podrían estar equipados con interfaces inalámbricas de comunicación (OBUs).

2.4. Protocolos de Enrutamiento

Los protocolos de enrutamiento son algoritmos útiles para descubrir las rutas entre el origen y el destino. Su importancia es tal, que son los responsables de determinar la forma de retransmitir los paquetes de datos al destino correspondiente, de ajustar la rutas de acceso en casos de fallo y de registrar los datos de conectividad. En el contexto de las redes vehiculares, el diseño de protocolos de enrutamiento es una tarea especialmente difícil; debido a la alta movilidad de los nodos, el gran tamaño de la red y la comunicación intermitente [23, 24]. En la figura 2.10 se puede apreciar algunos protocolos de enrutamiento que operan sobre VANETs, los cuales se han clasificado según su topología, posición, movimiento, mapas y tráfico consciente.

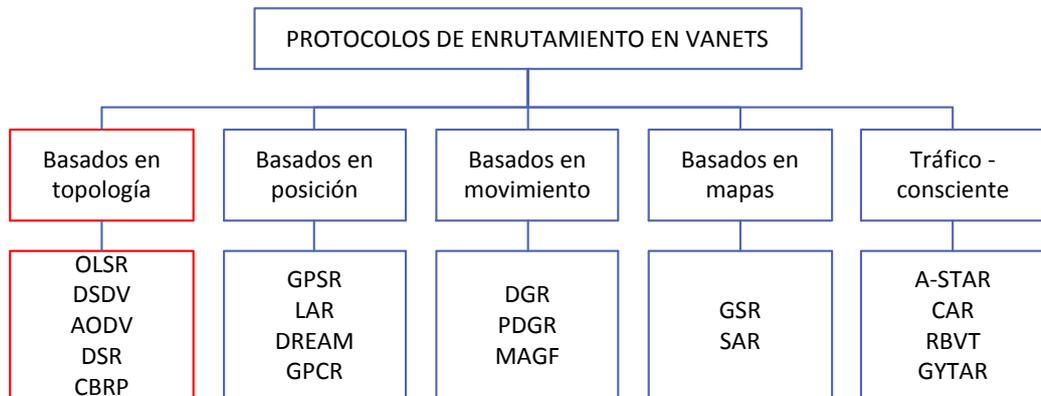


Figura 2.10: Jerarquía de protocolos de enrutamiento en VANETs [23]

Como una primera base de intentos, se han empleado protocolos de enrutamiento diseñados para MANETs; estos son basados en topología y aunque no reúnen las cualidades suficientes para operar en los entornos VANET, suelen ser ampliamente considerados debido a que su mayoría se encuentran integrados en las herramientas de simulación de red más conocidas y utilizadas para el estudio de comunicaciones vehiculares en el dominio ad-hoc, como son: NS-2, OMNET++ y NS-3 [23].

Los protocolos de enrutamiento basados en topología, tratan de establecer un balance entre el descubrimiento de las posibles rutas y el conservar un mínimo nivel de overhead (sobrecarga de enrutamiento). Para su estudio; se los ha dividido en tres grupos: *proactivos*, *reactivos*, e *híbridos*: [10, 25] los *proactivos* construyen tablas de enrutamiento basadas en la información de conectividad actual de los nodos; es decir, las consultas o actualizaciones entre los vecinos se efectúan de forma permanente, los *reactivos* inundan la red con paquetes de consulta o actualizaciones; para encontrar la ruta hacia los nodos de destino únicamente bajo demanda y los *híbridos*, combinan estrategias proactivas y reactivas, dividiendo la red en zonas denominadas “clusters”, sobre las cuales el protocolo se ejecuta en modo proactivo y fuera de ellas “interclusters”, lo hace en modo reactivo; dicha particularidad hace que por lo general, sean aplicables en redes de gran extensión [24].

2.4.1. Destination-Sequenced Distance-Vector (DSDV)

Es un protocolo unicast proactivo; adaptado del tradicional RIP (Routing Information Protocol), por lo tanto; al igual que éste elige el camino más corto basándose en el menor número de saltos hasta el destino correspondiente [26].

Funcionamiento

En DSDV [27], cada nodo móvil mantiene una tabla de enrutamiento, que incluye: una lista de todos los destinos disponibles, la métrica de salto y un número de secuencia generado por el nodo destino. Esta información en la tabla, es usada por cada nodo en la red para descubrir, establecer y mantener las rutas hacia el destino; en función de lo siguiente:

- Los números de secuencia más altos corresponden a rutas más fiables, por lo tanto la ruta que lo posea se toma en cuenta para determinar la forma de llegar al destino, pues se considera que ha sido la más reciente en la tabla.
- Los números de secuencia identificados con número ‘par’ señalan una ruta con destino alcanzable, los que aparecen con número ‘impar’ indican lo contrario.

- Cuando entre dos posibles rutas hay empate en el valor del número de secuencia, se toma la de menor distancia al destino; es decir la que lo alcance con un menor número de saltos.

2.4.2. Ad-Hoc On-Demand Distance Vector (AODV)

AODV¹ pertenece al grupo de protocolos reactivos, y se ha construido sobre la base del protocolo DSDV, estableciendo mejoras en cuanto a la reducción del número de paquetes broadcast; requeridos para la creación de rutas desde la fuente al destino.

Funcionamiento

La operación de AODV en el enrutamiento, se basa en el manejo de tres tipos de mensajes que se reciben a través de UDP: solicitudes de ruta (RREQs), respuestas de ruta (RREPs) y errores de ruta (RERRs).

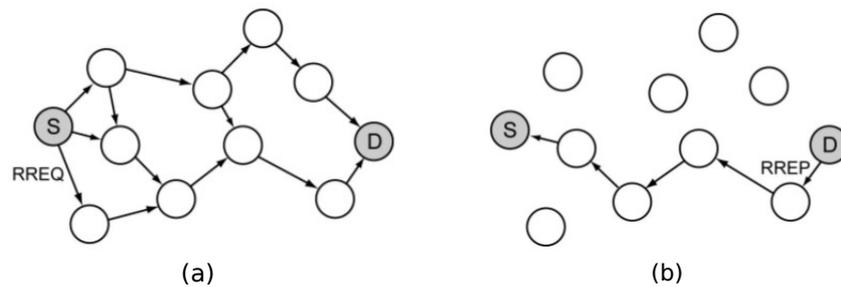


Figura 2.11: Descubrimiento de ruta del protocolo AODV: (a) Propagación de solicitudes de ruta (RREQs), (b) Respuestas de ruta hacia la fuente (RREPs) [29]

Mientras los extremos finales de una comunicación disponen de rutas válidas entre sí; AODV no desempeña ningún papel, su acción empieza cuando es necesario establecer la ruta hacia un nuevo destino. Entonces, en primer lugar se realiza el descubrimiento de ruta (figura 2.11) a partir de la multidifusión de mensajes RREQs desde la fuente S, hacia los demás nodos en la red. Cada nodo receptor de RREQs, almacena una ruta inversa hacia el nodo fuente, que luego es utilizada para la unidifusión de mensajes RREPs por parte del nodo que posea la entrada hacia el destino D. De igual manera cada nodo receptor de un RREP, almacena una entrada hacia el destino D; que apunta al nodo que les ha transmitido el mensaje, de modo que en las tablas de cada nodo únicamente se guarda el siguiente salto y no la ruta completa. Si pasado un tiempo, no se ha recibido ningún RREP; se asume que no hay rutas

¹<http://tools.ietf.org/html/rfc3561>

válidas en ese momento.

Los nodos además monitorean el estado del enlace de los siguientes saltos en las rutas activas y si detectan que alguno se ha roto, utilizan los mensajes RERR, para notificar a los demás nodos la pérdida de dicho enlace. Adicionalmente, AODV envía mediante broadcast; mensajes “Hello” para mantener la conectividad local de los nodos, es decir sirven para mantener actualizada su tabla de vecinos.

2.4.3. Cluster Based Routing Protocol (CBRP)

CBRP¹, es un protocolo de enrutamiento perteneciente al grupo de protocolos híbridos, diseñado para su uso en redes móviles ad-hoc. El protocolo divide los nodos en conjuntos disjuntos de dos saltos de diámetro denominados “clusters”; que pueden superponerse entre si, cada grupo elige una cabeza de grupo “clusterhead” que se encarga de mantener la información de pertenencia de los nodos al grupo y del proceso de enrutamiento [31].

Funcionamiento

La operación de CBRP es completamente distribuida y se basa principalmente en los siguientes componentes: formación de clusters, descubrimiento de adyacencias al cluster y enrutamiento.

- 1. Formación de clusters.-** Para esta tarea, cada nodo mantiene una tabla donde almacena información de sus nodos vecinos, como es la identidad (el papel del nodo en el cluster: “clusterhead” o miembro del cluster) y el estado del enlace de ese nodo (uni o bi-direccional). La tabla de vecinos se mantiene actualizada mediante la difusión de mensajes “Hello”, que contienen información sobre el estado del nodo, la tabla de vecinos y la tabla de adyacencias al cluster.

Un nodo puede ser “clusterhead” en la ad-hoc, si posee el ID más bajo y algún enlace bi-direccional en su tabla de vecinos. En la figura 2.12 los nodos sombreados son “clusterheads”.

- 2. Descubrimiento de adyacencias al cluster.-** Este proceso lo lleva a cabo el “clusterhead” con el objetivo de descubrir todos los enlaces bi-direccionales vinculados en sus agrupaciones adyacentes, para ello utiliza la información de sus “clusterheads” vecinos que cada nodo mantiene en su tabla de adyacencias al cluster (CAT).

¹<http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-cbrp-spec-01>

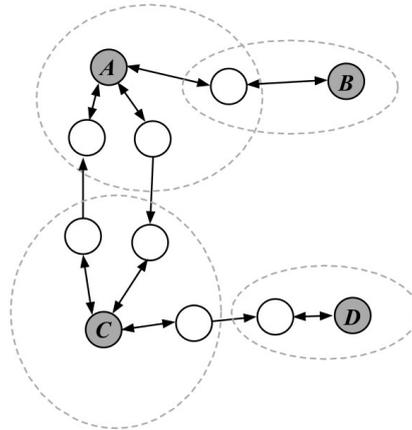


Figura 2.12: Formación de clusters y enlaces uni y bi-direccionales en CBRP [31]

- 3. Enrutamiento.-** Se realiza en dos pasos: primero descubre la ruta desde el nodo fuente al destino y luego enruta los paquetes. La diferencia con otros protocolos radica en que CBRP es capaz de reparar rutas defectuosas, si los siguientes nodos de la ruta se encuentran en la base de datos de la topología mantenida al radio de dos saltos, y también haciendo uso de esta misma información, es capaz de optimizar el enrutamiento mediante el acortado de rutas, si en el camino encuentra un sucesor directo hacia el destino (figura 2.13).

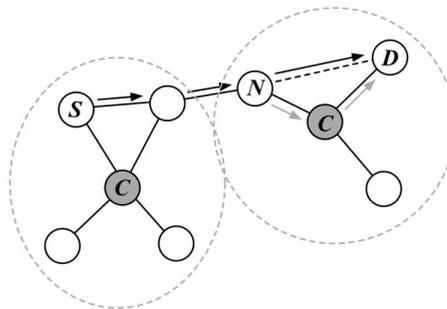


Figura 2.13: Ejemplo de optimización de enrutamiento en CBRP [31]

Seguidamente en la tabla 2.2, se presenta una breve comparación de los protocolos de enrutamiento analizados.

Tabla 2.2: Comparación de protocolos de enrutamiento: AODV, DSDV y CBRP [28, 29, 30]

PARÁMETRO	AODV	DSDV	CBRP
<i>Tipo de protocolo</i>	Reactivo	Proactivo	Híbrido
<i>Mensajes de control</i>	RREQ, RREP, RRER	HELLO & Update	HELLO, RREQ, RREP, RRER
<i>Administración Central</i>	No	No	“clusterhead”
<i>Descubrimiento de ruta</i>	Cada nodo fuente envía broadcast de RREQs bajo demanda	Ya posee información hacia todos los destinos	Ya posee información de los vecinos dentro del cluster, pero envía broadcast bajo demanda entre clusters
<i>Forma de construir la ruta</i>	Cada receptor de RREQs, mantiene un puntero hacia atrás que es usado por los mensajes RREPs para el trazado de ruta hacia el destino	El siguiente salto es calculado por la tabla de enrutamiento de vecinos hasta alcanzar el destino	Mediante tabla de enrutamiento dentro del cluster y bajo demanda entre clusters
<i>Enrutamiento sin bucles</i>	Si	Si	Si
<i>Tipo de enrutamiento</i>	salto a salto	salto a salto	fuentes de enrutamiento
<i>Soporte de enlaces</i>	Simétrico	Simétrico	Simétrico, selectivo, asimétrico
<i>Escalabilidad</i>	Si, pero vulnerable a cambios de la red	No	Si, pero puede llegar a introducir demasiado overhead
<i>Métrica</i>	Ruta más corta	Ruta más corta	Ruta más corta
<i>Ventajas</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo overhead - Soporte de mensajes unicast, multicast y broadcast. - Bajo consumo de recursos 	<ul style="list-style-type: none"> - Baja probabilidad de colisiones - Alto rendimiento y bajo retardo en redes pequeñas - Mantiene sólo la mejor ruta hacia el destino 	<ul style="list-style-type: none"> - Baja demanda para el descubrimiento de rutas (clustering) - Reparación de enlaces rotos a nivel local - Optimización de enrutamiento con el acortado de rutas
<i>Desventajas</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor probabilidad de colisiones - Latencia media o alta en el descubrimiento de rutas dependiendo del tamaño de la red 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto overhead - Retardo incremental en redes de gran escala - Desperdicio de ancho de banda - Alto consumo de recursos 	<ul style="list-style-type: none"> - Debido al tipo de enrutamiento, el tamaño de paquete aumenta en proporción a la longitud del recorrido de la ruta; siendo apropiado para clusters pequeños

2.5. Modelos de Movilidad

Los modelos de movilidad, permiten describir o representar el movimiento de los nodos que forman la VANET dentro de un escenario de estudio concreto. El uso de mapas reales, hace que para su simulación se consideren cuatro clases de modelos de tráfico: macroscópicos, microscópicos, submicroscópicos y mesoscópicos (figura 2.14); los primeros (**macroscópicos**), se enfocan particularmente en la entidad básica del flujo vehicular, es decir; incorporan aproximaciones en términos de velocidad, flujo y densidad de tráfico, los **microscópicos** por su parte, permiten simular el movimiento de cada vehículo en la vía, asumiendo que el comportamiento del vehículo depende de las capacidades físicas que tiene para moverse y de la capacidad del conductor para controlarlo. Los modelos **submicroscópicos** guardan similitud con los microscópicos al considerar la simulación de vehículos de forma individual, pero extienden su enfoque dividiéndolos en subestructuras; para describir por ejemplo, la velocidad de rotación del motor condicionada a la velocidad del vehículo o a los movimientos del cambio de marchas del conductor. Finalmente están las simulaciones **mesoscópicas** que se encuentran entre el límite de las simulaciones micro y macroscópicas, éstas no consideran la velocidad dinámica individual del vehículo; sino que asumen un valor medio ponderado a lo largo del viaje en un determinado tramo [32, 33].

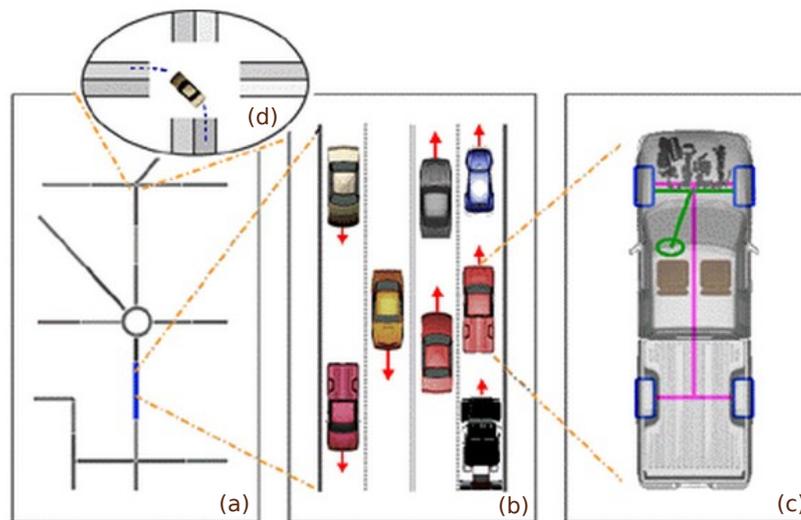


Figura 2.14: Clases de simulación de tráfico: (a) macroscópica, (b) microscópica, (c) submicroscópica y (d) mesoscópica [33]

De los modelos de tráfico descritos anteriormente, se opta por los microscópicos por ser los más apropiados para simulación de VANETs, debido a que permiten modelar el movimiento de los vehículos de manera individual. [34]. Así, en esta sección

se analizan los modelos de movilidad microscópicos propuestos por los siguientes autores: *S. Krauß, P. Wagner, Kerner y Treiber*. A continuación la descripción de cada uno de ellos.

2.5.1. Modelo Krauss

Es un modelo microscópico de seguimiento de autos, propuesto por Stefan Krauß [35, 36]; el cual incluye propiedades del flujo de tráfico, que caracterizan el hecho de que las interacciones entre los vehículos, son en general motivadas por la intención de no chocar unos con otros. Así, el modelo permite representar las variaciones de velocidad; producidas por la dependencia correspondiente a la mínima distancia de frenado, que han de mantener los conductores respecto al vehículo que les precede en la vía, y de su velocidad de desplazamiento.

Entonces, según Krauss; la velocidad de movimiento de un vehículo está definida por la ecuación 2.1

$$v(t + 1) = v_1(t) + \frac{g(t) - v_1(t)}{\tau_b(t) + 1} - \eta(t) \quad (2.1)$$

En donde:

v , velocidad del vehículo,

v_1 , velocidad del vehículo precedente,

g , distancia de seguridad,

t , tiempo,

τ_b , tiempo de reacción y

η , variable aleatoria entre 0 y 1 que indica la imperfección del conductor.

“En esta ecuación, se distingue que la velocidad está restringida continuamente por los vehículos de alrededor (apreciable en los parámetros $v_1(t)$ y $g(t)$)” [37].

2.5.2. Modelo Wagner

Este modelo fue desarrollado por Peter Wagner, con el fin de introducir dos características importantes de la conducción humana: la primera bajo el supuesto de que las personas suelen planificar el evento futuro mientras conducen, y la segunda referente al hecho; de que el tipo de control que ejercen sobre sus vehículos, no es continuo pero si discreto en el tiempo, es decir sólo actúan en determinados momentos que se denominan *puntos de acción*, los cuales son considerados como fenómenos

aleatorios; pues suceden con mayor o menor motivo en función del entorno y la situación del conductor [38].

Las dos condiciones pueden resumirse en las ecuaciones: 2.2 y 2.3 la primera representa la condición para conducir en modo seguro y la segunda la aceleración óptima para la conducción en ese modo.

$$d(v + a_{opt}\tau) + v\tau + \frac{1}{2}a_{opt}\tau^2 d(V) + g \quad (2.2)$$

En donde:

v , velocidad del vehículo.

a_{opt} , aceleración óptima para el intervalo de tiempo del punto de acción.

τ , tiempo de reacción del conductor.

V , velocidad del vehículo precedente.

g , distancia de seguridad para evitar una colisión.

La ecuación 2.2 significa, que para cada intervalo de tiempo de reacción; la aceleración debe ser tal que el espacio que se recorre durante ese tiempo, no debe ser mayor que el espacio de separación entre el vehículo del conductor y el vehículo precedente.

$$a_{opt} = -\frac{v}{t} - \frac{b}{2} + \sqrt{\left(\frac{v}{t} - \frac{b}{2}\right)^2 + \frac{2bg + V^2 - v^2}{\tau^2}} \quad (2.3)$$

En donde b es la aceleración del vehículo y t el tiempo. La ecuación 2.3, determina la aceleración óptima para un tiempo t cualquiera, durante un intervalo τ . “Como se puede ver, este modelo da principal énfasis a la aceleración; debido a que es la única variable que el conductor puede modificar” [37].

2.5.3. Modelo Kerner

Conocido también como teoría del tráfico trifásico [37, 39], porque divide el tráfico vehicular en tres fases para modelarlo: *flujo libre*, *flujo sincronizado* y *amplio congestionamiento*. A continuación la explicación de cada uno de estos tres estados:

1. **Flujo libre:** en este estado los vehículos pueden circular sin problemas de congestión.

2. Flujo sincronizado: El termino “sincronizado” se refiere a la tendencia de sincronización, de las velocidades de los vehículos en la carretera; debido a la baja probabilidad de paso que hay en el tráfico congestionado. En el flujo sincronizado los vehículos tienden a agruparse en hileras durante su desplazamiento. La figura 2.15 indica que hasta una cierta distancia, el flujo de tráfico se comporta como un flujo libre; pero pasado el límite, se crea un cuello de botella; que impide la libre circulación.

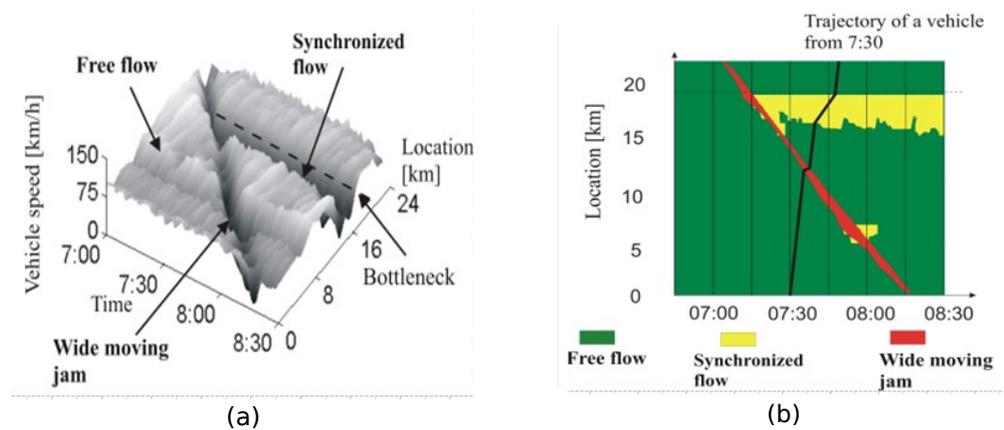


Figura 2.15: Flujo sincronizado: (a) Velocidad media en el tiempo y el espacio, (b) Representación en el plano espacio-tiempo [39]

3. Amplio congestionamiento: es un caso de tráfico congestionado; que se da cuando la densidad de tráfico es extremadamente alta y la velocidad a la que circulan los vehículos es casi nula.

2.5.4. Modelo de Conducción Inteligente - IDM

IDM es un modelo determinista, en el cual la aceleración de un vehículo depende de la suya propia, de la de los vehículos que le rodean y de la distancia mantenida hacia el vehículo precedente. Con IDM es posible simular además de los aspectos relacionados con el vehículo y su entorno, el comportamiento de los conductores para lo cual supone tres tipos diferentes: agresivo, normal y tímido; a más de permitir diferenciar entre conductores de autos pequeños y camiones, conforme se aprecia en la tabla 2.3 [37].

Sin embargo, los valores en la tabla 2.3 varían de acuerdo a los límites de velocidad; establecidos por la ley de transporte y seguridad vial de un país o región en específico.

Tabla 2.3: Parámetros del modelo IDM para simular el comportamiento de tres clases de conductores y de conductores de camión [37]

<i>Parámetros IDM</i>	<i>Normal</i>	<i>Tímido</i>	<i>Agresivo</i>	<i>Camión</i>
Velocidad deseada v_0 (Km/h)	120	100	140	85
Tiempo espacial T deseado (s)	1.5	1.8	1.0	2.0
Distancia de seguridad δ_0 (m)	2.0	4.0	1.0	4.0
Aceleración máxima a (m/s^2)	1.4	1.0	2.0	0.7
Deceleración b (m/s^2)	2.0	1.0	3.0	2.0

La ecuación 2.4, describe la distancia existente entre vehículos; en función de los parámetros que a continuación se exponen.

$$\delta = x(v, \phi v) = \phi x_{min} + vT + \frac{v\phi v}{2\sqrt{ab}} \quad (2.4)$$

En donde:

- v , velocidad deseada.
- vT , tiempo espacial deseado.
- ϕx_{min} , distancia mínima entre parachoques.
- a , aceleración deseada, y
- b , frenado comfortable.

- **Velocidad deseada:** es la máxima velocidad que un conductor desea alcanzar en condiciones en las que la densidad de tráfico le permite circular con rapidez. Según el modelo, un conductor de tipo normal elegirá la velocidad máxima legal, el de tipo agresivo sobrepasará esta velocidad y un conductor tímido circulará por debajo del límite permitido.
- **Tiempo espacial deseado:** se refiere a la distancia preferida por un conductor a una velocidad v cuyo valor típico es de 1.4 segundos.
- **Distancia mínima entre parachoques:** varía con dependencia al tipo de conductor, es decir; cuanto más agresivo es éste, menor será la distancia que deje entre parachoques.
- **Aceleración deseada:** permite describir el comportamiento de un conductor durante las aceleraciones. Si el conductor es agresivo aplica mayor aceleración. A parte se debe tomar en cuenta que esta aceleración, está sujeta a restricciones físicas; por lo que para un camión, necesariamente será menor que la de un auto.

- **Frenado confortable:** describe la deceleración de un vehículo al aproximarse a un obstáculo en la calzada. Se ha comprobado que cuanto más agresivo es un conductor, mayor es el valor de deceleración [37].

2.6. Trabajo Relacionado

Hasta la fecha se han desarrollado un sin número de estudios enfocados al análisis y comparación de: protocolos de comunicación, protocolos de enrutamiento, modelos de movilidad y modelos de propagación para los escenarios VANET. De entre ellos se destacan:

- Análisis del rendimiento de los estándares 802.11 y 802.11p sobre un modelo de carretera simple, obteniéndose como resultado un rendimiento superior con el estándar 802.11p [40].
- Evaluación del rendimiento de las comunicaciones intervehiculares, basadas en las especificaciones de capa PHY y MAC, propuestas por el estándar 802.11p, como resultado se obtiene que dicho estándar proporciona un buen apoyo, para las comunicaciones de vehículos sobre escenarios en carretera; siempre y cuando se mantenga una distancia media constante [41].
- Simulación basada en análisis de protocolos de enrutamiento ad-hoc, sobre escenarios VANET, urbano y en carretera. Se obtienen resultados comparativos de los protocolos AODV, DSR y OLSR [44].
- Estudio comparativo de modelos de propagación y modelos de movilidad en redes ad-hoc vehiculares, en el cual se determina que el modelo de propagación Nakagami es adecuado para simular entornos VANET, y que es apropiada la simulación de red junto a la simulación de tráfico rodado para conseguir un enfoque realista de la VANET [46].
- Evaluación de desempeño de VANETs realistas, usando escenario de tráfico con semáforos. Se llega a la conclusión, de que en las intersecciones en que los semáforos obligan a los vehículos a detenerse, hay mayor cantidad de paquetes que se pierden; lo cual se debe a las múltiples transmisiones que se realizan simultáneamente, proponen la simulación con RSUs [47].

Todos estos estudios brindan pautas para ajustar de mejor manera las configuraciones de simulación, a los entornos VANET reales.

2.7. Trabajo Futuro

En este trabajo se ha comparado el desempeño de los protocolos de enrutamiento sobre escenarios casi realistas, gracias a la exportación de mapas y la implantación de modelos de movilidad para la conducción. Sin embargo los entornos VANET, reúnen amplias características que el simulador ns-2 podría no ser capaz de soportar. Recientemente se ha lanzado un sistema altamente flexible **VSimRTI**¹, que integra diversas herramientas para la preparación y simulación de comunicaciones V2X, permitiendo simulaciones de alto rendimiento, al considerar la configuración de características especiales, tales como: semáforos, estaciones de carretera (RSUs) y a nivel de aplicaciones el envío y recepción de mensajes tipo CAM (Cooperative Awareness Messages) y DENM (Decentralized Environmental Notification Messages), definidos en la norma ETSI. Como trabajo futuro podrían realizarse simulaciones VANET sobre esta herramienta.

Se pueden considerar para simulaciones futuras, la colocación de RSUs en puntos estratégicos en las vías, a fin de comprobar si contribuyen a la comunicación; evitando que algunos de los enlaces se pierdan por falta de un nodo intermedio que sirva de pasarela hacia el nodo de destino.

Para la generación del escenario urbano, a fin de conseguir una representación real del tráfico vehicular, sería bueno incluir la ubicación de los semáforos.

Se pueden realizar estudios similares, comparando distintos protocolos de enrutamiento (de preferencia diseñados para VANETs) sobre un modelo de movilidad específico. Si se consideran los aquí expuestos, no hace falta repetir el ejercicio con distintos modelos de movilidad debido a que no se encontraron diferencias determinantes que alteren de manera drástica el rendimiento de los protocolos.

¹<http://www.dcaiti.tu-berlin.de/research/simulation/>

3

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Software de simulación

Existen múltiples herramientas de simulación desarrolladas para el estudio de las redes ad-hoc vehiculares y de proyección a los Sistemas de Transporte Inteligente (ITS). Se hace especial referencia a los simuladores de tipo ‘opensource’ por la alta disponibilidad y funcionalidad fuera de restricciones, que brindan a la comunidad investigadora [34].

Inicialmente, el estudio de VANETs se efectúa mediante la utilización de *simuladores aislados*; es decir, se dispone por separado de herramientas para simular la movilidad de los vehículos (simuladores de tráfico 3.1), y aquellas dedicadas a generar los enlaces de comunicación para dicha red vehicular (simuladores de red 3.2). Posteriormente, aparecen los *simuladores integrados* 3.3 que no hacen más que afiliar ambas herramientas para tenerlas juntas; trabajando e interactuando de manera eficiente, sin embargo se ven limitados por la escasez de protocolos de enrutamiento; que manejan los simuladores de red para el estudio concreto de VANETs. Finalmente se tienen los *simuladores híbridos* 3.4 cómo resultado de interconectar simuladores independientes de tráfico y red en paralelo, aprovechando las mejores propiedades de simulación de cada uno; para propiciar escenarios VANET más realistas, no obstante requieren de una elevada capacidad computacional [34].

A continuación, se presenta un conjunto de simuladores ‘opensource’ distribuidos de acuerdo a los grupos previamente especificados.

Tabla 3.1: Simuladores de Tráfico

<i>Simulador</i>	<i>Sitio Web</i>
Texas Model	http://code.google.com/p/etexas/
SUMO	http://sumo.sourceforge.net/
SmartPathTraffic Simulator	http://www.path.berkeley.edu/PATH/Research/Smartpath/SmartPath/sm.html
FreeSim	http://www.freewaysimulator.com/
MITSIMLab	http://mit.edu/its/mitsimlab.html
VanetMobiSim	http://vanet.eurecom.fr/
CityMob	http://www.grc.upv.es/Software/citymob.html
VISSIM	http://www.tomfotherby.com/Websites/VISSIM/
Mobitools	http://www.vehicularlab.org/index.php/projects/mobitools
Vergilius	http://www.vehicularlab.org/index.php/projects/vergilius
Microsimulation of Road Traffic Flow Tool	http://www.traffic-simulation.de/
CityMobforRoadmaps C4R	http://www.grc.upv.es/Software/c4r.html

Tabla 3.2: Simuladores de Red

<i>Simulador</i>	<i>Sitio Web</i>
NS-2	http://www.isi.edu/nsnam/ns/
GloMoSim	http://pcl.cs.ucla.edu/projects/gloMosim/
JIST-SWANS	http://jist.ece.cornell.edu/
GTNetS	http://www.ece.gatech.edu/research/labs/MANIACS/GTNetS/
OMNeT++	http://www.omnetpp.org/
SNS	http://www.cs.cornell.edu/people/egs/sns/

Tabla 3.3: Simuladores Integrados

<i>Simulador</i>	<i>Sitio Web</i>
GrooveNet	http://www.seas.upenn.edu/~rahulm/Research/GrooveNet/
NS-3	http://www.nsnam.org/
NCTUns	http://nsl.csie.nctu.edu.tw/nctuns.html

Tabla 3.4: Simuladores Híbridos

<i>Simulador</i>	<i>Sitio Web</i>
TRANS	http://lca.epfl.ch/projects/trans/
MobiREAL	http://www.mobireal.net/
VEINS	http://veins.car2x.org/

3.1.1. Simulador de Tráfico: CityMob for RoadMaps C4R

C4R¹ es una herramienta ‘opensource’, cuyo propósito es generar trazas de movilidad para redes vehiculares, es decir; permite simular el tráfico en distintas localidades gracias a la exportación de mapas reales desde OpenStreetMaps² Su distribución es bajo licencia GNU/GPL versión 3, de manera que el usuario puede realizar modificaciones al código fuente de la aplicación, si así lo requiere [37].

Otra ventaja de esta herramienta, es que provee una interfaz gráfica bastante intuitiva, haciendo que las configuraciones para definir los entornos VANET, no demanden de gran esfuerzo; lo que a su vez se traduce en ahorro de tiempo, en la fase de generación de escenarios de tráfico para la simulación. Además, las trazas de movilidad generadas, son compatibles con el simulador de red NS-2, por lo que puede considerarse de uso extensible, ya que el simulador de red es altamente conocido y empleado por la comunidad investigadora. La figura 3.1 representa lo manifestado, C4R se sirve de la API de OpenStreetMaps, para exportar mapas reales y guarda relación directa con el simulador SUMO (Simulation of Urban MObility), para visualizar el flujo vehicular en función del modelo de movilidad aplicado. Las trazas generadas son manejables o interpretables por el simulador de red NS-2.

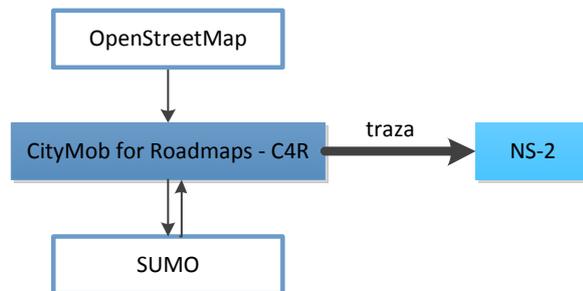


Figura 3.1: Relación de C4R con otras aplicaciones [37]

La tabla 3.5, lista los requerimientos mínimos para la ejecución de C4R, la aplicación usa conexión a internet para el acceso a los servidores de OpenStreetMaps, en caso de no encontrarse operativos por cuestiones de mantenimiento; pueden suscitarse errores al cargar el mapa, inclusive se debe estar alerta a cambios de la API³, para re-establecerla en el cuadro de opciones (Anexo B, sección B.3).

¹<http://www.grc.upv.es/Software/c4r.html>

²<http://www.openstreetmap.org/>

³http://en.wikipedia.org/wiki/Application_programming_interface

Tabla 3.5: Requerimientos mínimos para la ejecución de C4R [37]

Componente	Requisitos mínimos
Procesador	Pentium III, compatible con PC a 600 MHz
Disco Duro	10 GB
RAM	1.5 GB
Resolución de pantalla	1024*768
Sistema operativo	Windows o Linux
Versión de java runtime	Java 6 SE
Versión de SUMO recomendada	0.11.1
Conexión a internet	Conexión de 56 K

3.1.2. Simulador de Red: NS-2

Constituye una herramienta útil para simular redes fijas y móviles (cableadas e inalámbricas). NS-2¹, se apoya en dos lenguajes de programación: *OTcl* y *C++*, el primero orientado a objetos, es una versión extendida de *Tcl*, donde el usuario introduce las especificaciones del escenario a simular, caracterizando la red mediante su topología, conexiones, tráfico, tecnologías de radio (PHY), acceso (MAC), enca minamiento (protocolos) y demás elementos que deseen incluirse en la simulación, el segundo constituye el núcleo del simulador; en cuya base se implementan los distintos protocolos operantes en cada una de las capas de red, tomando como referencia el modelo OSI (figura 3.2)

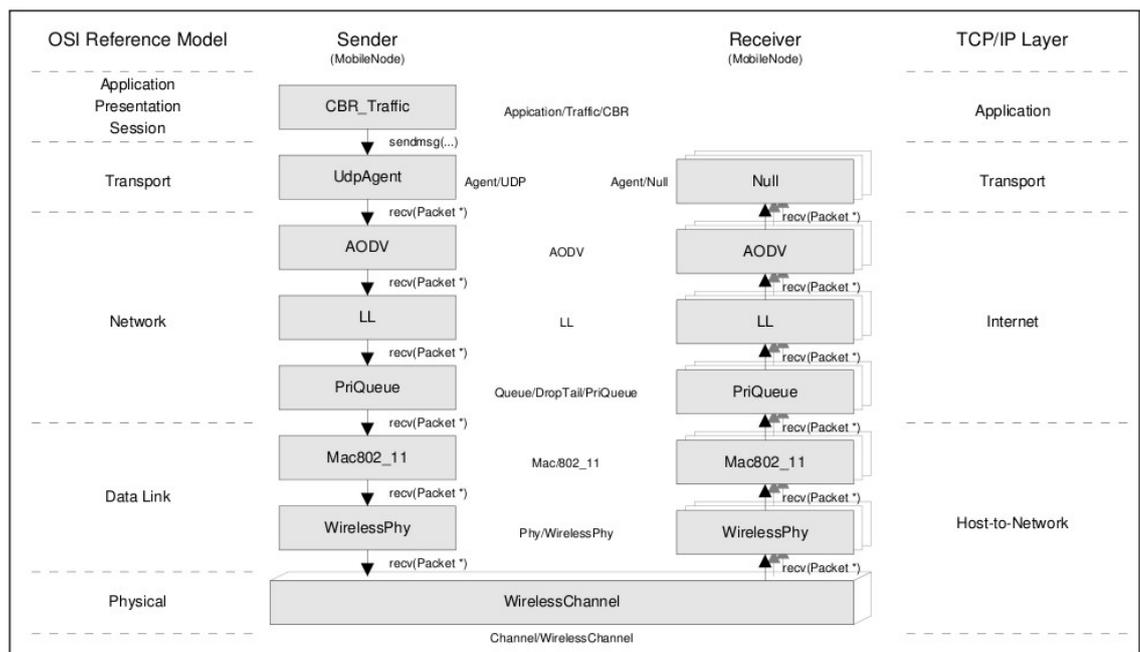


Figura 3.2: Pila de objetos de dos nodos móviles implementados en NS-2 [52]

¹<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

La figura 3.3, representa el funcionamiento básico de NS-2 para simulación de redes inalámbricas móviles.

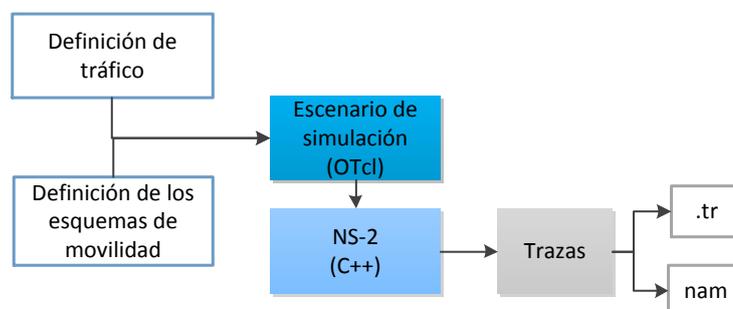


Figura 3.3: Esquema básico funcional de NS-2 en redes móviles

En primera instancia, el usuario se encarga de definir el tráfico estableciendo las conexiones entre los nodos de la red, y las relativas a los esquemas de movilidad, para cuyo efecto; el mismo software incluye scripts de generación de tráfico y movilidad de los nodos: *cbrgen.tcl* y *setdest.tcl* respectivamente. No obstante para este estudio, la movilidad de los vehículos no puede ser de carácter aleatorio como ocurre en las MANETs, dadas las características propias de las VANETs expuestas en el capítulo 1; entonces, en lugar de generar la movilidad de los nodos con *setdest.tcl*, se usa el fichero *.tcl* que arroja el simulador de tráfico C4R luego de su ejecución, para representar de forma más cercana a la realidad; los patrones de movimiento que siguen los vehículos en las vías o carreteras.

El intérprete OTcl, recoge en conjunto las características de la simulación; cuya ejecución en NS-2, arroja las trazas *.tr* y *.nam*, donde la primera permite distinguir todos los eventos producidos durante la simulación línea por línea para un análisis exhaustivo y la segunda los representa en una interfaz gráfica, amigable al usuario.

3.2. Preparación de Simuladores

Con la intención de optimizar los procesos de generación de escenarios y simulación de red, se instalaron ambas herramientas (C4R y NS-2); sobre la distribución de Linux Ubuntu 10.10 - Maverick Meerkat, en un computador de al menos 20GB de disco duro y 2GB de RAM. Estas consideraciones son importantes, pues se conoce que el simulador de red puede presentar dificultades; con la aplicación de parches

que habiliten su correcta instalación y ejecución sobre versiones posteriores. No obstante, estos inconvenientes pueden superarse pero no se garantiza el cumplimiento exacto de los procesos de instalación adjuntos en los Anexos A y B.

3.2.1. Diagrama de procesos para la simulación

La figura 3.4, representa el esquema principal en el cual se fundamentan de principio a fin; los procesos para simular los escenarios VANET. Aquí se distinguen las herramientas de simulación y cálculo empleadas para generar escenarios, simular la red y analizar los resultados.

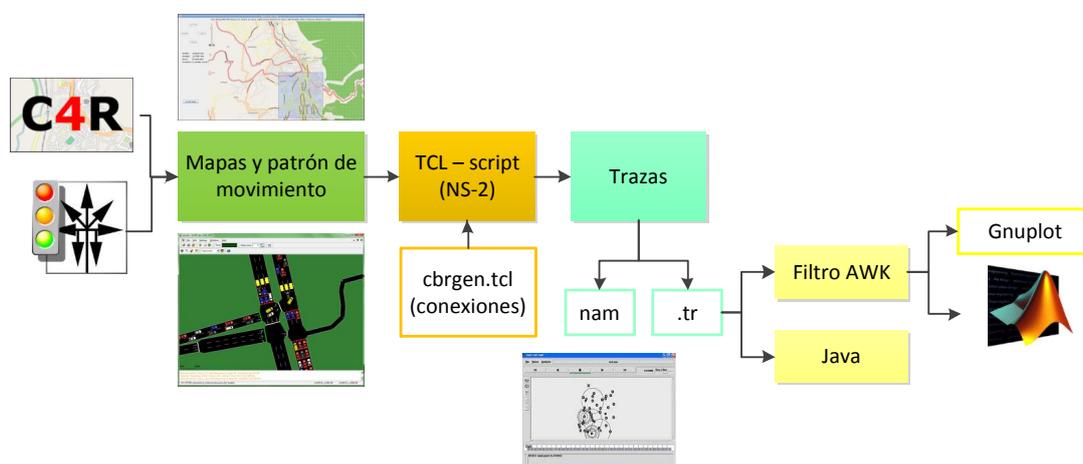


Figura 3.4: Diagrama de procesos para la simulación y análisis de resultados

3.2.2. Generación del escenario móvil con C4R

El diagrama básico funcional de la herramienta C4R, representado en la (figura 3.5); permite identificar el proceso de generación de los patrones de movimiento vehiculares, fundamentado en el cumplimiento de tres etapas:(a) primero, haciendo uso de mapas reales, se delimita el área de simulación y sobre ésta se definen las constantes de movilidad, entendiéndose como todas aquellas configuraciones que el simulador permite realizar, para caracterizar los escenarios y especificar los detalles del tráfico vehicular; tales como: número de vehículos, puntos de partida y llegada, movilidad prefijada (si siguen determinadas rutas) o aleatoria, áreas de ‘downtown’ (zonas del mapa donde los vehículos tienden a concentrarse), tipos de vehículos; caracterizados por: velocidades máximas de desplazamiento, aceleración, deceleración y trayecto. Luego, (b) la segunda etapa consiste en definir el modelo de movilidad;

los cuales se han explicado a detalle en el capítulo 1. Finalmente, (c) la etapa de generación de tráfico; se encarga de producir el flujo vehicular de acuerdo a las configuraciones realizadas en la primera y segunda etapa.

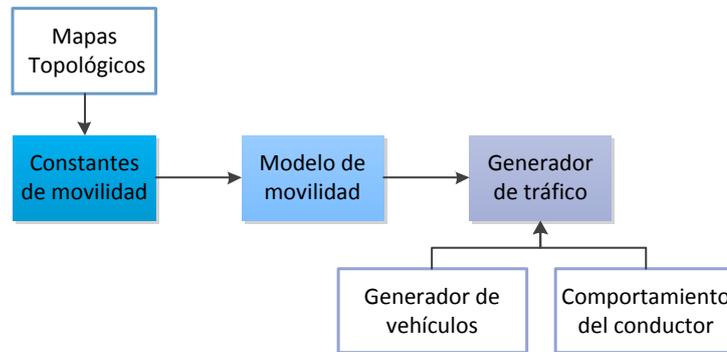


Figura 3.5: Esquema básico funcional de C4R, elaborado con referencia a [34]

El proceso para generar los escenarios, se encuentra detallado en el Anexo C, y la inicialización del programa en caso de haber sido instalado en Ubuntu se ha especificado en el Anexo B, sección B.3.

Las velocidades para cada escenario, se asignan considerando los límites máximos permisibles, especificados en el Reglamento General para la aplicación de la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial¹. Según como se indica a continuación:

1. Vehículos livianos

- Dentro del perímetro urbano: 50K/h;
- En vías perimetrales: 90K/h;
- En carretera: 100K/h.

2. Vehículos de transporte público y comercial de pasajeros

- Dentro del perímetro urbano: 40K/h;
- En vías perimetrales: 70K/h;
- En carretera: 90K/h.

¹<http://www.cte.gob.ec/wp-content/uploads/2011/04/ReglamentoGralAplicaLOTTTSV.pdf>

El primer escenario corresponde a un entorno de tráfico urbano, en la ciudad de Loja incluyendo algunas vías de acceso perimetrales. La figura 3.6, representa el área de simulación sobre la que se despliega el tráfico vehicular de acuerdo a las configuraciones expuestas en la tabla 3.6.



Figura 3.6: Área de simulación del Escenario 1 – Centro urbano de la ciudad de Loja, a) representación en C4R, b) representación en SUMO

Tabla 3.6: Parámetros de generación de tráfico - Escenario 1

Parámetros	Valor
Área de simulación	1500m × 2000m
Área en ‘downtown’*	550m × 350m
Atracción en ‘downtown’*	0.5
Número de vehículos	50, 100, 150, 200, 250
Velocidad vehicular máxima	13.89 m/s ≈ 50 Km/h
Velocidad vehicular en ‘downtown’*	8.33 m/s ≈ 30 Km/h
Aceleración	1.4 m/s ²
Desaceleración	2 m/s ²
Modelos de Movilidad	Krauss, Wagner, Kerner, IDM
Tiempo de simulación	250 s

*Término empleado para referirse a las zonas en el mapa donde los vehículos tienden a concentrarse o dispersarse según la probabilidad de atracción asignada (Anexo C, sección C.3)

En el segundo escenario (figura 3.7), se pretende describir el flujo vehicular sobre carretera, es decir el flujo libre, donde los vehículos tienden a desplazarse a velocidades superiores a las asignadas en el escenario urbano (normalmente entre 60 - 80 Km/h con límite de hasta 100 Km/h). Como escenario de prueba se toma la vía

Catamayo - Loja (36 Km), considerando flujos de salida desde ambos extremos. En la tabla 3.7, se muestran los valores utilizados en la generación de este escenario.

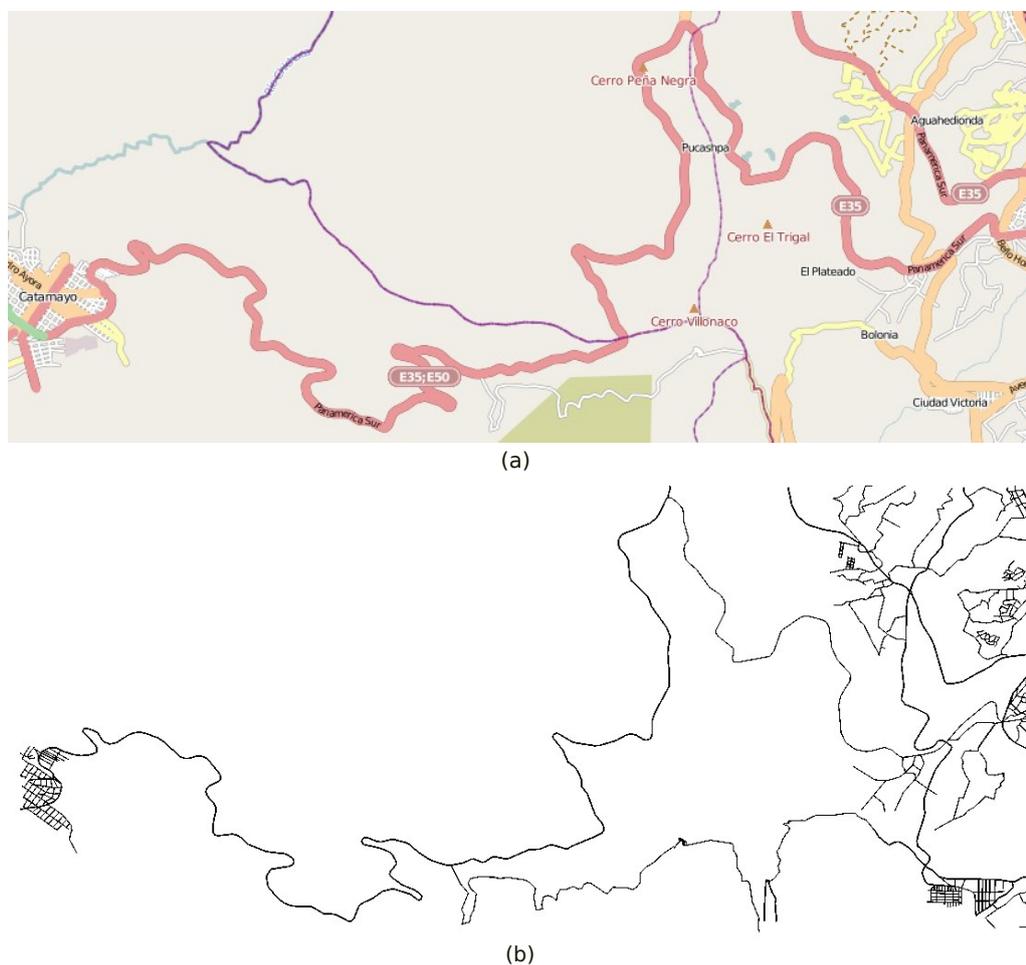


Figura 3.7: Área de simulación del Escenario 2 – Trayecto Catamayo - Loja, a) representación en C4R, b) representación en SUMO

Tabla 3.7: Parámetros de generación de tráfico - Escenario 2

Parámetros	Valor
Área de simulación	$15000m \times 7000m$
Número de vehículos	50, 100, 150, 200, 250
Velocidad vehicular máxima	$22.22 \text{ m/s} \approx 80 \text{ Km/h}$
Aceleración	1.4 m/s^2
Desaceleración	2 m/s^2
Modelos de Movilidad	Krauss, Wagner, Kerner, IDM
Tiempo de simulación	250 s

3.2.3. Generación de conexiones de tráfico CBR

Para la generación de las conexiones de tráfico CBR (Constant Bit Rate), se hace uso del fichero *cbrgen.tcl*¹ ubicado en el directorio: `/ns-allinone-2.34/ns-2.34/indep-utils/cmu-scen-gen`, de la siguiente manera:

```
ns cbrgen.tcl -type cbr -nn 250 -seed 1 -mc 100 -rate 0.00666667 >> conex
```

La sentencia indica que se genera un tráfico tipo CBR, sobre una distribución de 250 nodos, con una semilla aleatoria que empieza desde 1 a generar un máximo de 100 conexiones entre los nodos; a una tasa de transferencia de 150 paquetes por segundo, representada por el inverso ($1/150$); puesto que el valor de rate, no debe ser mayor a la unidad. El intervalo entre conexiones se obtiene dividiendo el tamaño del paquete en bits para la tasa de transferencia en bps, así: $(512 \times 8)/150(512 \times 8) \simeq 1/150 \simeq 6,67 \times 10^{-3}$, por lo tanto; este valor se especifica como 'rate' para generar un tráfico constante en la red con un intervalo fijo de 6.67 ms. Las fuentes de tráfico CBR, hacen que los datagramas UDP; sean transmitidos de forma continua [43]. Se optó por el uso del protocolo de transporte UDP, debido a que no es orientado a la conexión, y al ofrecer un servicio no confirmado (sin acuse de recibo - ACK) presenta menores retardos, siendo ideal para simular aplicaciones en tiempo real como las que podrían conseguirse al implementar redes ad-hoc vehiculares (voz, datos, video).

El número de conexiones, se fija considerando el 40% de nodos en la red, es decir si la simulación se ejecuta sobre un escenario de 50 nodos; se generarán como máximo 15 conexiones, y así sucesivamente. Se efectuó el proceso de generación de las conexiones de esta forma, por el tiempo elevado que demandaba obtener las trazas resultantes (*.tr y *.nam) luego de la ejecución de los scripts de simulación en NS-2, principalmente en los escenarios de 200 a 250 nodos con los protocolos de enrutamiento DSDV y CBRP, debido a que se incrementaba la actividad de estos protocolos (proactivo e híbrido) al crear más enlaces de comunicación entre los nodos de la red.

Sin embargo el porcentaje escogido en este trabajo para obtener el máximo de conexiones no es un valor inalterable o rígido y se puede variar hasta un 100%, dejando de lado la necesidad de reeditar el fichero de las conexiones, en caso de que estas superen el número máximo de nodos existentes en la red.

¹<http://www.isi.edu/nsnam/ns/tutorial/nsscript7.html>

3.2.4. Selección del modelo de propagación

Según lo expuesto en [21], se sabe que el modelo de propagación, es un factor clave que tiene influencia en la probabilidad de recepción de paquetes en comunicaciones inalámbricas. En [51], se presentan algunos de estos modelos frecuentemente utilizados e incluidos en algunos simuladores, uno de los que ofrece un modelado probabilístico más realista, es el modelo Nakagami¹ ya que cubre efectos de desvanecimiento y estima el nivel de señal recibido permitiendo ajustar el ‘multitrayecto’² en función del entorno a simular, este efecto se presenta con mayor intensidad en entornos urbanos; por la cantidad de obstáculos que se pueden encontrar.

En la figura 3.8 se observa la probabilidad de entrega de paquetes en función de la distancia, de los modelos de propagación TwoRayGRound y Nakagami a distintas intensidades de desvanecimiento (m). Se observa que éste último permite realizar ajustes que pueden adaptar el nivel de recepción al entorno, más cuando se cuenta con pruebas de campo reales.

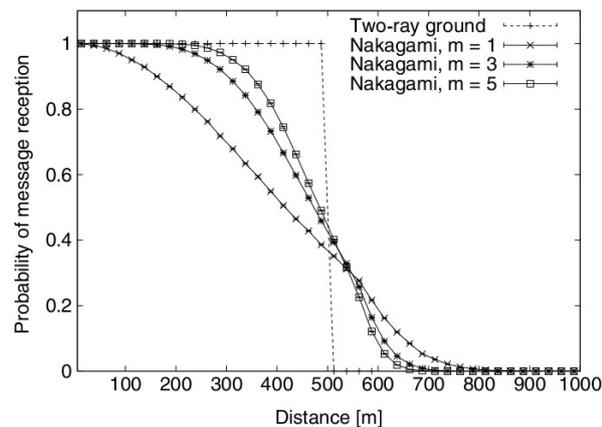


Figura 3.8: Paquetes entregados exitosamente para diferentes distancias entre emisor y receptor utilizando diferentes modelos de propagación [51]

Los valores para definir el modelo de propagación Nakagami en los entornos urbano y en carretera de la simulación, fueron fijados con referencia a [50] (Anexo D).

3.2.5. Creación del TCL-script en NS-2

En el TCL-script, se definen los parámetros característicos del equipamiento wireless de la OBU. Por lo tanto, es importante considerar interfaces de red que provean

¹<http://www.wirelesscommunication.nl/reference/chaptr03/ricenaka/nakagami.htm>

²Término empleado para indicar que las señales enviadas pueden llegar al receptor por diferentes caminos y por consiguiente en tiempos distintos.

protocolos de comunicación para redes vehiculares, a fin de acercar los resultados de la simulación; a los que probablemente se obtendrían con la implementación. Entonces, para definir los parámetros de red en cada escenario; se usa como referencia las especificaciones de la OBU-102¹, que integra una interfaz de red inalámbrica bajo el estándar 802.11p. Del datasheet se ha tomado las especificaciones de hardware que se muestran en la tabla 3.8, las cuales son asignadas en el script correspondiente (Anexo D, sección D.1).

Tabla 3.8: Especificaciones de hardware de la OBU-102

Hardware Specifications:	
Processor	Freescale MPC 5121e 400MHz
System Memory	64MB NOR flash, 512MB DDR2 SDRAM
DSRC Radio	one Unex's DCMA-86P2 mini-pci, IEEE 802.11p 5.85 - 5.925GHz, -90dBm Rx sensitivity, channel width 10MHz/20MHz
DSRC Radio Tx power	30dBm (EIRP)
DSRC Antenna	5.9 GHz, 5dBi Omni x 1, magnetic pod to easily mount onto the car
GPS Radio	one internal GPS radio, 10Hz module, receive type: 50 channels (GPS L1 frequency, C/A Code, GALILEO open service L1 frequency), A-GPS support, sensitivity: -160dBm (tracking and navigation), accuracy of time-pulse signal: 30ns (RMS), horizontal position accuracy: < 2.5 meters (autonomous), < 2.0 meters (SBAS) Remark: supports RTCM SC-104 format in WAAS
GPS Antenna	active antenna x 1, magnetic pod to easily mount onto the car
Ethernet	one 10/100 Mbps RJ-45 port, auto uplink, full-duplex port
UART Console	one standard RS232 interface with DB-9 male connector
USB Port	one USB 2.0 port (reserved for 3.5G USB dongle or other application)
CAN Bus	two CAN Bus 2.0 interface
Mini-PCI Slot	two mini-pci slots on system, one used by DSRC radio, the 2nd slot reserved for other application
Storage	one SD slot
Temperature	operating: -40°C ~ +85°C, storage: -40°C ~ +100°C
Relative Humidity	5% - 98%, non-condensing
Power Type	12V DC
Casing	metal
Dimension	20cm (L) x 12cm (D) x 3cm (H)
NMEA Standard	NMEA 0183

Además, sin descartar la posibilidad de conseguir comunicación vehicular en el dominio ad-hoc, haciendo uso de interfaces inalámbricas bajo estándares comerciales como el 802.11b/g por ejemplo, con la intención de comparar las prestaciones de ambas tecnologías (802.11p/b) se crea también un script-TCL (Anexo D, sección D.2) con los parámetros de simulación referenciados en la WMIC Cisco 3201², desarrollada con fines prácticos orientados a facilitar la telefonía móvil en y alrededor de los vehículos. Las especificaciones de hardware se presentan en la tabla 3.9.

¹<http://www.unex.com.tw/product/obu-102>

²http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/routers/ps272/product_data_sheet0900aecd800fe971.html

Tabla 3.9: Especificaciones de la WMIC Cisco 2301

Feature	Description		
Data Rates Supported	1, 2, 5.5, 6, 9, 11, 12, 18, 24, 36, 48, and 54 Mbps		
Network Standard	IEEE 802.11b and IEEE 802.11g		
Frequency Band	2.4 to 2.497 GHz		
Network Architecture Types	Vehicular mobile networks, outdoor wireless infrastructure		
Media Access Protocol	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)		
Modulation	<p>Wireless modulation 802.11b</p> <p>Direct sequence spread spectrum (DSSS):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Differential Binary Phase Shift Keying (DBPSK) at 1 Mbps • Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK) at 2 Mbps • Complementary Code Keying (CCK) at 5.5 and 11 Mbps <p>Wireless modulation 802.11g</p> <p>Orthogonal frequency divisional multiplexing (OFDM):</p> <ul style="list-style-type: none"> • BPSK at 6 and 9 Mbps • QPSK at 12 and 18 Mbps • 16-quadrature amplitude modulation (QAM) at 24 and 36 Mbps • 64-QAM at 48 and 54 Mbps 		
Feature	Description		
Operating Channels	North America: 11; ETSI: 13; Japan: 14		
Nonoverlapping Channels	3 (United States)		
Receive Sensitivity	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Mbps: -94 dBm • 2 Mbps: -91 dBm • 5.5 Mbps: -89 dBm • 11 Mbps: -85 dBm 	<ul style="list-style-type: none"> • 6 Mbps: -90 dBm • 9 Mbps: -89 dBm • 12 Mbps: -86 dBm • 18 Mbps: -84 dBm 	<ul style="list-style-type: none"> • 24 Mbps: -81 dBm • 36 Mbps: -77 dBm • 48 Mbps: -73 dBm • 54 Mbps: -72 dBm
Delay Spread	<ul style="list-style-type: none"> • 1 Mbps: 500 ns • 2 Mbps: 400 ns • 5.5 Mbps: 300 ns • 11 Mbps: 140 ns 	<ul style="list-style-type: none"> • 6 Mbps: 300 ns • 9 Mbps: 300 ns • 12 Mbps: 300 ns • 18 Mbps: 300 ns 	<ul style="list-style-type: none"> • 24 Mbps: 240 ns • 36 Mbps: 240 ns • 48 Mbps: 120 ns • 54 Mbps: 120 ns
Available Transmit Power Settings	<p>802.11b:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 100 mW (20 dBm) • 50 mW (17 dBm) • 30 mW (15 dBm) • 20 mW (13 dBm) • 10 mW (10 dBm) • 5 mW (7 dBm) • 1 mW (0 dBm) <p>Maximum power setting will vary according to individual country regulations.</p>		<p>802.11g:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 30 mW (15 dBm) • 20 mW (13 dBm) • 10 mW (10 dBm) • 5 mW (7 dBm) • 1 mW (0 dBm) <p>Maximum power setting will vary according to individual country regulations</p>
Range (typical @ 100-mW transmit power setting with 6 dBi diversity dipole antenna)	<p>Outdoor:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 0.5 mile (804 m) at 45 Mbps • 1 mile (1609 m) at 11 Mbps • 3 miles (4827 m) at 1 Mbps 		

3.2.6. Definición de Escenarios

Una vez seleccionadas las tarjetas inalámbricas, bajo los estándares 802.11b y 802.11p, como parte del equipamiento OBU de los vehículos, se definen los parámetros de simulación de red para los escenarios generados y descritos anteriormente:

3.2.6.1. Escenario 1: Tráfico vehicular urbano en la ciudad de Loja

Tabla 3.10: Parámetros de simulación de red - Escenario 1

Parámetros	Valor
Área de simulación	$1500m \times 2000m$
MAC/PHY	802.11b / 802.11p
Modelo de Propagación	<i>Nakagami</i>
Rango de transmisión	250m
Modelo de Antena	<i>Omni-direccional 6dBi / 5dBi</i>
Potencia de transmisión	20dBm / 30dBm (EIRP)
Sensibilidad	-85dBm / -90dBm
Tasa de transmisión	11Mbps / 6Mbps
Número de nodos (vehículos)	50, 100, 150, 200, 250
Número de conexiones	15, 40, 60, 80, 100
Protocolos de enrutamiento	AODV, CBRP, DSDV
Protocolo de transporte	UDP
Tipo de tráfico	CBR
Tamaño de paquete	512 bytes
CBR rate	150 pack/s
Tiempo de simulación	250s

3.2.6.2. Escenario 2: Tráfico vehicular en carretera / vía Catamayo - Loja

Se conservan los mismos parámetros de simulación de red del Escenario 1, a excepción del área de simulación que se asigna con el valor de: 15000m \times 7000m.

3.3. Métricas de simulación

En RFC 2501¹, se exponen algunas métricas cuantitativas que pueden ser utilizadas para evaluar el desempeño de los protocolos de enrutamiento en redes móviles ad-hoc, ya sea para determinar la fiabilidad y eficiencia del protocolo (PDR, throughput, delay y jitter) o para obtener medidas que ayudan a optimizar la asignación de los recursos (gasto energético, sobrecarga de enrutamiento y NRL).

¹<http://www.ietf.org/rfc/rfc2501.txt>

Para este trabajo se han considerado únicamente las siguientes: throughput, average end to end delay, PDR y NRL, por ser las más empleadas en estudios similares [40], [41], [44], [46], [47] y suficientes para diferenciar el comportamiento de los protocolos sobre los distintos escenarios de movilidad y mapas; en este caso sobre un tamaño de red variable (densidad vehicular). A continuación la descripción de las métricas utilizadas y el cálculo de las mismas.

3.3.1. Throughput (Rendimiento)

Es el número total de bits entregados exitosamente al destino durante el tiempo de simulación, es decir mide la tasa de transmisión de los datos, la cual permite estimar la efectividad del protocolo. Valores altos de throughput indican que la red presenta un buen rendimiento; es decir realiza una entrega de paquetes confiable, por lo contrario valores bajos indican que han habido pocas transmisiones en el intervalo de tiempo dado o bien que no se ha conseguido realizar una entrega de paquetes eficiente. La ecuación 3.1 se usa para éste cálculo, el total de bytes recibidos se multiplica por 8 para obtener el total de bits, y se divide para el tiempo de simulación multiplicado por 1000; para expresar la tasa de transferencia en K-bits por segundo.

$$TH = \frac{B_r \times 8}{T_s \times 1000} \quad [Kbps] \quad (3.1)$$

En donde:

TH , Throughput
 B_r , Bytes recibidos
 T_s , Tiempo de simulación

3.3.2. Packet Delivery Ratio (Relación de entrega de paquetes)

Es la relación cociente de los paquetes de datos entregados al destino y los generados por las fuentes CBR [45]. Un paquete enviado se puede perder, bien porque el retardo de transmisión es tal que no llega a tiempo y se considera como perdido, o bien porque se ha dañado y los mecanismos de control del destino lo rechazan. El PDR, es un buen indicador para relacionar las tasas de pérdidas de los protocolos, si son altas dicho protocolo no es satisfactorio ya que los rendimientos de red empeoran [25]. Se calcula en base a la ecuación 3.2, donde la relación cociente expuesta

se multiplica por 100 para medir la eficiencia del protocolo en un tanto por ciento.

$$PDR = \frac{Pr}{Ps} \times 100\% \quad (3.2)$$

En donde:

PDR , Packet Delivery Ratio

Pr , Paquetes CBR recibidos

Ps , Paquetes CBR enviados

3.3.3. Average end to end delay (Retardo promedio)

Se define como el tiempo necesario para que un conjunto de paquetes de datos se transmita a través de la red, desde la fuente al destino [45]. Este periodo de latencia involucra los retardos causados por el almacenamiento en buffer durante el descubrimiento de ruta, las esperas en la interfaz de cola o retardo por retransmisiones (a nivel de capa MAC), y los tiempos de propagación y transferencia de los paquetes de datos [25]. Es importante considerar el retardo como un indicador de la velocidad global de una red, ya que existen servicios de tiempo real, que no admiten latencia o retardos elevados llegando a necesitar un alto soporte en calidad de servicio. La ecuación 3.3, se emplea para calcular el retardo promedio de extremo a extremo [48].

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Tr_i - Ts_i) \times 1000 \quad [ms] \quad (3.3)$$

En donde:

D , Average end to end delay

i , Identificador de paquete

n , Número de paquetes entregados exitosamente

Tr_i , Tiempo de recepción

Ts_i , Tiempo de envío

3.3.4. Normalized Routing Load (Carga de enrutamiento normalizada)

Es la carga de enrutamiento normalizada (NRL), expresada por la relación cociente entre el número de paquetes de enrutamiento transmitidos y el número de paquetes de datos entregados a su destino [45]. Esta métrica se usa para estimar el

número de mensajes de control que emplea el protocolo, siendo deseable que genere poco tráfico de enrutamiento, para así mantener espacio disponible para el tráfico de datos. La ecuación 3.4 se utiliza para el cálculo de esta métrica.

$$NRL = \frac{Pr_s}{Pd_r} \quad (3.4)$$

En donde:

NRL , Normalized Routing Load

Pr_s , paquetes de enrutamiento transmitidos

Pd_r , paquetes de datos recibidos

4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Debido a que se comparan 3 protocolos de enrutamiento, 4 modelos de movilidad y 2 tecnologías inalámbricas de comunicación, considerando 5 densidades de tráfico diferentes sobre los escenarios: (1) ‘urbano’ y (2) ‘en carretera’, se ejecutan en total 240 simulaciones. Previa ejecución de los scripts-TCL para ambas tecnologías (Anexo D), dependiendo del escenario; se varían en cada script los parámetros señalados en la figura 4.1 como a continuación se indica.

- Se establece el área de simulación correspondiente según el escenario.
- Se recarga los archivos del escenario móvil y las conexiones para cada densidad de tráfico (número de nodos - color azul).
- Los números en color amarillo varían de 1 a 4 e indican el modelo de movilidad aplicado: (1) Krauss, (2) Wagner, (3) Kerner y (4) IDM.
- Los números en color verde indican el número máximo de conexiones generadas que corresponden al 40 % del número de nodos en la red.
- El prefijo en color rojo, indica el escenario: (e1) urbano, (e2) en carretera.
- Se simula un protocolo a la vez sobre el escenario en estudio.
- Se verifica que estén habilitados los parámetros del modelo de propagación correspondiente a cada escenario.

A cada simulación ejecutada con NS-2, se realiza el filtrado awk de la traza resultante según lo indicado en el Anexo E. Así se han obtenido los valores correspondientes a las métricas consideradas para evaluar los protocolos de enrutamiento; sobre los distintos escenarios de movilidad, mismos que se adjuntan en el Anexo F.

4.1 Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 1

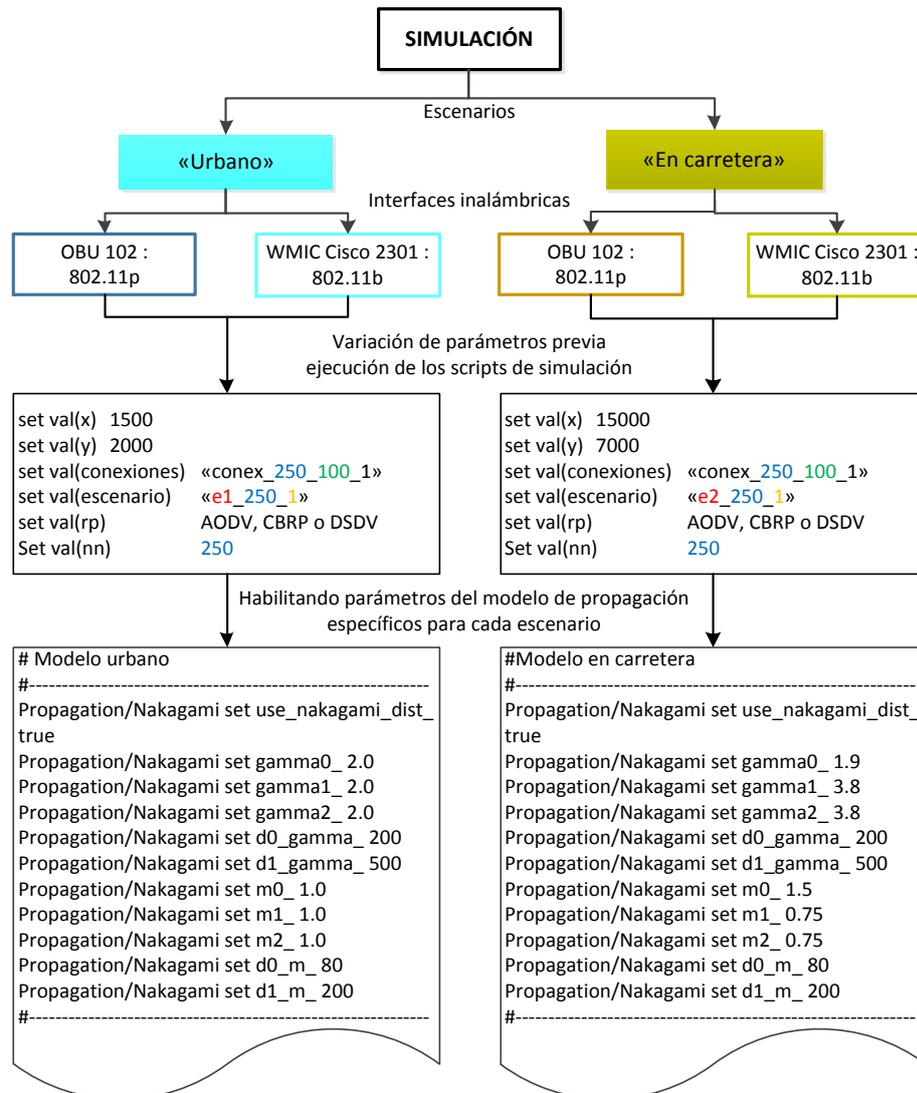


Figura 4.1: Diagrama de procesos para la obtención de resultados

Las gráficas se han obtenido con ayuda de la herramienta ‘plottools’ de MATLAB, donde en función de la densidad de tráfico vehicular; se exponen los resultados de forma que se puedan comparar los protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad en los escenarios: ‘urbano’ (Sección 4.1) y ‘en carretera’ (Sección 4.2). Además, se agrega la comparación de ambos escenarios (Sección 4.3) con el propósito de definir la tecnología inalámbrica que mejor se ajusta a cada uno.

4.1. Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 1

4.1 Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 1

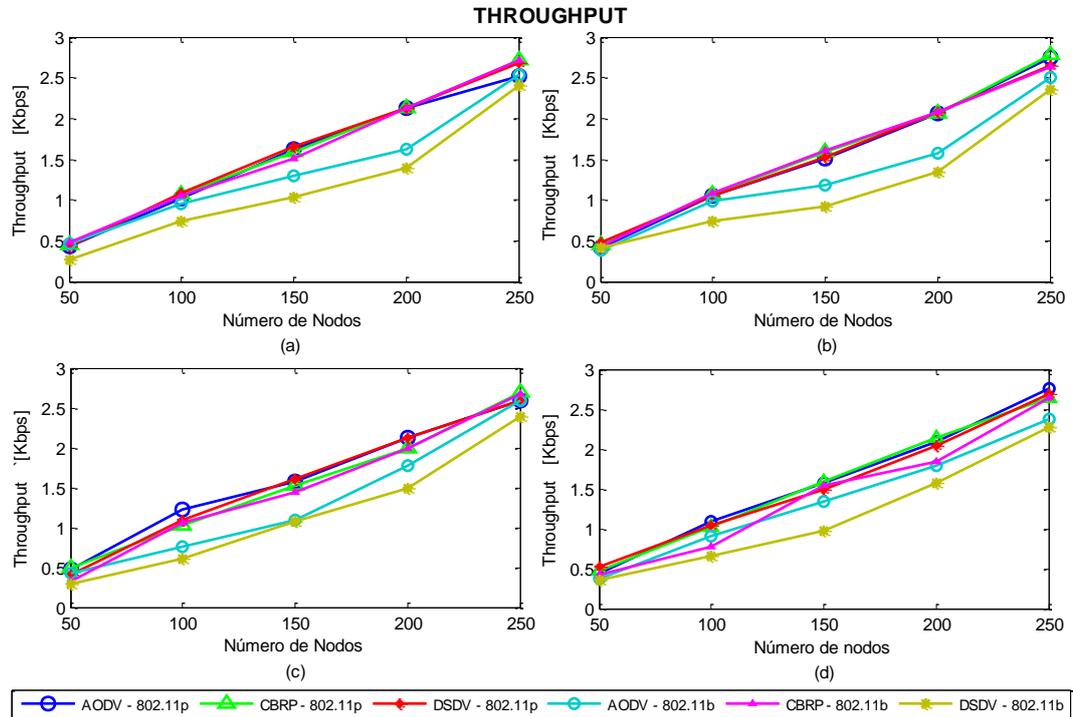


Figura 4.2: Evaluación de protocolos de enrutamiento con la métrica Throughput sobre el escenario ‘urbano’. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM

En cuanto al throughput, sobre el escenario de tráfico vehicular urbano; de la figura 4.6 se pueden realizar las siguientes observaciones:

- A medida que la densidad vehicular aumenta, el rendimiento de la red experimenta un crecimiento lineal, principalmente en los protocolos que operan con el estándar 802.11p.
- Los protocolos de enrutamiento simulados con el estándar 802.11b, ponen en evidencia la diferencia que existe entre ellos, pues con dicha tecnología es posible identificar que el protocolo que consigue un mejor rendimiento es el CBRP y que de entre ellos el DSDV experimenta un throughput bajo, inclusive menor al que se tiene con el protocolo reactivo AODV.

En la figura 4.3 se observa que los modelos de movilidad no tienen incidencia en el rendimiento de la red, pues se obtiene un throughput similar con todos ellos, sin embargo se puede distinguir que para los protocolos AODV y CBRP con tecnología 802.11b resulta un poco menor al conseguido con tecnología 802.11p.

4.1 Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 1

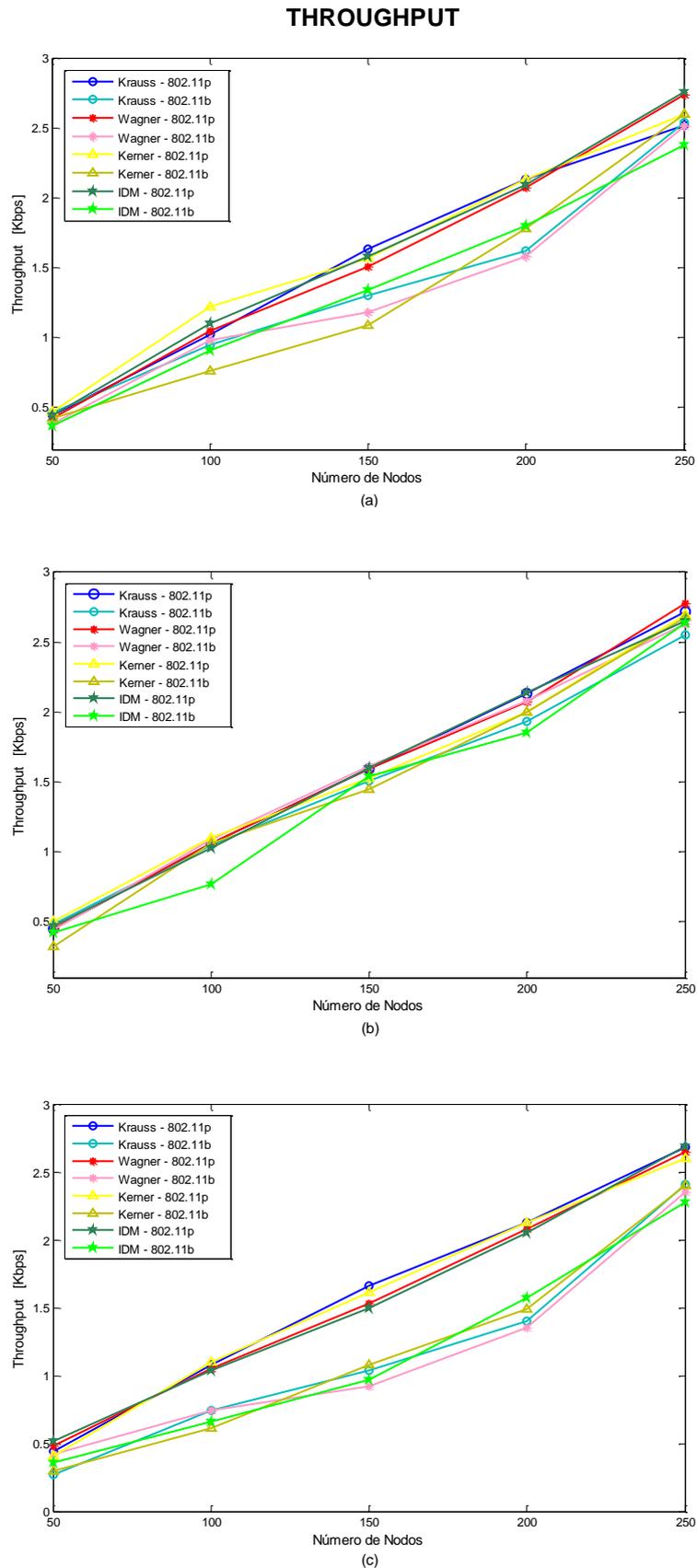


Figura 4.3: Evaluación de Modelos de movilidad con la métrica Throughput sobre el escenario 'urbano'. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV

4.1 Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 1

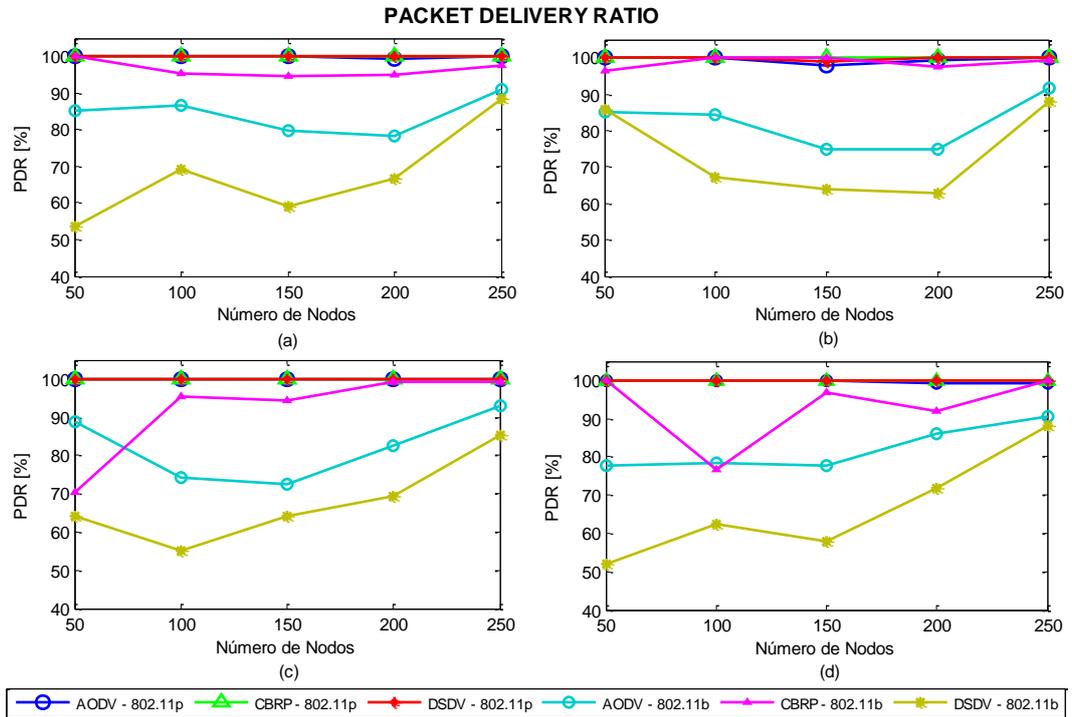


Figura 4.4: Evaluación de protocolos de enrutamiento con la métrica PDR sobre el escenario ‘urbano’. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM

De acuerdo a los resultados expuestos en la figura 4.4, en concordancia a lo analizado anteriormente; se observa que:

- Absolutamente todos los protocolos: AODV, CBRP y DSDV, que se ejecutan con tecnología 802.11p, realizan una entrega exitosa de paquetes; logrando un PDR superior al 95 % que se conserva a medida que la densidad vehicular aumenta.
- Con tecnología 802.11b, CBRP es el protocolo con mejor relación de entrega de paquetes, le sigue AODV y finalmente DSDV con un PDR deficiente que consigue mejorar un poco cuando el número de nodos (vehículos) se incrementa, este comportamiento concuerda con los resultados presentados en [49].

No se observa dependencia del modelo de movilidad con tecnología 802.11p, pero sí con tecnología 802.11b (figura 4.5)

4.1 Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 1

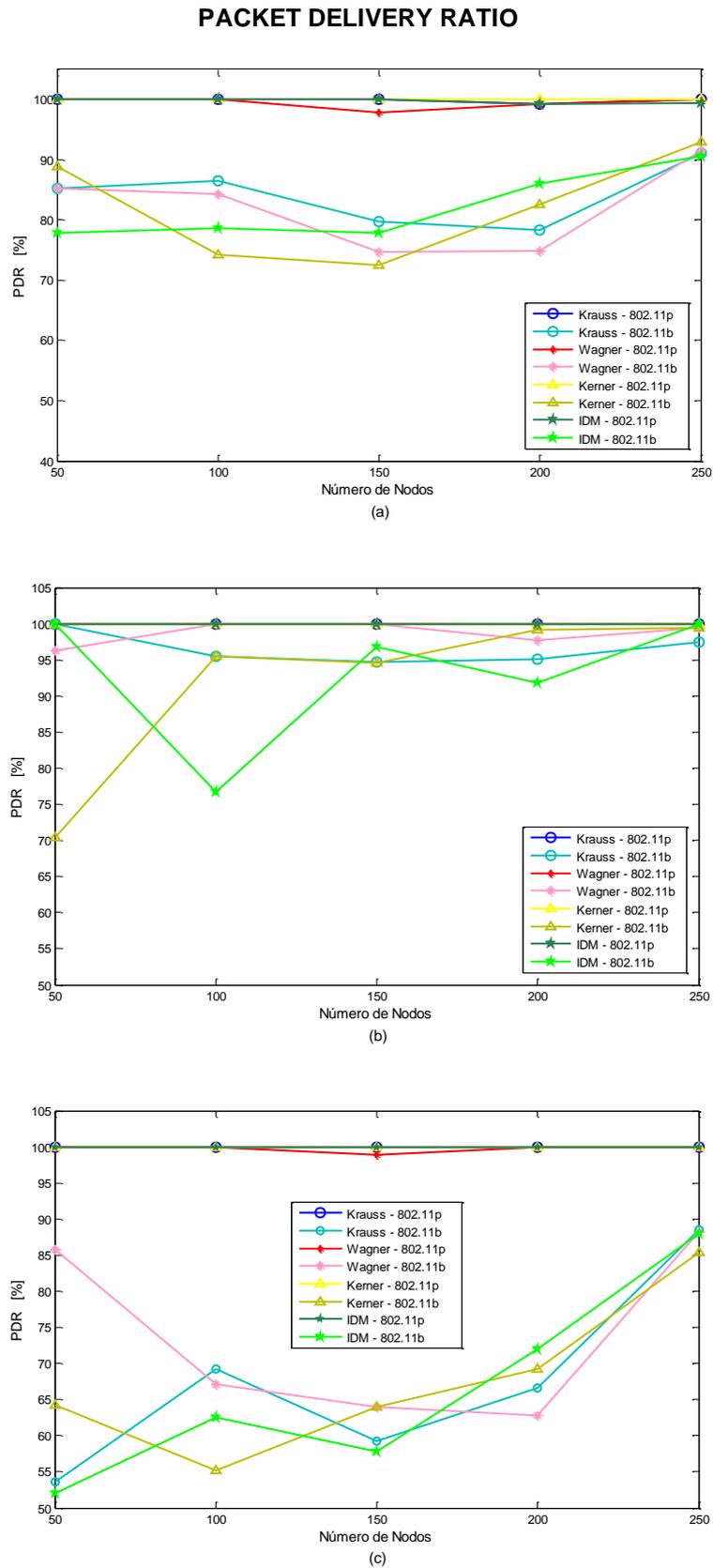


Figura 4.5: Evaluación de modelos de movilidad con la métrica PDR sobre el escenario 'urbano'. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV

4.1 Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 1

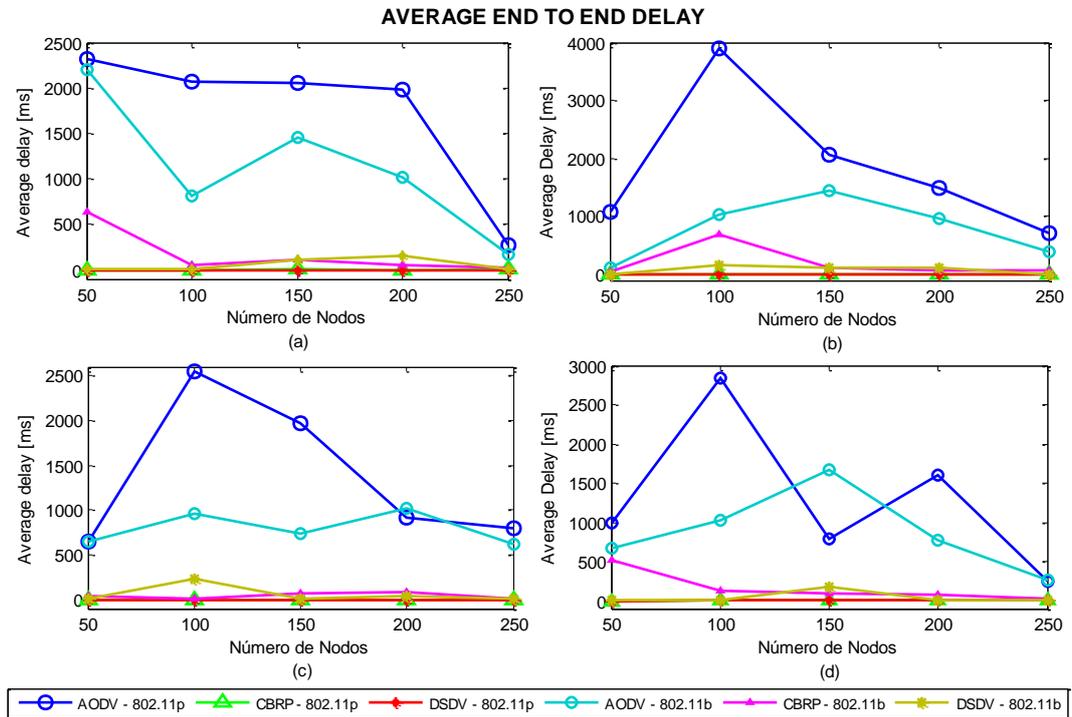


Figura 4.6: Evaluación de protocolos de enrutamiento con la métrica Average delay sobre el escenario ‘urbano’. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM

En la figura 4.6, se puede apreciar y comprobar lo siguiente:

- Dadas las características propias del protocolo, AODV presenta con ambos estándares 802.11p/b, retardos notablemente mayores a los de DSDV y CBRP.
- AODV consigue menor retardo operando con 802.11b que con 802.11p, el mínimo retardo que consigue en ambos casos, es sobre una distribución de 250 nodos (concuera con el criterio de escalabilidad del protocolo), sin embargo así mismo en el análisis anterior se constató un mejor PDR sobre 802.11p.
- Con tecnología 802.11b, el protocolo que consigue menor retardo en la entrega de paquetes es DSDV, pero es bien sabido por la métrica PDR, que no consigue entregar todos los paquetes que se han enviado.

Existe dependencia del modelo de movilidad para el análisis de red con esta métrica. Se observa que el comportamiento de los protocolos con cada modelo de movilidad es distinto, sin embargo en los protocolos CBRP y DSDV ejecutados con 802.11p, se observa que el modelo de movilidad no tiene mucha influencia. 4.7

4.1 Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 1

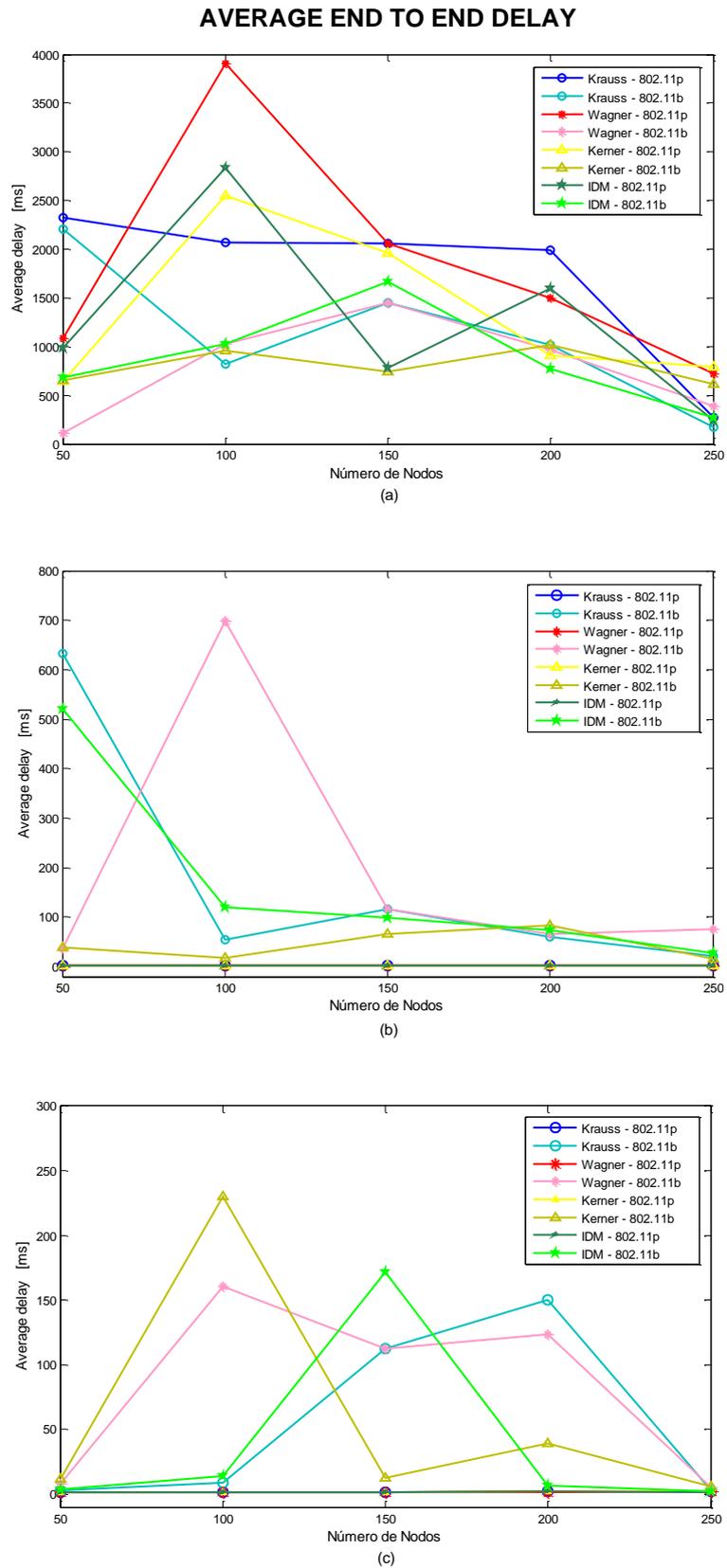


Figura 4.7: Evaluación de modelos de movilidad con la métrica Average delay sobre el escenario ‘urbano’. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV

4.1 Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 1

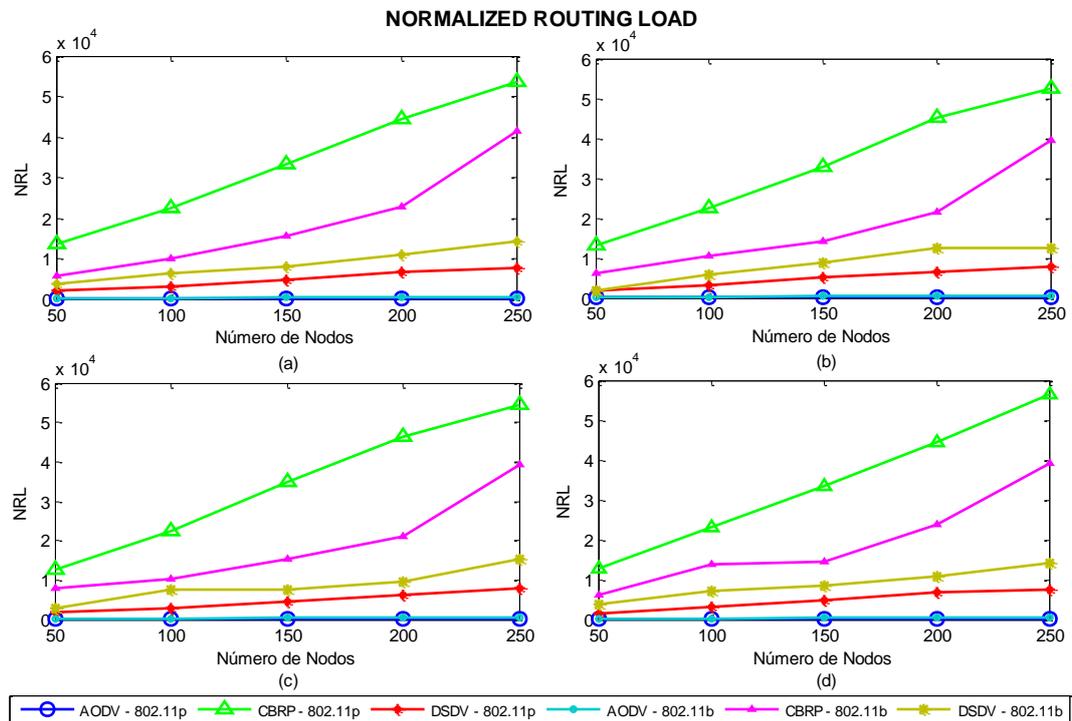


Figura 4.8: Evaluación de protocolos de enrutamiento con la métrica NRL sobre el escenario ‘urbano’. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM

En la figura 4.8, se observa que el protocolo CBRP tiene elevado overhead con el estándar 802.11p, y aunque es menor con el estándar 802.11b, sigue siendo alto en relación al de los demás protocolos, esto podría ser una desventaja debido a que requiere consumir más ancho de banda. Aún así, la carga de enrutamiento no es exagerada en CBRP operando con 802.11b, cuando la red llega a un límite de 100 nodos si consideramos que realiza una entrega de paquetes exitosa.

Se observa en la figura 4.9, que los modelos de movilidad no tienen influencia considerable cuando los protocolos se han ejecutado con tecnología 802.11p, pero si la tienen bajo el estándar 802.11b. Además, es posible distinguir que la carga de enrutamiento de los protocolos AODV y DSDV con 802.11p; es menor a la obtenida con 802.11b, lo cual es favorable ya que con menor carga de enrutamiento los protocolos consiguen realizar una entrega de paquetes confiable. En CBRP ocurre lo contrario, se tiene una mayor carga de enrutamiento con tecnología 802.11p.

4.1 Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 1

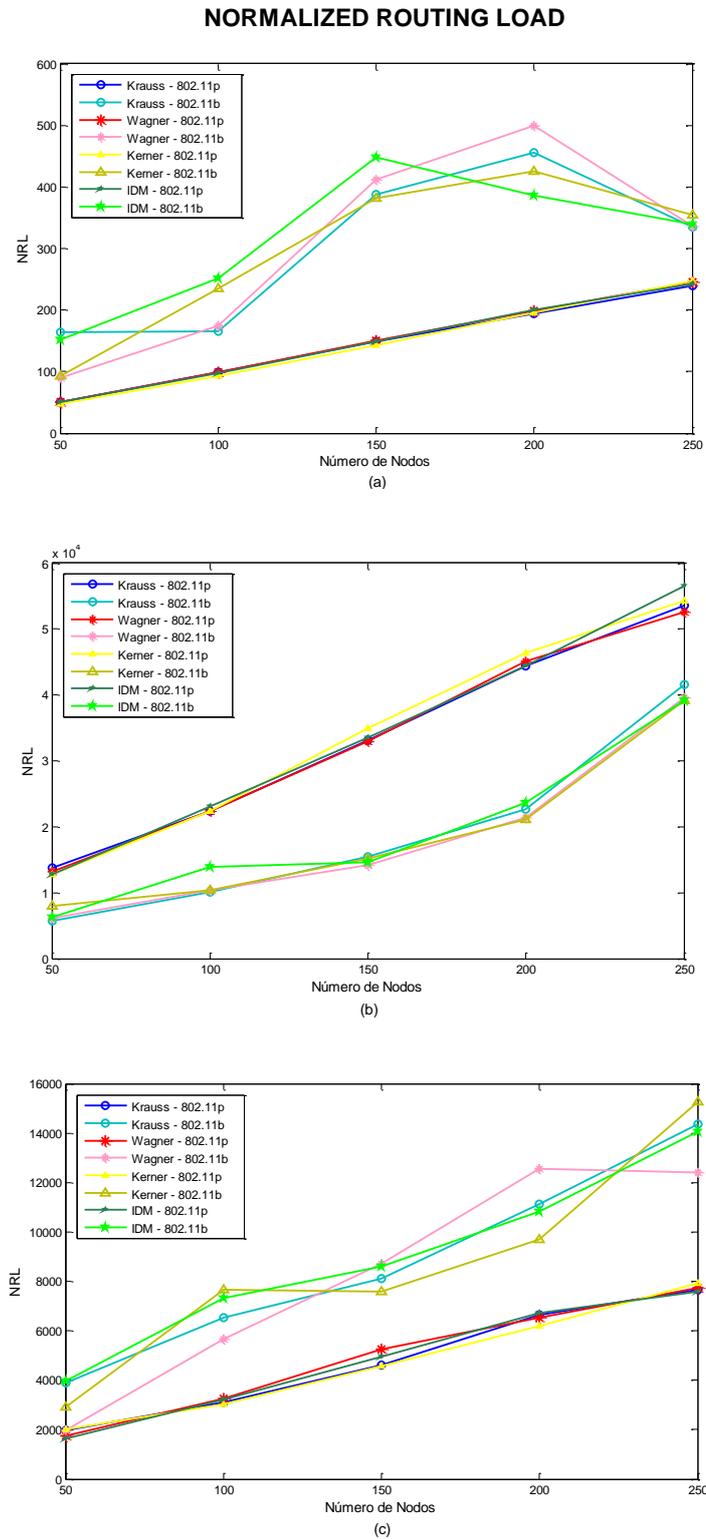


Figura 4.9: Evaluación de modelos de movilidad con la métrica NRL sobre el escenario 'urbano'. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV

4.2. Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 2

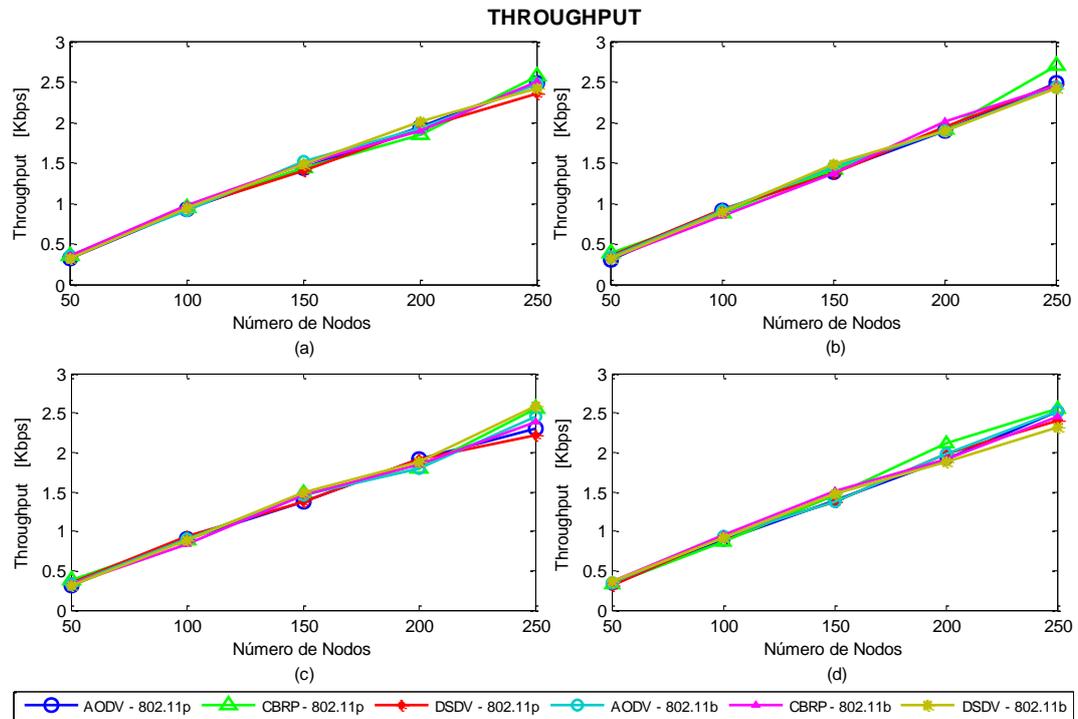


Figura 4.10: Evaluación de protocolos de enrutamiento con la métrica Throughput sobre el escenario ‘en carretera’. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM

La figura 4.10, describe el throughput conseguido por los protocolos sobre un escenario que ejemplifica el tráfico vehicular en carretera, de forma semejante al escenario urbano 4.6, conforme aumenta el número de nodos (vehículos), este crece de forma lineal, todos los protocolos sin excepción de alguno, alcanzan un throughput similar.

También se puede distinguir que el modelo de movilidad no tiene incidencia sobre el rendimiento de la red, pues se observa en la figura 4.11 que no hay variantes en los valores obtenidos con cada modelo.

4.2 Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 2

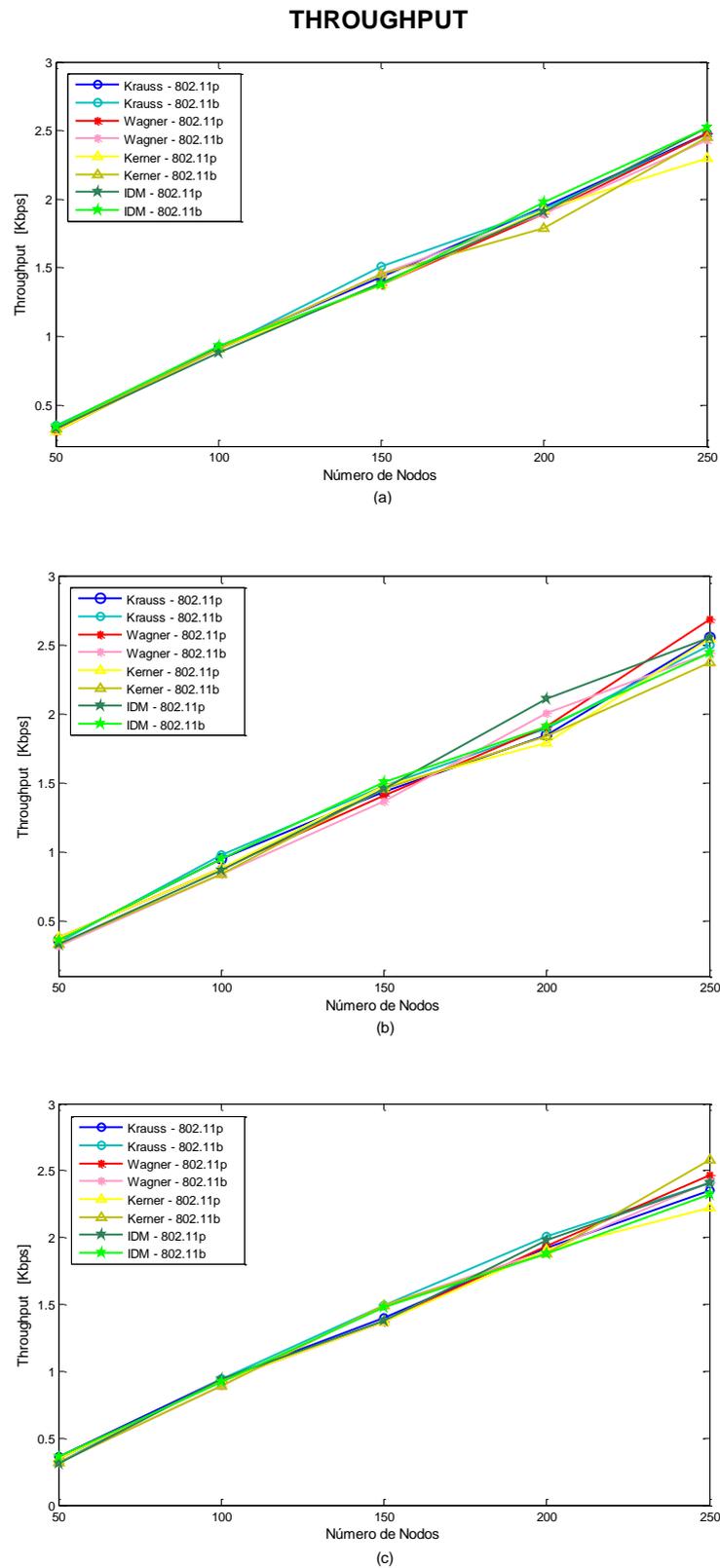


Figura 4.11: Evaluación de Modelos de movilidad con la métrica Throughput sobre el escenario 'en carretera'. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV

4.2 Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 2

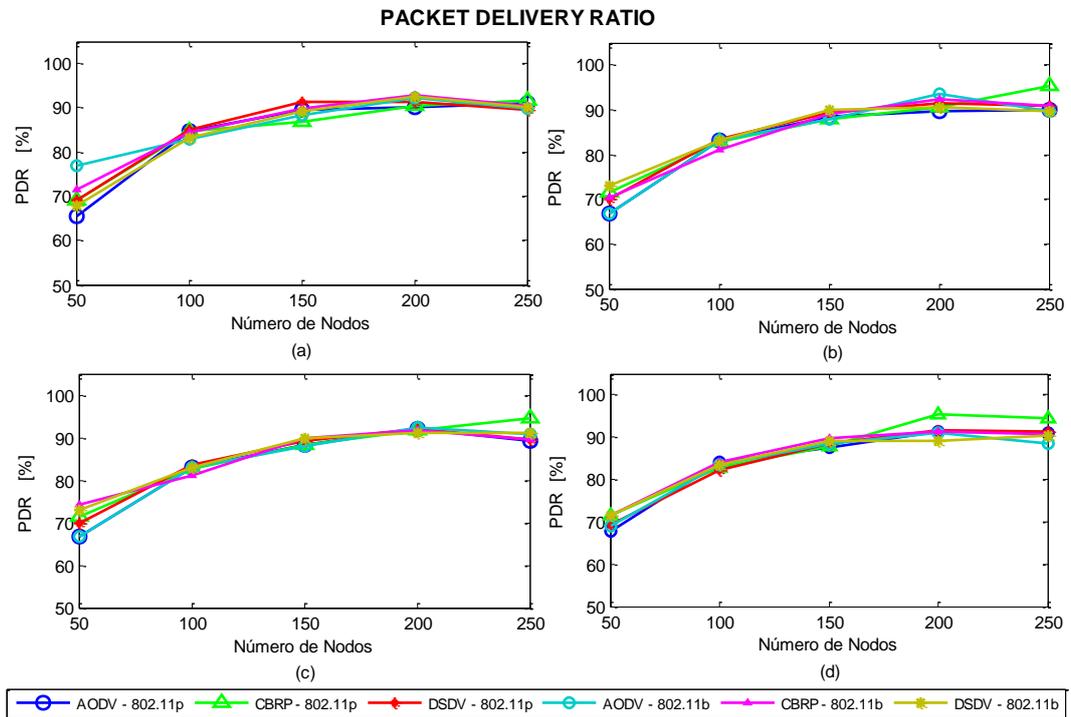


Figura 4.12: Evaluación de Protocolos de enrutamiento con la métrica PDR sobre el escenario ‘en carretera’. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM

Con la métrica de PDR (figura 4.12), se plantean las siguientes observaciones:

- Ningún protocolo consigue realizar una entrega de paquetes totalmente eficiente, pues todos ellos alcanzan un PDR por debajo del 95%. La explicación a esto podría ser que la distribución y velocidad de los vehículos sobre la carretera es muy distinta a la que se tiene en el escenario urbano, en el cuál las zonas de “downtown” favorecerían a que los nodos se encuentren más cercanos unos con otros y avancen su recorrido con velocidades lógicamente menores, pudiendo asegurar que existan nodos dentro del rango de alcance de la transmisión que se encarguen de enrutar los paquetes de datos hacia el destino. En cambio en carretera, a velocidades superiores es posible que se pierda información, ya sea porque los protocolos no consiguen mantener la ruta entre nodos fuente y destino muy distantes, o porque al alejarse a tales velocidades la transmisión no tiene alcance.
- No se considera significativa la dependencia del modelo de movilidad aplicado, pues se tienen valores de PDR semejantes con todos ellos (figura 4.13) a excepción del modelo Krauss aplicado sobre una distribución de 50 nodos con el protocolo AODV.

4.2 Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 2

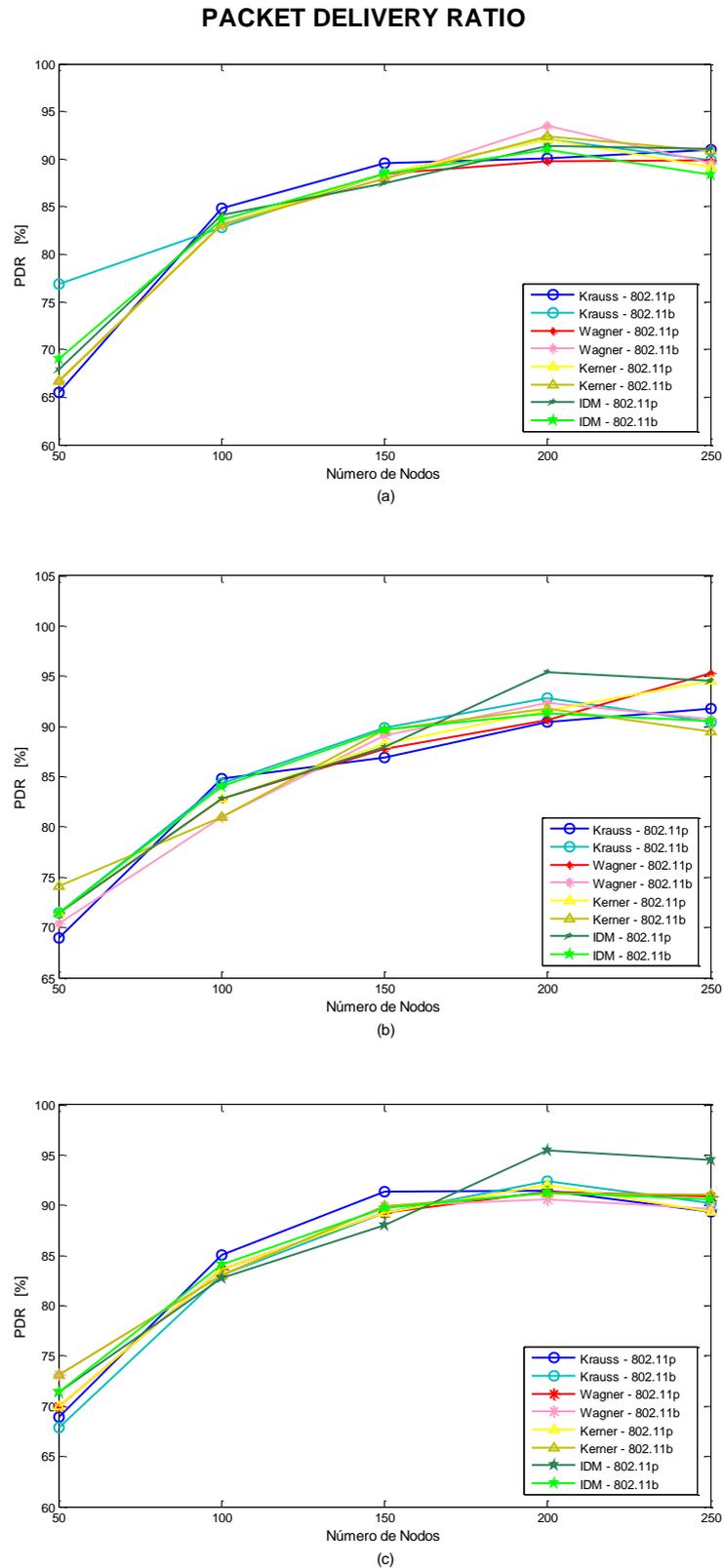


Figura 4.13: Evaluación de Modelos de movilidad con la métrica PDR sobre el escenario ‘en carretera’. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV

4.2 Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 2

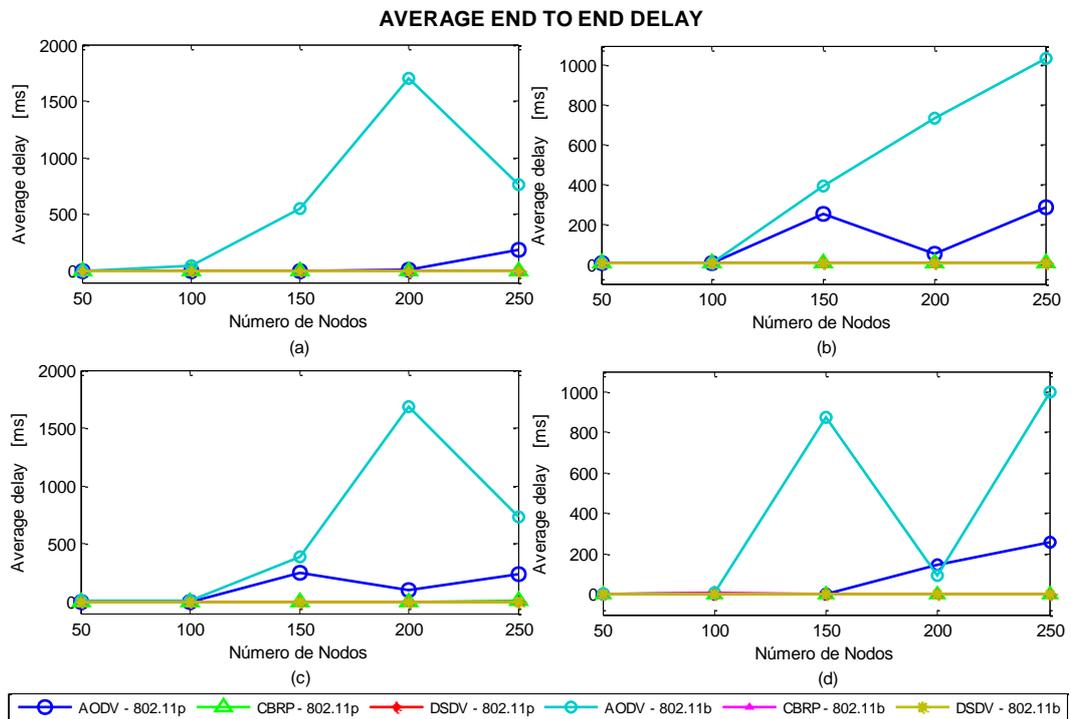


Figura 4.14: Evaluación de Protocolos de enrutamiento con la métrica Average Delay sobre el escenario ‘en carretera’. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM

En la figura 4.14, se observa lo siguiente:

- AODV con 802.11p, consigue niveles de retardo menores a los presentados en el escenario urbano 4.6 con la misma tecnología.
- AODV con 802.11b, tiene valores de retardo muy superiores a los obtenidos con 802.11p, sobre todo a partir de distribuciones de 100 nodos en adelante.
- Los protocolos DSDV y CBRP mantienen un retardo mínimo, en comparación al de AODV. En la figura 4.15, se puede apreciar de mejor manera que DSDV consigue menor retardo que CBRP, sobre ambas tecnologías 802.11p/b.
- El retardo es ligeramente dependiente del modelo de movilidad aplicado (figura 4.15).

4.2 Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 2

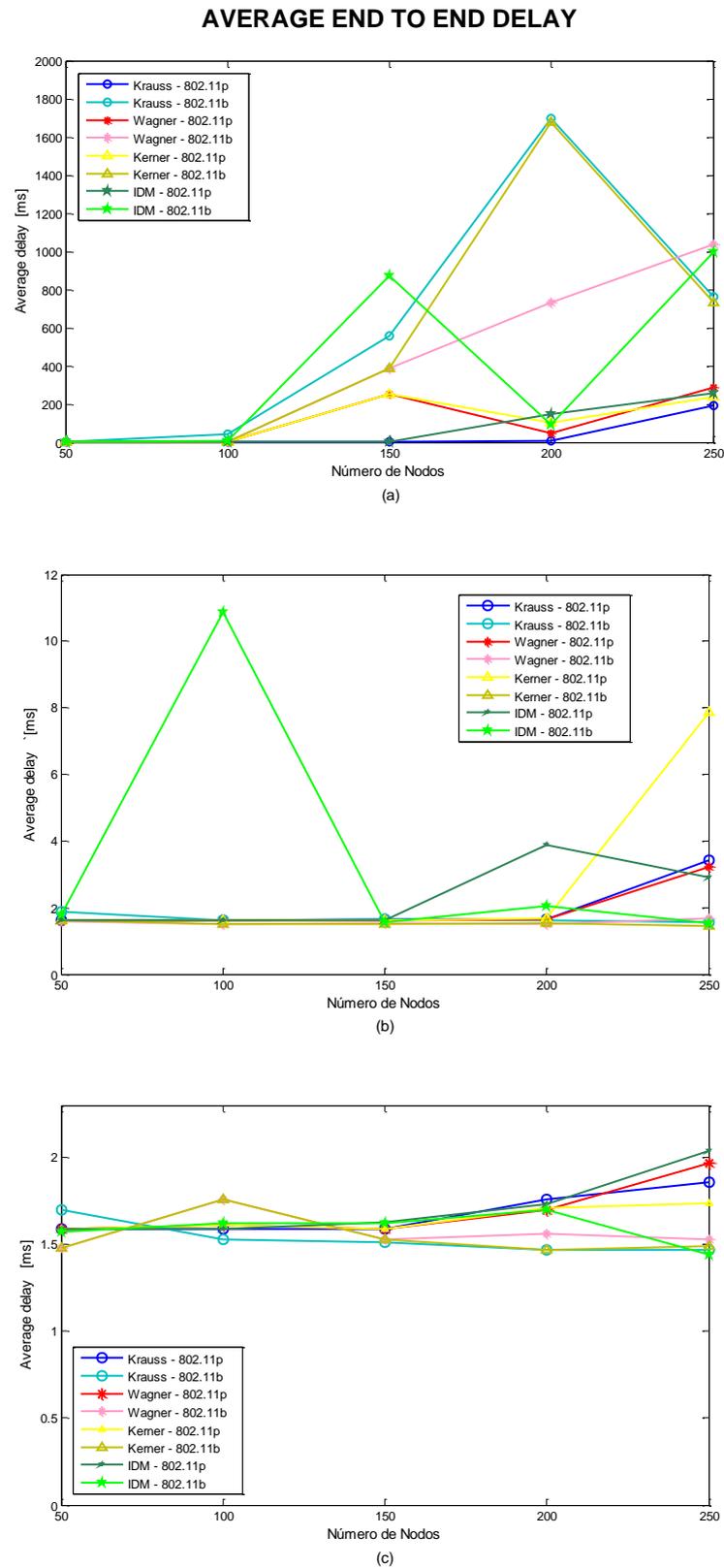


Figura 4.15: Evaluación de Modelos de movilidad con la métrica Average Delay sobre el escenario ‘en carretera’. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV

4.2 Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 2

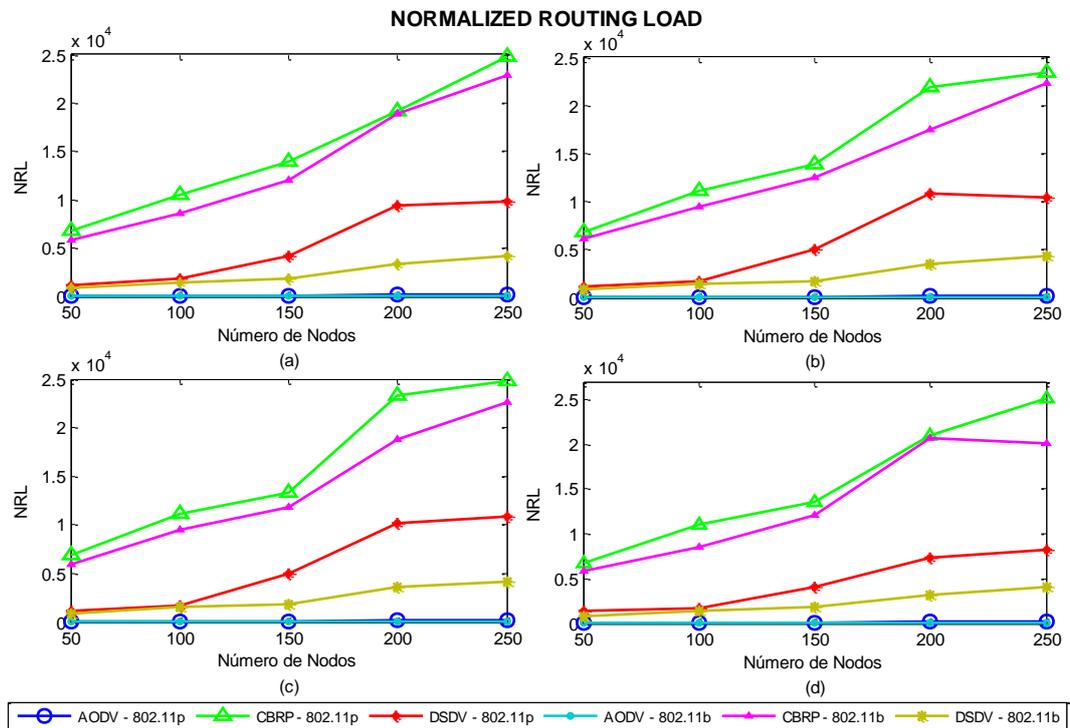


Figura 4.16: Evaluación de Protocolos de enrutamiento con la métrica NRL sobre el escenario ‘en carretera’. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM

Los resultados expuestos en la (figura 4.16), revelan lo siguiente:

- La carga de enrutamiento es elevada para CBRP, media para DSDV y baja para AODV.
- En la figura 4.17, se aprecia que con tecnología 802.11b, el NRL de AODV disminuye de forma considerable, así mismo el de DSDV cuando la densidad de red aumenta. En CBRP el NRL disminuye de forma leve.
- No existe dependencia del modelo de movilidad para los protocolos AODV y CBRP, sin embargo para DSDV, si la hay en cierta forma cuando el tamaño de la red supera los 150 nodos (figura 4.17).

4.2 Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad - Escenario 2

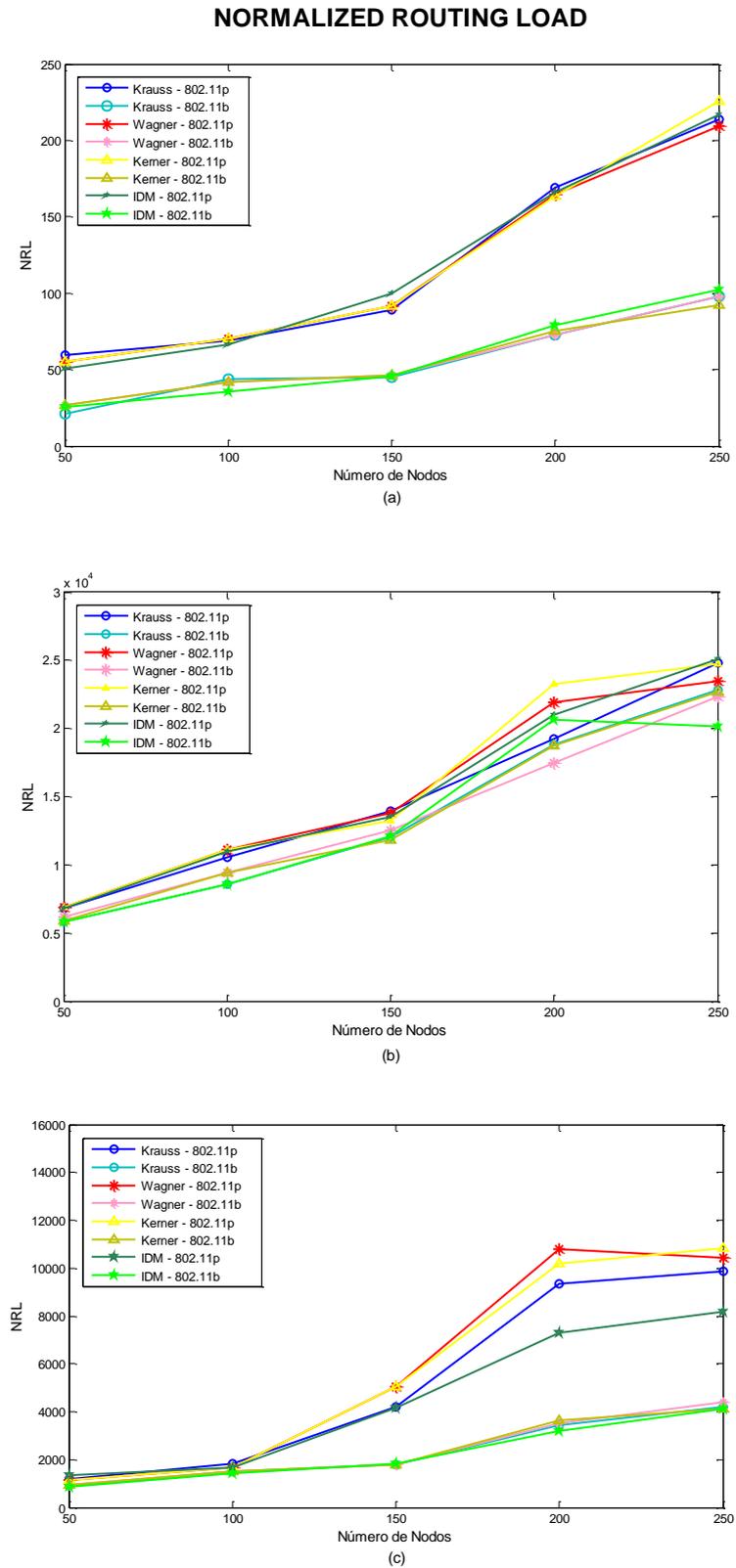


Figura 4.17: Evaluación de Modelos de movilidad con la métrica NRL sobre el escenario 'en carretera'. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV

4.3. Comparación de escenarios

Se hace la comparación de escenarios: ‘urbano’ y ‘en carretera’ para determinar la tecnología inalámbrica que mejor se ajusta al entorno y favorece al comportamiento de los protocolos.

Para evitar presentar demasiadas gráficas, se tomó al azar solamente los escenarios generados con el modelo de movilidad Kerner, debido a que al examinar principalmente la métrica PDR (figuras 4.5 y 4.13); de mayor interés porque permite medir la eficiencia de los protocolos en la entrega de paquetes y al observar en la tabulación de resultados (Anexo F), el total de paquetes recibidos en cada escenario generado con modelos de movilidad distintos, se obtiene una mejor apreciación de la leve incidencia que los mismos ejercen en la operación de los protocolos. Así por ejemplo: si con el modelo Kerner el protocolo consiguió entregar 84 paquetes, similar entrega realiza ejecutándose sobre escenarios descritos con los demás modelos de movilidad, por lo tanto no es indispensable para este último análisis, obtener gráficas de todos ellos, pues se asume que los vehículos en la realidad; presentan patrones de movilidad distintos en función de las circunstancias del medio y por lo mismo; no se puede concebir como óptimo un único modelo, ya que la importancia de estos radica en que consigan asemejarse lo mejor posible al escenario de movilidad vehicular real, y no tanto así en que logren optimizar la entrega de paquetes, pues de eso se ocupan los protocolos de enrutamiento.

Entonces, a continuación se presentan las gráficas que ayudan a la comparación de escenarios (4.18, 4.19, 4.20 y 4.21).

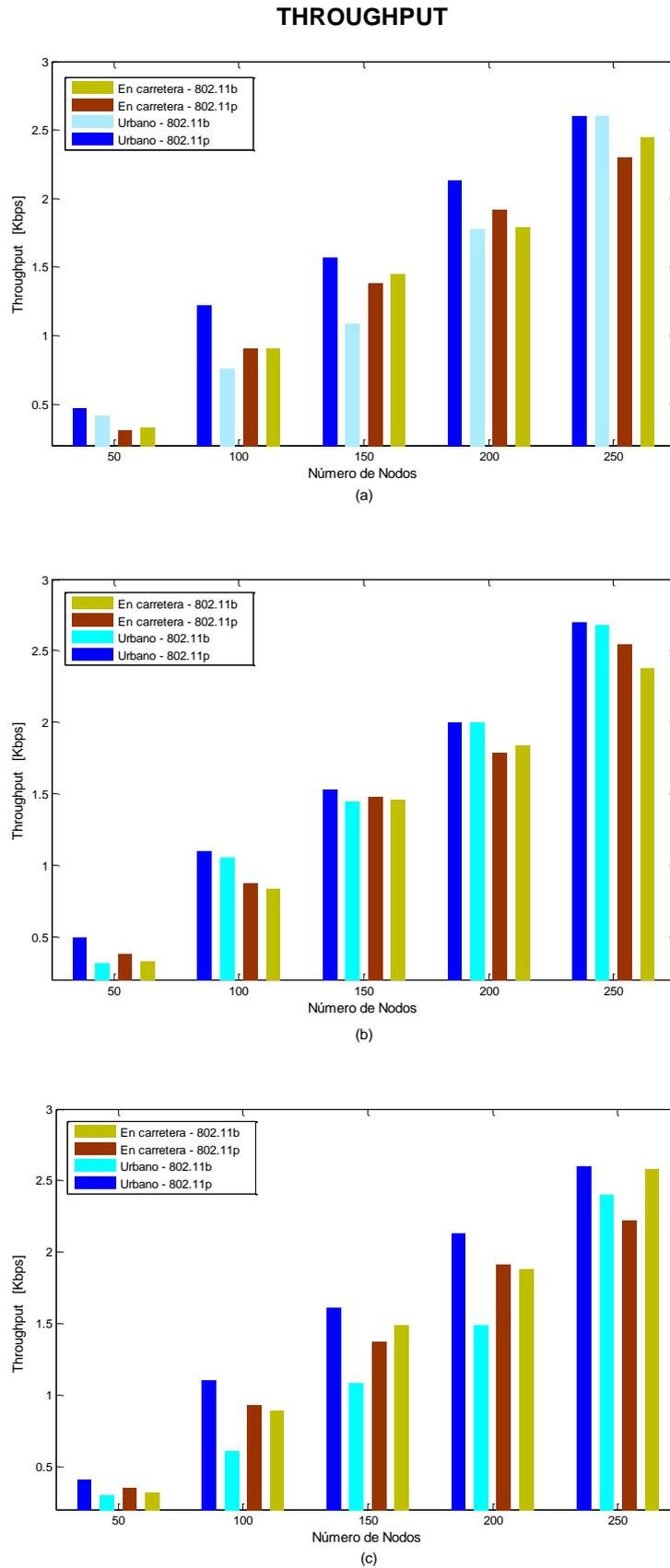


Figura 4.18: Comparación de escenarios: ‘urbano’ y ‘en carretera’ con la métrica Throughput. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV

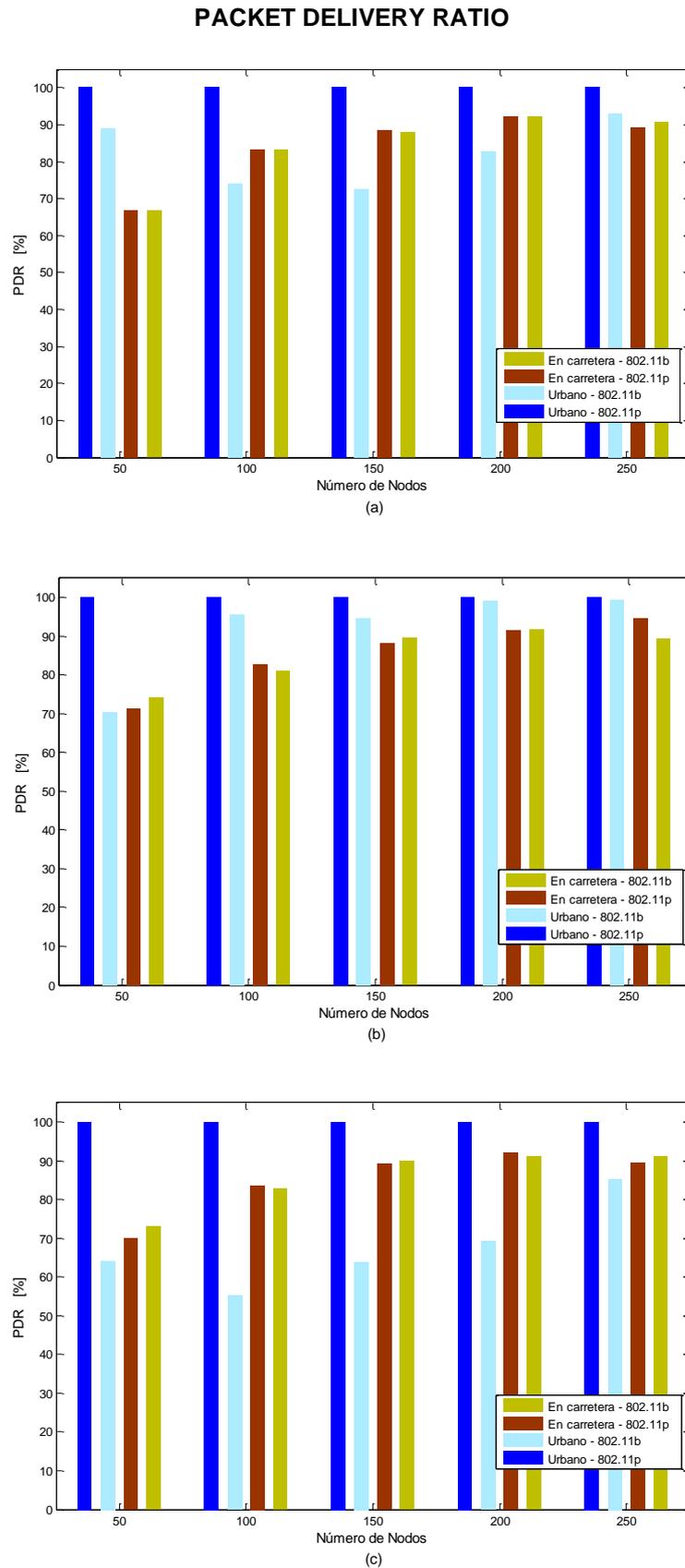


Figura 4.19: Comparación de escenarios: ‘urbano’ y ‘en carretera’ con la métrica PDR. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV

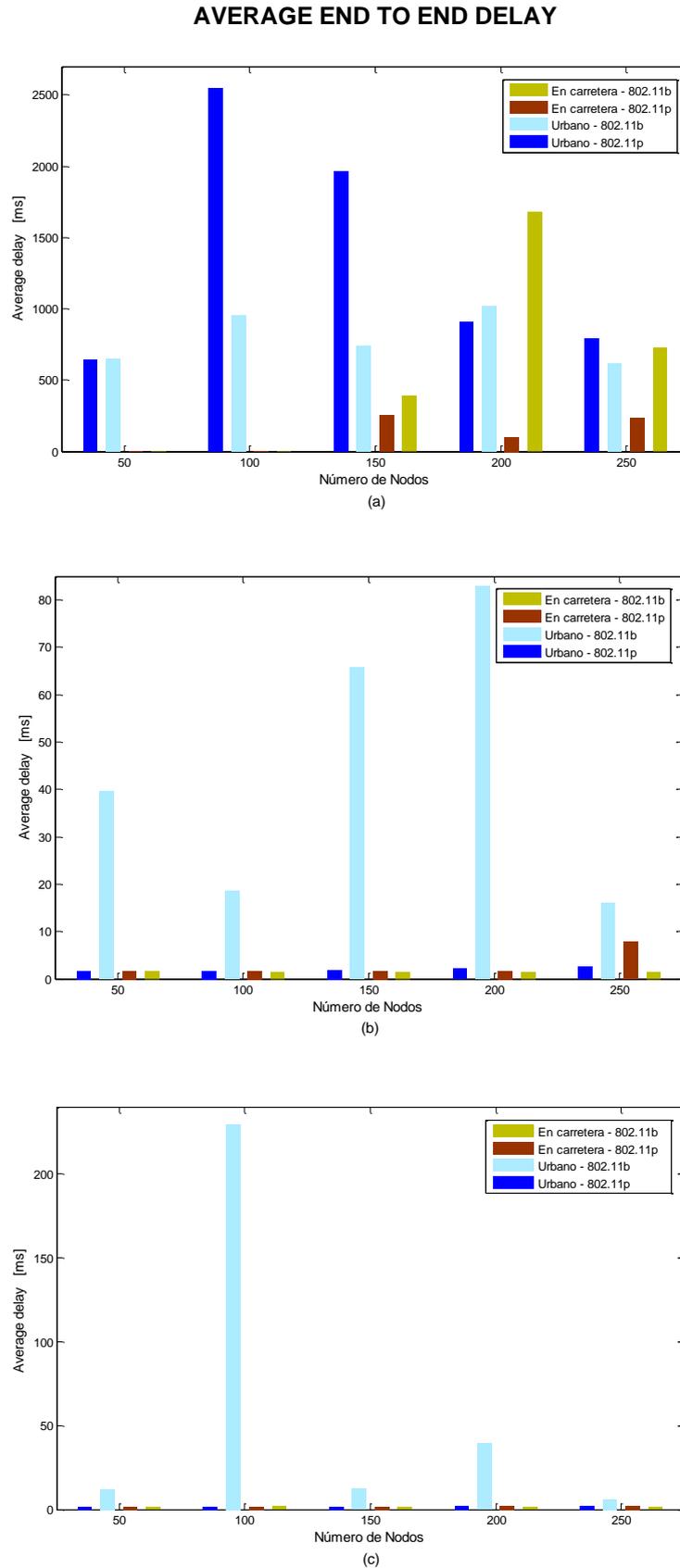


Figura 4.20: Comparación de escenarios: ‘urbano’ y ‘en carretera’ con la métrica Average delay. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV

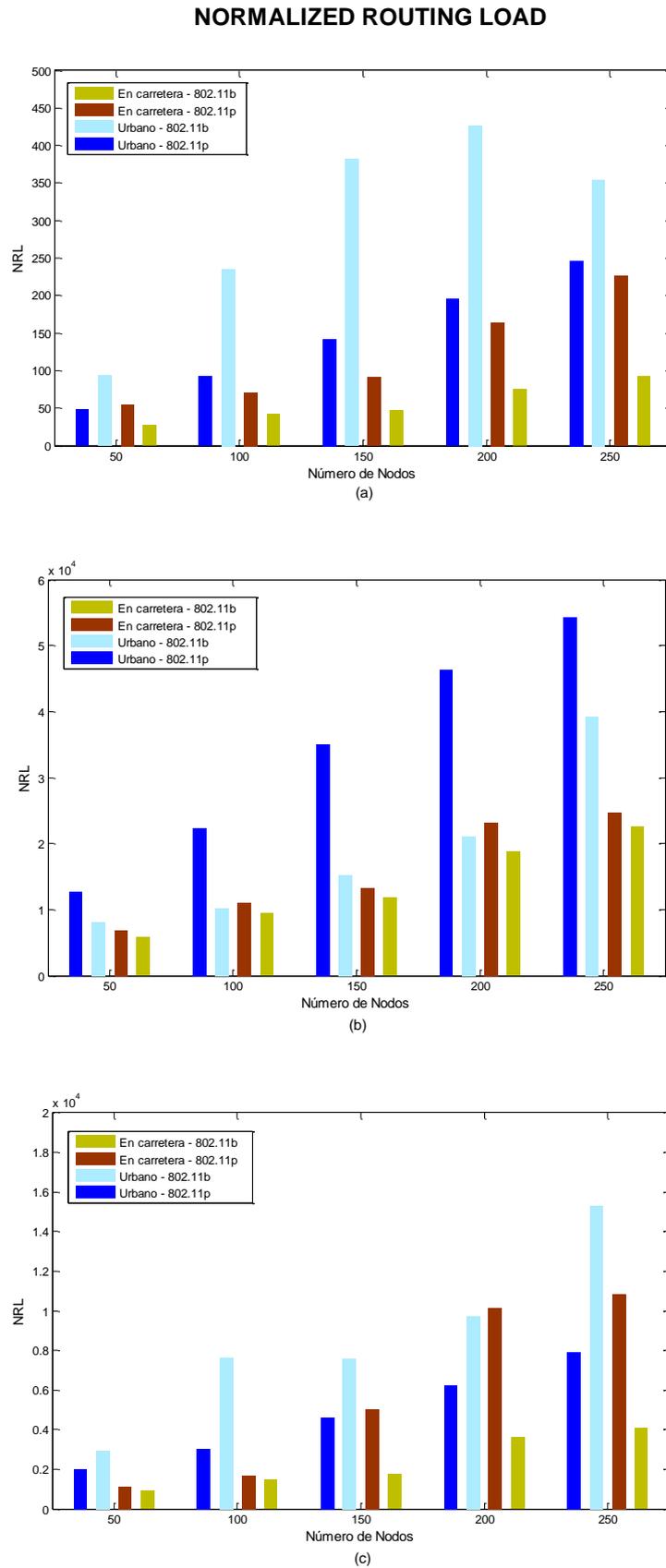


Figura 4.21: Comparación de escenarios: ‘urbano’ y ‘en carretera’ con la métrica NRL. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV

Mediante observación de las gráficas comparativas de los escenarios urbano y en carretera, mostradas anteriormente. Se plantea el análisis en función de la densidad vehicular, marcando con una x sobre el estándar en que el protocolo presenta la mejor métrica. Los resultados se muestran en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 y en ellas se puede observar la tecnología que mejor se ajusta a cada entorno.

Tabla 4.1: Análisis del desempeño de AODV en los escenarios: urbano y en carretera

AODV	Densidad vehicular	Urbano		En carretera	
Métricas	# de nodos	802.11p	802.11b	802.11p	802.11b
Throughput	50	x			x
	100	x		x	x
	150	x			x
	200	x		x	
	250	x	x		x
PDR	50	x		x	x
	100	x		x	x
	150	x		x	
	200	x			x
	250	x			x
Average Delay	50	x			x
	100		x		x
	150		x		x
	200	x			x
	250		x		x
NRL	50	x			x
	100	x			x
	150	x			x
	200	x			x
	250	x			x

Con respecto al protocolo AODV (tabla 4.1), el número de marcas sobre la tecnología 802.11p en el escenario urbano, indican que es el estándar más apropiado para este tipo de entornos y aunque el retardo aumenta en algunas de las distribuciones de nodos, el resto de métricas muestran mejor eficiencia del protocolo con ésta tecnología. Para el caso del escenario en carretera las marcas muestran que AODV tiene un mejor desempeño sobre tecnología 802.11b.

Tabla 4.2: Análisis del desempeño de CBRP en los escenarios: urbano y en carretera

CBRP	Densidad vehicular # de nodos	Urbano		En carretera	
		802.11p	802.11b	802.11p	802.11b
Throughput	50	x		x	
	100	x		x	
	150	x		x	
	200	x	x		x
	250	x		x	
PDR	50	x			x
	100	x		x	
	150	x			x
	200	x			x
	250	x		x	
Average Delay	50	x		x	
	100	x		x	
	150	x		x	
	200	x		x	
	250	x		x	
NRL	50		x		x
	100		x		x
	150		x		x
	200		x		x
	250		x		x

En los resultados de la tabla 4.2, se observa que el protocolo CBRP tiene un mejor desempeño con tecnología 802.11p en ambos escenarios: ‘urbano’ y ‘en carretera’, sin embargo para ambos casos; la carga de enrutamiento normalizada es mayor que la obtenida con la tecnología 802.11b, por lo mismo se debe tener especial cuidado sobre todo cuando la densidad de red aumenta, pues para asegurar la operación del protocolo; se requiere consumir una cierta cantidad de recursos y el ancho de banda disponible para los paquetes de datos útiles puede verse afectado.

Tabla 4.3: Análisis del desempeño de DSDV en los escenarios: urbano y en carretera

DSDV	Densidad vehicular	Urbano		En carretera	
Métricas	# de nodos	802.11p	802.11b	802.11p	802.11b
Throughput	50	x		x	
	100	x		x	
	150	x			x
	200	x	x	x	
	250	x			x
PDR	50	x			x
	100	x		x	
	150	x			x
	200	x		x	
	250	x			x
Average Delay	50	x		x	
	100	x			x
	150	x		x	
	200	x		x	
	250	x		x	
NRL	50	x			x
	100	x			x
	150	x			x
	200	x			x
	250	x			x

Finalmente respecto al protocolo DSDV (tabla 4.3) vemos que su desempeño es óptimo con tecnología inalámbrica 802.11p en el escenario urbano y que en carretera se obtiene una relación 11 a 9 a favor de la tecnología 802.11b. Al ser la diferencia mínima, la restricción para escoger entre una de las dos tecnologías estaría impuesta por el costo de las tarjetas.

Ahora bien, si se tendría que elegir una sola tecnología para ambos escenarios, se optaría por la 802.11p, por su diseño exclusivo para comunicaciones vehiculares y porque permitiría una transmisión más libre de interferencias que con tecnología 802.11b; pues en nuestro país [53], actualmente esta banda se encuentra saturada debido a que es una banda no licenciada y se ha destinado en gran parte al uso de enlaces fijos, móviles, radiolocalización y aficionados.

Por otra parte el diseño del estándar 802.11p está orientado a permitir la interoperabilidad con distintas tecnologías pudiendo extenderse, las comunicaciones también hacia la red de infraestructura.

5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Cumplidos finalmente los objetivos propuestos y finalizada la investigación y ejecución de la presente tesis, se exponen las siguientes conclusiones y recomendaciones.

5.1. Conclusiones

- El uso de mapas reales y modelos de movilidad, favoreció a la inserción de realismo en la simulación, sin embargo sigue habiendo incertidumbre en los resultados; pues no se ha considerado en la simulación del entorno urbano la ubicación de semáforos en las intersecciones de forma semejante a la realidad y el efecto de obstáculos característicos del medio que necesariamente introducen pérdidas en la comunicación.
- Este estudio permitió analizar las prestaciones de las interfaces inalámbricas seleccionadas, pudiendo concluir de forma general que la OBU 102 que opera sobre el estándar 802.11p es apropiada para entornos VANET urbanos y que la WMIC Cisco 2301 sobre la base de 802.11b, tiene mejor desempeño sobre entornos VANET en carretera.
- Sobre el escenario en carretera resulta evidente que el protocolo AODV, es el que mejor desempeño tiene independientemente de la tecnología que se seleccione, y aunque se ha dicho que sobre el estándar 802.11b los tres protocolos tienen un desempeño óptimo, si se considera enrutamiento AODV, sería preferible aplicarlo sobre la base 802.11p, pues aunque signifique incrementar un poco el ‘overhead’, se conseguiría reducir significativamente el retardo en la transmisión y recepción de paquetes de datos hacia el destino.

- A partir de la evaluación de los modelos de movilidad sobre los escenarios ‘urbano’ y ‘en carretera’, se encontró que en este último; existe una diferencia entre modelos de movilidad de aproximadamente un 5 a 10 %, considerando la métrica PDR con ambas tecnologías de comunicación (802.11p y 802.11b), lo cual es tolerable o insignificante debido a que el tráfico en carretera no se ve afectado por las intersecciones como en el caso urbano; donde se obtiene una pérdida levemente mayor (entre 20 a 30 %) con tecnología 802.11b, sobre todo cuando la red se compone de 50 a 100 nodos, tendiendo a ser casi irrelevante (3 a 5 %) en escenarios más grandes. No obstante, con tecnología 802.11p; la diferencia entre modelos de movilidad es prácticamente nula. Por lo tanto, se concluye que los modelos de movilidad no tienen incidencia importante en el tráfico vehicular en carretera, pero si la tienen en el tráfico vehicular urbano con tecnología 802.11b.
- En el entorno urbano, CBRP ejecutándose sobre el estándar 802.11b, reduce el nivel de overhead obtenido con el mismo protocolo sobre 802.11p, lo cual es significativo para salvaguardar el ancho de banda, evitando que se haga un consumo exagerado del mismo, en la operación del protocolo.
- DSDV puede ser un buen sustituto de CBRP, en el escenario urbano, ejecutándose sobre el estándar 802.11p, ya que asegurando una entrega de paquetes de datos confiable, minimiza la carga de enrutamiento de forma significativa.
- Comparando la cantidad de paquetes que los protocolos son capaces de entregar al destino, se llega a la conclusión de que AODV tiene mejor desempeño sobre el escenario urbano operando con el estándar 802.11p, principalmente por su bajo overhead y alta escalabilidad. Su desempeño es óptimo, sobre todo en redes con mayor número de nodos, pues consigue disminuir el retardo promedio.
- CBRP puede ser ideal como fuente de enrutamiento en RSUs, debido a que presenta retardos sumamente bajos, principalmente en redes pequeñas. Puede ser óptimo para indicar cambio de luces a los semáforos en función de la presencia-ausencia de vehículos en las intersecciones. (consideración para trabajos futuros).
- Los datos expuestos en la tabulación de resultados, permiten distinguir que en el escenario urbano hay mayor desvanecimiento y multitrayecto, apreciable en los valores de NRL superiores a los del escenario en carretera, que indican que en el escenario urbano los protocolos han requerido del envío de una gran

cantidad de mensajes de control para el descubrimiento y mantenimiento de rutas, a diferencia del escenario en carretera donde para enviar similar cantidad de paquetes se ha requerido menor carga de enrutamiento.

5.2. Recomendaciones

- Por costos de implementación, difícilmente se puede examinar que protocolo de comunicación resulta adecuado implementar en los entornos VANET reales. Montar una red de ese tipo; implica equipar algunos vehículos con interfaces inalámbricas, y sin previa evaluación de las capacidades de comunicación de dichas tarjetas; se corre el riesgo de hacer una adquisición deficiente de las mismas, la simulación constituye la solución más apropiada para predecir el comportamiento de los protocolos de comunicación sobre redes ad-hoc vehiculares y para examinar las configuraciones básicas de las tarjetas.
- Para posteriores estudios sería importante considerar una adecuada simulación del canal de comunicación, pues aunque se ha introducido con el modelo de propagación Nakagami los efectos de multitrayecto (desvanecimiento) para los escenarios ‘urbano’ y ‘en carretera’, aún se tiene la incertidumbre de que se haya obtenido comunicación exitosa al 100 % con todos los protocolos bajo el estándar 802.11p en el escenario urbano.
- Es recomendable tomarse el tiempo necesario en definir muy bien los escenarios antes de ejecutar las simulaciones, pues la omisión de algún parámetro en la configuración de red puede arrojar resultados poco confiables.
- En la generación de escenarios con C4R, es preferible utilizar como máximo dos zonas de ‘downtown’, ya que sobrepasar este límite puede ocasionar errores en la obtención de la traza de movilidad, o generarla de forma tal; que al ejecutarse en la simulación con NS-2, no logre completarse el tiempo de simulación obteniéndose trazas *.tr incompletas.
- Para poder ejecutar el protocolo CBRP con más de 150 nodos, fue necesario modificar el fichero ntable.h ubicado en el directorio: /home/veronica/ns-allinone-2.34/ns-2.34/cbrp cambiando el valor establecido por defecto en las instrucciones: #define BIG 250 y #define MAX_NODE_NUM 200, a 550 y 500 respectivamente. Los cambios tienen efecto, reinstalando ns-2.34 desde: /ns-allinone-2.34 con el comando ./install y luego ejecutando la validación desde: /ns-allinone-2.34/ns-2.34 con ./validate.

Bibliografía

- [1] ERICSSON: “*More than 50 billion connected devices*”, (Febrero 2011), <http://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp-50-billions.pdf> 4
- [2] *Intelligent Transport Systems and Services for Europe*, <http://www.ertico.com/> 4
- [3] *Intelligent Transportation Society of America*, <http://www.itsa.org/> 4
- [4] *Intelligent Transportation Systems - Japan*, <http://www.its-jp.org/english/> 4
- [5] PROJECT GROUP: “*Walkie-Talkie: Vehicular Communication Systems to Enable Safer, Smarter, and Greener Transportation*”, <http://www.grc.upv.es/walkietalkie/index.html> 4
- [6] S. CORSON & J. MACKER: “*Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations*” (RFC 2501), <http://www.ietf.org/rfc/rfc2501.txt> 6
- [7] J. HOEBEKE, I. MOERMAN, B. DHOEDT, & P. DEMEESTER: “*An Overview of Mobile Ad Hoc Networks: Applications and Challenges*”, pp. 60-66, (Julio 2004). <http://www-di.inf.puc-rio.br/~endler/courses/Mobile/papers/MANET-Challenges.pdf> 6
- [8] “*Car to Car Communication System – Inter-Vehicle Communication*”. <http://electronicsbus.com/car-to-car-communication-system-inter-vehicle-communication-vehicular-network/> 6, 9
- [9] *IETF Mobile Ad-hoc Networks (MANET) Working Group: Mobile Ad-hoc Networks (MANET) Charter*, <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- [10] I. CHLAMTAC, M. CONTI & J. J.-N. LIU: “*Mobile adhoc networking: imperatives and challenges*”, pp. 13-64, (2003). 14
- [11] MAHMOUD AL-QUTAYRI, CHAN YEUN & FAISAL AL-HAWI (2010). “*Security and Privacy of Intelligent VANETs*”, Computational Intelligence and Modern Heuristics, Al-Dahoud Ali (Ed.), ISBN: 978-953-7619-28-2, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/computational-intelligence-and-modern-heuristics/security-and-privacy-of-intelligent-vanets> X, 5
- [12] H. MOUSTAFA, S. MOHAMMED & M. JERBI: “*Introduction to Vehicular Networks*”, pp. 1-19, (Noviembre 2008). http://www.senouci.net/download/Publications/Book-Chapters/Senouci_AU-2008.pdf 6, 7, 8, 9, 12
- [13] R. BALDESSARI, A. FESTAG & M. LENARDI: “*C2C-C Requirements for Usage of NEMO in VANETs*” (Marzo 2007). <http://www.ietf.org/proceedings/68/slides/nemo-7.pdf> X, 7
- [14] SI-HO CHA¹, MIN-WOO RYU² & KUK-HYUN CHO²: “*A Survey of Greedy Routing Protocols for Vehicular Ad Hoc Networks*” (Abril 2012). http://www.smartcr.org/view/download.php?filename=smartcr_vol2no2p3.pdf X, X, 8, 9

- [15] F. MARTÍNEZ, J. CANO & C. CALAFATE: “*Improving Vehicular ad hoc Network Protocols to Support Safety Applications in Realistic Scenarios*”, Universidad Politécnica de Valencia, pp. 1-194 (Diciembre 2010). x, 8
- [16] *DSRC - Technology*. http://www.oki.com/jp/SSC/ITS/eng/dsrc_prkidxe.html 9
- [17] A. FESTAG, R. BALDESSARI, W. ZHANG, L. LE, A. SARMA & M. FUKUKAWA: “*CAR-2-X Communication for Safety and Infotainment in Europe*”. NEC Technical Journal Vol.3 No.1/2008, pp. 21-26. <http://www.nec.co.jp/techrep/en/journal/g08/n01/080106.pdf> 9
- [18] ROHDE & SCHWARZ: “*WLAN 802.11p Measurements for Vehicle to Vehicle (V2V) DSRC*”, pp. 1-24, (Septiembre 2009). http://www2.rohde-schwarz.com/file_12631/1MA152_2e.pdf x, xiv, 10
- [19] F. MARTÍNEZ: *Improving Vehicular ad hoc Network Protocols to Support Safety Applications in Realistic Scenarios*, pp. 1-218, (Diciembre 2010). <http://riunet.upv.es/handle/10251/9195> x, x, 11
- [20] *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments*, pp. 1-35, (Julio 2010). <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11p-2010.pdf> 11, 12
- [21] H. HARTENSTEIN & K. LABERTEAUX: “*VANET: Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies*” John Wiley & Sons Ltd., 1 Ed. (2010) 12, 36
- [22] B. BAKO & M. WEBER (2011). “*Efficient Information Dissemination in VANETs, Advances in Vehicular Networking Technologies*”, Dr Miguel Almeida (Ed.), ISBN: 978-953-307-241-8, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/advances-in-vehicular-networking-technologies/efficient-information-dissemination-in-vanets> 12
- [23] N. BRAHMI, M. BOUSSEJRA & J. MOUZNA (2011). “*Routing in Vehicular Ad Hoc Networks: towards Road-Connectivity Based Routing*”, Mobile Ad-Hoc Networks: Applications, Prof. Xin Wang (Ed.), ISBN: 978-953-307-416-0, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/mobile-ad-hoc-networks-applications/routing-in-vehicular-ad-hoc-networks-towards-road-connectivity-based-routing> x, 13, 14
- [24] Z. RAWASHDEH & S. MAHMUD (2011). “*Communications in Vehicular Ad Hoc Networks*”, Mobile Ad-Hoc Networks: Applications, Prof. Xin Wang (Ed.), ISBN: 978-953-307-416-0, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/mobile-ad-hoc-networks-applications/communications-in-vehicular-ad-hoc-networks> 13, 14
- [25] S. KERREMANS: “*Ad hoc networks and the future of mobile network operators*”, pp. 69-100, (Septiembre 2011). http://alexandria.tue.nl/extra2/afstvers1/tm/Kerremans_2011.pdf 14, 40, 41
- [26] C. PERKINS & P. BHAGWAT: “*Highly Dynamic Destination Sequenced Distance Vector Routing DSDV for Mobile Computers*”. <http://people.cs.umass.edu/~mcorner/courses/691M/papers/perkins.pdf> 14
- [27] GUOYOU HE: “*Destination-Sequenced Distance Vector (DSDV) Protocol*”. <http://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38030/k02/Papers/03-Guoyou.pdf> 14
- [28] K. GORANTALA: “*Routing Protocols in Mobile Ad-hoc Networks*”. (Junio 2006), <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.159.9713&rep=rep1&type=pdf> xiv, 18

- [29] E. ROYER & CHAI-KEONG TOH: “A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks”. http://graphics.stanford.edu/courses/cs428-03-spring/Papers/readings/Networking/Royer_IEEE_Personal_Comm99.pdf x, XIV, 15, 18
- [30] P. PATIL & R. SHAH: “Adjacency Cluster Based Routing Protocol”. International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies (IJESET), Vol. 1, pp. 77-82 (Febrero 2012) <http://www.ijeset.com/media/9N2-DEPTH-3-ADJACENCY-CLUSTER-BASED-ROUTING.pdf> XIV, 18
- [31] T. HOLLERUNG: “The Cluster-Based Routing Protocol”. pp. 1-12. (2004) <http://hollerung.org/daniel/en/studies/the-cluster-based-routing-protocol/pdf> x, x, 16, 17
- [32] A. AVILA: “Elección de Rutas Alternas en un Escenario de Tráfico, por medio de la Simulación con Autómatas Celulares”. pp.1-69. http://newton.azc.uam.mx/mcc/01_esp/11_tesis/tesis/terminada/040701_avila_medrano_alvaro.pdf 19
- [33] *Traffic Simulation Classes*. modificada el 23 de noviembre de 2011 http://sumo.sourceforge.net/doc/current/docs/userdoc/Theory/Traffic_Simulations.html x, 19
- [34] R. MURCIA: “Evaluación de herramientas de simulación de Redes Vehiculares”. (septiembre 2010). <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/1788/1/pfm150.pdf> x, 19, 26, 32
- [35] S. KRAUSS, P. WAGNER & C. GAWRON: “Metastable States in a Microscopic Model of Traffic Flow”. (1997) <http://sumo.sourceforge.net/pdf/sk.pdf> 20
- [36] S. KRAUSS: “Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics”. (1998) <http://sumo.sourceforge.net/pdf/KraussDiss.pdf> 20
- [37] A. PARDO: “C4R: Generación de Modelos de movilidad para redes de vehículos a partir de mapas reales”. Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas de la Escuela Universitaria Politécnica de Teruel. pp.1-91. (Marzo, 2011). x, XIV, XIV, 20, 21, 22, 23, 24, 28, 29
- [38] P. WAGNER “How human drivers control their vehicle”. (Febrero, 2008). pp. 1-5 <http://arxiv.org/pdf/physics/0601058.pdf> 21
- [39] “Three-phase traffic theory”. modificada el 06 de febrero de 2012. http://en.wikipedia.org/wiki/Three_phase_traffic_theory x, 21, 22
- [40] B. RAMAKRISHNAN, DR. R. S. RAJESH & R. S. SHAJI “Performance Analysis of 802.11 and 802.11p in Cluster Based Simple Highway Model”, pp. 420-426, International Journal of Computer Science and Information Technologies (IJCSIT) Vol. 1, (2010). <http://www.ijcsit.com/docs/vol1issue5/ijcsit2010010520.pdf> 24, 40
- [41] D. ACATAUASSU, I. COUTO, P. ALVES & K. DIAS “Performance Evaluation of Inter-Vehicle Communications Based on the Proposed IEEE 802.11p Physical and MAC Layers Specifications”, The Tenth International Conference on Networks, (2011). 24, 40
- [42] M. FOGUE, P. GARRIDO, F. J. MARTINEZ, J. CANO, C. CALAFATE & P. MANZONI “A Realistic Simulation Framework for Vehicular Networks”, (2012), <http://eudl.eu/doi/10.4108/icst.simutools.2012.247682>. 91, 92
- [43] T. ISSARIYAKUL & E. HOSSAIN: “Introduction to Network Simulator NS2”, (2008), <http://kpath-routing-in-ns2.googlecode.com/files/Introduction%20to%20Network%20Simulator%20NS2.pdf>. 35

- [44] P. KUMAR, K. LEGO & DR. T. TUITHUNG: “*Simulation based Analysis of Adhoc Routing Protocol in Urban and Highway Scenario of VANET*”. International Journal of Computer Applications (0975 - 8887) Vol. 12, No. 10, pp. 42-49, (Enero 2011). 24, 40
- [45] H. BINDRA, S. MAAKAR & A. SANGAL: “*Performance Evaluation of Two Reactive Routing Protocols of MANET using Group Mobility Model*”. IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 7, Issue 3, No 10, pp. 38-43, (Mayo 2010). 40, 41
- [46] P. KUMAR & K. LEGO: “*Comparative Study of Radio Propagation and Mobility Models in Vehicular Adhoc Network*”. International Journal of Computer Applications, Vol.16, No.8, pp. 37-42, (Febrero 2011). 2, 24, 40
- [47] NIDHI & D.K. LOBIYAL: “*Performance Evaluation of Realistic VANET using Traffic Light Scenario*”. International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN), Vol.4, No.1, pp. 327-249, (Febrero 2012). 24, 40
- [48] A. JAFARI: “*Performance Evaluation of IEEE 802.11p for Vehicular Communication Networks*”, pp. 1-78, (Septiembre 2011). 41
- [49] S. KUMAR, N. JAVAID, Z. YOUSUF, H. KUMAR, Z. A. KHAN & A. BIBI: “*DSDV, DYMO, OLSR: Link Duration and Path Stability*”. <http://arxiv.org/pdf/1207.1777.pdf> (2012). 47
- [50] A. KHAN, S. SADHU & M. YELESWARAPU: “*A comparative analysis of DSRC and 802.11 over Vehicular Ad hoc Networks*”. <http://www.cs.ucsb.edu/~arijitkhan/Papers/cs276.pdf> (2009). 2, 36
- [51] M. BÁGUENA, C. T. CALAFATE, J-C. CANO & P. MANZONI: “*Simulación de redes vehiculares: retos hacia un modelo más realista*”. pp. 1-6, (Septiembre, 2011) http://www.jornadassarteco.org/js2012/papers/paper_76.pdf. XI, 36
- [52] E. MINACK: “*Evaluation of the influence of channel conditions on Car2X Communication*”. Diploma Thesis, Chemnitz University of Technology, (2005). x, 29
- [53] J. ALBA: “*Estudio y simulacion de una red AD-HOC vehicular VANET*”. Facultad de Ingeniería Electrónica. ESPE. Sede Sangolquí, pp. 1-156 (2009) <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/317/1/T-ESPE-021354.pdf> 68
- [54] *Instalación de ns2.34 en ubuntu 10.04*, modificada el 22 de noviembre de 2010. <http://rfsolano.blogspot.com/2010/11/instalar-ns-234-en-ubuntu-1004.html> 81
- [55] *NS-2 Trace Formats*, modificada el 25 de enero de 2010. http://nsnam.isi.edu/nsnam/index.php/NS-2_Trace_Formats#New_Wireless_Trace_Formats XIV, XIV, 101, 102

ANEXOS

ANEXO A

Instalación del Simulador de Red NS-2

A.1. Descarga e instalación de ns-2.34

1. La descarga la realizamos mediante consola, anteponiendo **wget** a la dirección del repositorio web de ns2.34, <http://sourceforge.net/projects/nsnam/files/allinone/ns-allinone-2.34/ns-allinone-2.34.tar.gz>.
2. Descomprimir archivo de preferencia en el directorio: /home/veronica (sustituir por su directorio), e instalar algunos paquetes requeridos:

```
tar -xzf ns-allinone-2.34.tar.gz
```

```
cd ns-allinone-2.34
```

```
sudo apt-get install build-essential autoconf automake libxmu-dev gcc-4.3
```

3. Editar el archivo Makefile.in, que se encuentra en el directorio: ns-allinone-2.34/otcl-1.13, reemplazando: `CC= @CC@` por `CC= gcc-4.3`, en vista de que otcl no funciona con la versión de gcc instalada por defecto.
4. Desde el directorio: ns-allinone-2.34, ejecutar la instalación, con el comando:

```
./install
```

A.2. Configuración de variables de entorno

1. Editar el archivo de comandos .bashrc, de la siguiente manera:

```
gedit ~/.bashrc
```

Se añaden al final las líneas de código que siguen, sin olvidar sustituir /home/veronica, por su directorio.

```
# LD_LIBRARY_PATH
OTCL_LIB=/home/veronica/ns-allinone-2.34/otcl-1.13
NS2_LIB=/home/veronica/ns-allinone-2.34/lib
X11_LIB=/usr/X11R6/lib
USR_LOCAL_LIB=/usr/local/lib
export LD_LIBRARY_PATH=$LD_LIBRARY_PATH:$OTCL_LIB:$NS2_LIB
export LD_LIBRARY_PATH=$LD_LIBRARY_PATH:$X11_LIB:$USR_LOCAL_LIB

# TCL_LIBRARY
TCL_LIB=/home/veronica/ns-allinone-2.34/tcl8.4.18/library
USR_LIB=/usr/lib
export TCL_LIBRARY=$TCL_LIB:$USR_LIB

# PATH
XGRAPH=/home/veronica/ns-allinone-2.34/bin:/home/veronica/ns-allinone-2.34/
tcl8.4.18/unix:/home/veronica/ns-allinone-2.34/tk8.4.18/unix:/home/
veronica/ns-allinone-2.34/xgraph-12.1/
NS=/home/veronica/ns-allinone-2.34/ns-2.34/
NAM=/home/veronica/ns-allinone-2.34/nam-1.13/
export PATH=$PATH:$XGRAPH:$NS:$NAM
```

2. Actualizar o recargar el .bashrc, aplicando:

```
source ~/.bashrc
```

Seguidamente, verificar que aparezca el símbolo de porcentaje, como resultado de la ejecución de la sentencia: ns A.1. Si es así, los procesos ejecutados anteriormente fueron exitosos y se puede proceder a la validación.

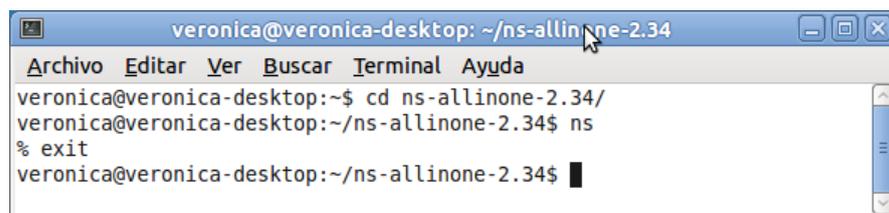
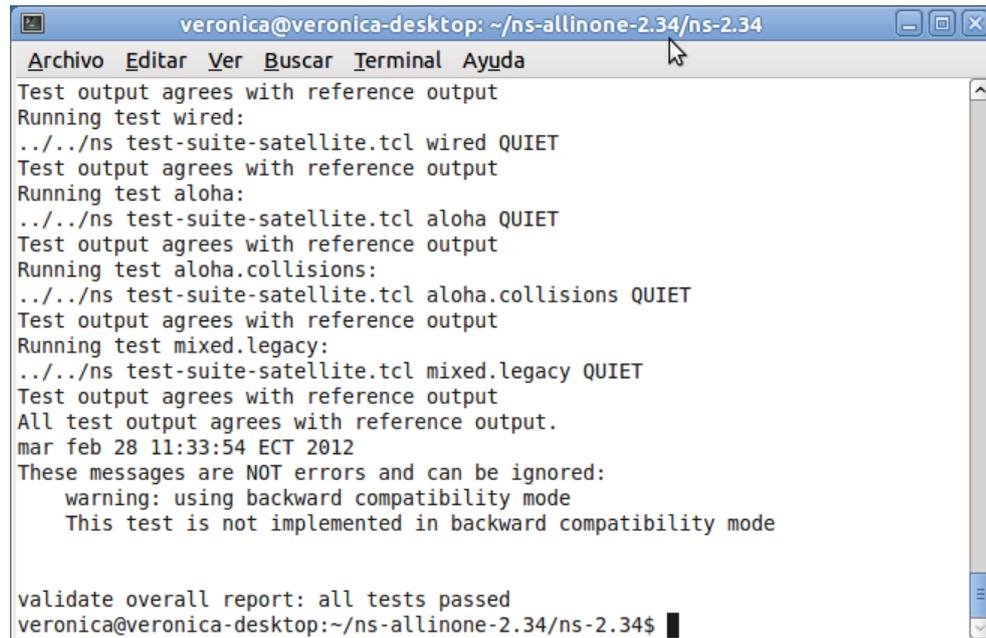


Figura A.1: Instalación correcta de ns2.34

A.3. Validación

1. La validación se lleva a cabo en el directorio: /ns-allinone-2.34/ns-2.34, aplicando el comando `./validate`

Debe esperar un tiempo prudencial para permitir que el proceso se ejecute completamente, la figura A.2 le permitirá comprobar que la validación fue satisfactoria.



```

veronica@veronica-desktop: ~/ns-allinone-2.34/ns-2.34
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
Test output agrees with reference output
Running test wired:
../../ns test-suite-satellite.tcl wired QUIET
Test output agrees with reference output
Running test aloha:
../../ns test-suite-satellite.tcl aloha QUIET
Test output agrees with reference output
Running test aloha.collisions:
../../ns test-suite-satellite.tcl aloha.collisions QUIET
Test output agrees with reference output
Running test mixed.legacy:
../../ns test-suite-satellite.tcl mixed.legacy QUIET
Test output agrees with reference output
All test output agrees with reference output.
mar feb 28 11:33:54 ECT 2012
These messages are NOT errors and can be ignored:
  warning: using backward compatibility mode
  This test is not implemented in backward compatibility mode

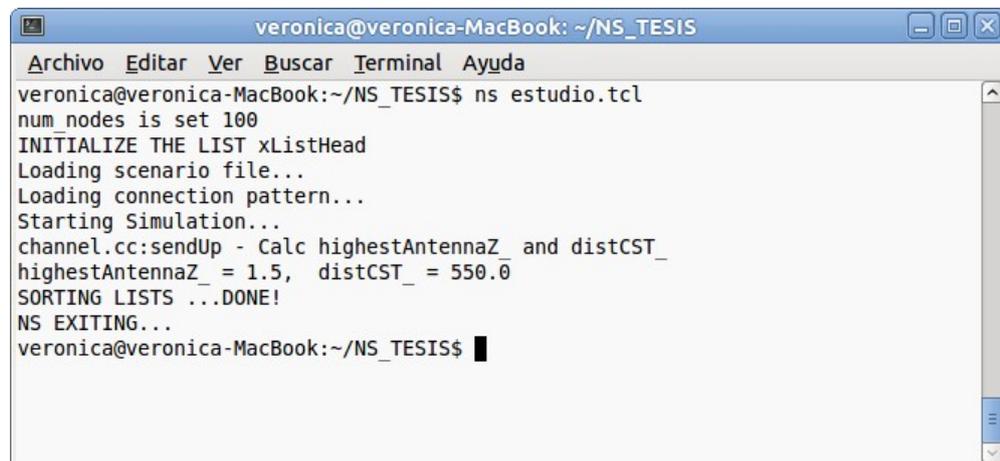
validate overall report: all tests passed
veronica@veronica-desktop:~/ns-allinone-2.34/ns-2.34$

```

Figura A.2: Proceso de validación finalizado correctamente

A.4. Ejecución

1. Se ejecuta el TCL-script, anteponiendo al nombre del archivo **.tcl** el comando **ns**. Así:



```

veronica@veronica-MacBook: ~/NS_TESIS
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
veronica@veronica-MacBook:~/NS_TESIS$ ns estudio.tcl
num_nodes is set 100
INITIALIZE THE LIST xListHead
Loading scenario file...
Loading connection pattern...
Starting Simulation...
channel.cc:sendUp - Calc highestAntennaZ_ and distCST_
highestAntennaZ_ = 1.5, distCST_ = 550.0
SORTING LISTS ...DONE!
NS EXITING...
veronica@veronica-MacBook:~/NS_TESIS$

```

Figura A.3: Ejecución del TCL-script

2. Se ejecuta la animación, anteponiendo al nombre del archivo **.nam** el comando **nam**.

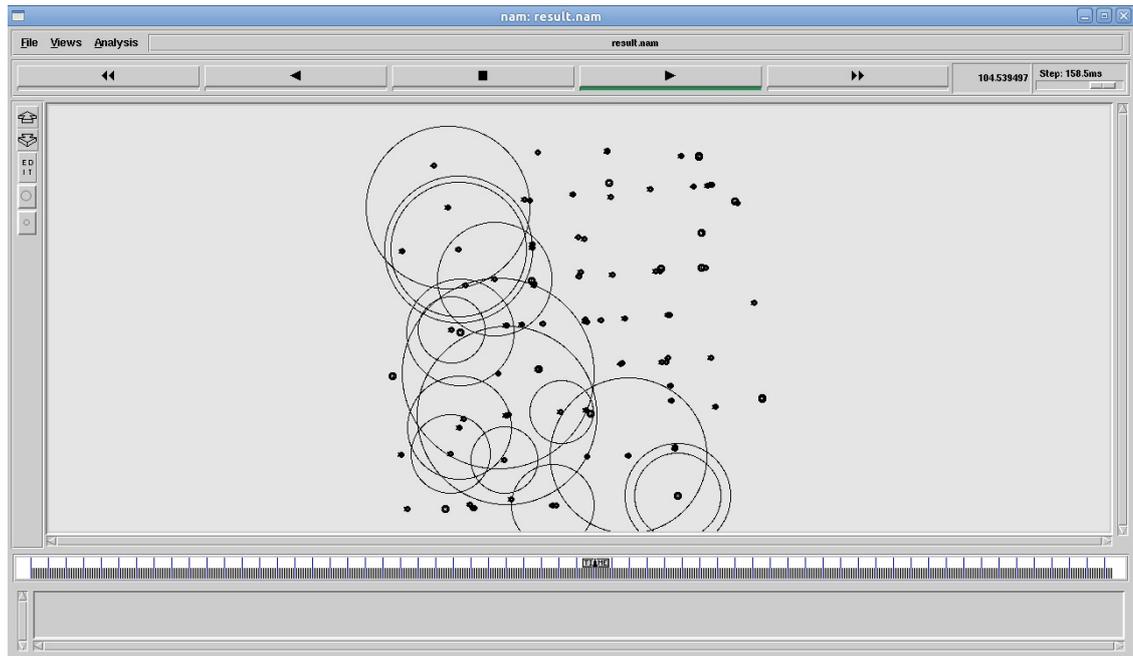


Figura A.4: Ejecución del Network Animator - NAM

Importante: Este anexo y la instalación del simulador de red ns2.34, se realizaron en base a la guía expuesta en el blog de Raquel [54].

ANEXO B

Instalación del Generador de Tráfico CityMob for Roadmaps (C4R)

El software se encuentra disponible en: <http://www.grc.upv.es/Software/c4r.html>, junto con el manual de usuario, en el cual se detalla el proceso de instalación tanto para sistemas: windows y linux.

Había manifestado que Citymob for Roadmaps (C4R), utiliza SUMO para crear y reproducir las trazas de movilidad; basadas en mapas reales extraídos desde OpenStreetMap, por lo tanto el primer paso consiste en instalar SUMO.

B.1. Instalación de SUMO

1. Descargar de: http://sumo.sourceforge.net/doc/current/docs/userdoc/Installing/Linux_Build.html, el **bash script**, haciendo clic sobre el hipervínculo que se muestra en la figura B.1.

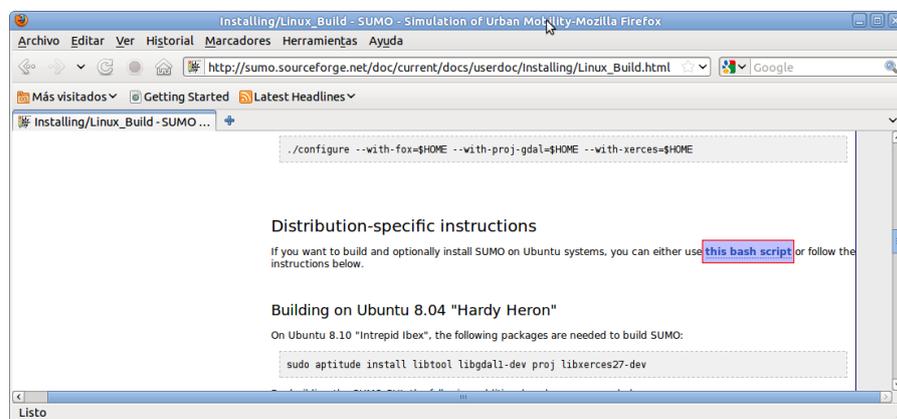


Figura B.1: Descarga del bash script para instalación de SUMO

Al final del código contenido en el script, se presentan los formatos de descarga, seleccionar “Original Format”, para obtener un archivo con nombre: **ubuntuBuild.sh**

2. En vista de que la instalación se realizó en la versión 10.10 de ubuntu, modifiqué el script, accediendo al mismo desde consola con el comando:

```
gedit ubuntuBuild.sh
```

En las partes que se muestra en la figura B.2, añadir el código:

```
[ -n "$(lsb_release -d | grep 10.10)" ] ||
```

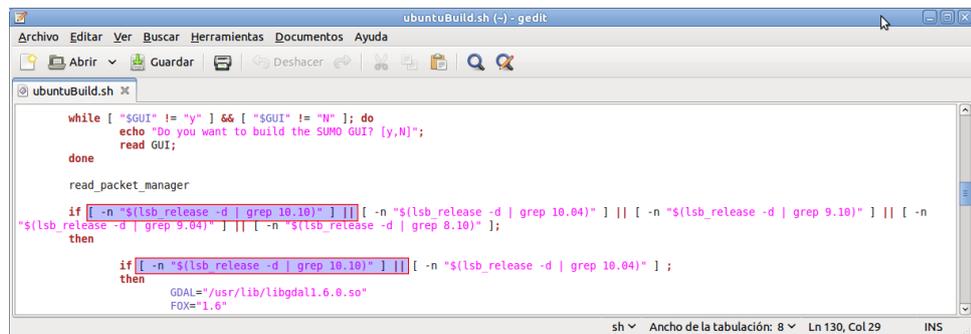


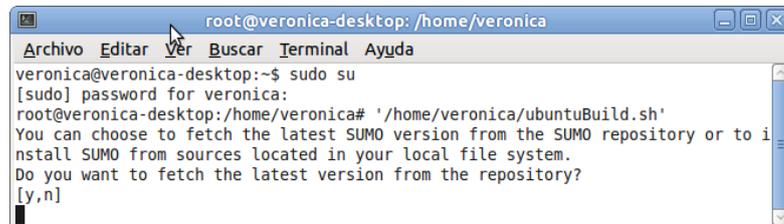
Figura B.2: Edición de ubuntuBuild.sh

Haciendo clic derecho sobre el archivo: **ubuntuBuild.sh** modificar las propiedades en la pestaña Permisos, activando la casilla: Permitir ejecutar el archivo como un programa (figura B.3)



Figura B.3: Configuración de propiedad de ejecución de ubuntuBuild.sh

3. Acceder a la consola como usuario root mediante el comando `sudo su`, y arrastrar hacia ella el archivo: **ubuntuBuild.sh**, presionando enter para ejecutarlo; las sentencias en él contenidas, irán apareciendo en el transcurso de la instalación empezando por la que se muestra en la figura B.4



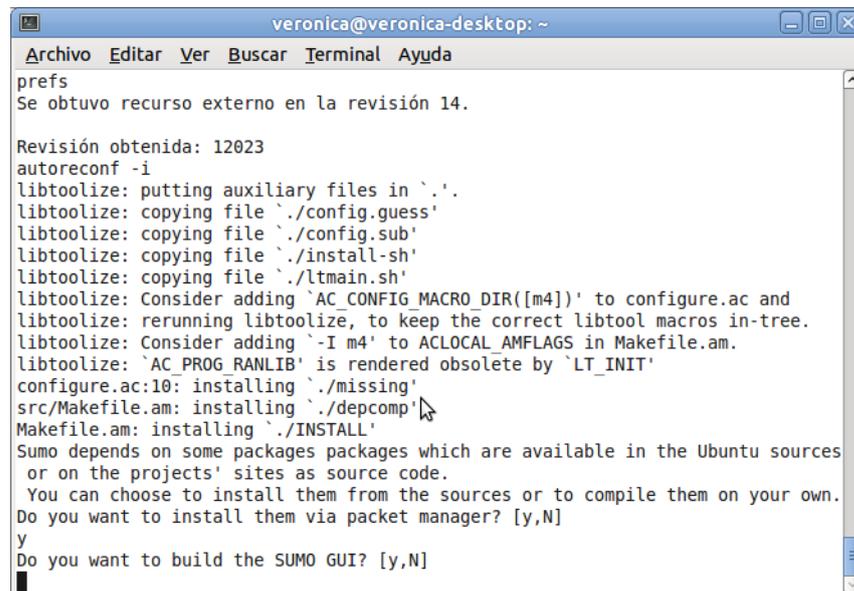
```

root@veronica-desktop: /home/veronica
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
veronica@veronica-desktop:~$ sudo su
[sudo] password for veronica:
root@veronica-desktop:/home/veronica# './home/veronica/ubuntuBuild.sh'
You can choose to fetch the latest SUMO version from the SUMO repository or to i
ninstall SUMO from sources located in your local file system.
Do you want to fetch the latest version from the repository?
[y,n]

```

Figura B.4: Ejecución de ubuntuBuild.sh para instalación de SUMO

El tiempo estimado para finalizar la instalación es de 2 a 3 horas, dependiendo de la velocidad de la conexión a internet que se disponga. La figura B.5, es una muestra de la ejecución normal del proceso, cuando se ha aceptado la sentencia para la construcción del SUMO GUI.



```

veronica@veronica-desktop: ~
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
prefs
Se obtuvo recurso externo en la revisión 14.

Revisión obtenida: 12023
autoreconf -i
libtoolize: putting auxiliary files in `.'.
libtoolize: copying file `./config.guess'
libtoolize: copying file `./config.sub'
libtoolize: copying file `./install-sh'
libtoolize: copying file `./ltmain.sh'
libtoolize: Consider adding `AC_CONFIG_MACRO_DIR([m4])' to configure.ac and
libtoolize: rerunning libtoolize, to keep the correct libtool macros in-tree.
libtoolize: Consider adding `-I m4' to ACLLOCAL_AMFLAGS in Makefile.am.
libtoolize: `AC_PROG_RANLIB' is rendered obsolete by `LT_INIT'
configure.ac:10: installing `./missing'
src/Makefile.am: installing `./depcomp'
Makefile.am: installing `./INSTALL'
Sumo depends on some packages packages which are available in the Ubuntu sources
or on the projects' sites as source code.
You can choose to install them from the sources or to compile them on your own.
Do you want to install them via packet manager? [y,N]
y
Do you want to build the SUMO GUI? [y,N]

```

Figura B.5: Aprobando la sentencia para la construcción de SUMO GUI

Una vez concluido el proceso, verificar que los ejecutables: **sumo**, **sumo-gui** y **netconvert**, estén contenidos en el directorio `/home/veronica/sumo/src`

4. Editar el archivo **.bashrc** desde consola: `gedit ~/.bashrc`, añadiendo al final lo siguiente:

```
export PATH=$PATH:/home/veronica/sumo/bin/
```

B.2 Instalación de JDK6 (Java Development Kit)

No olvide reemplazar `/home/veronica` por su directorio, guardar los cambios y recargar el `.bashrc`

```
source ~/.bashrc
```

5. Se puede acceder a SUMO desde consola con el comando: `sumo-gui`, de vuelta tendremos la interfaz gráfica de SUMO, como se aprecia en la figura B.6

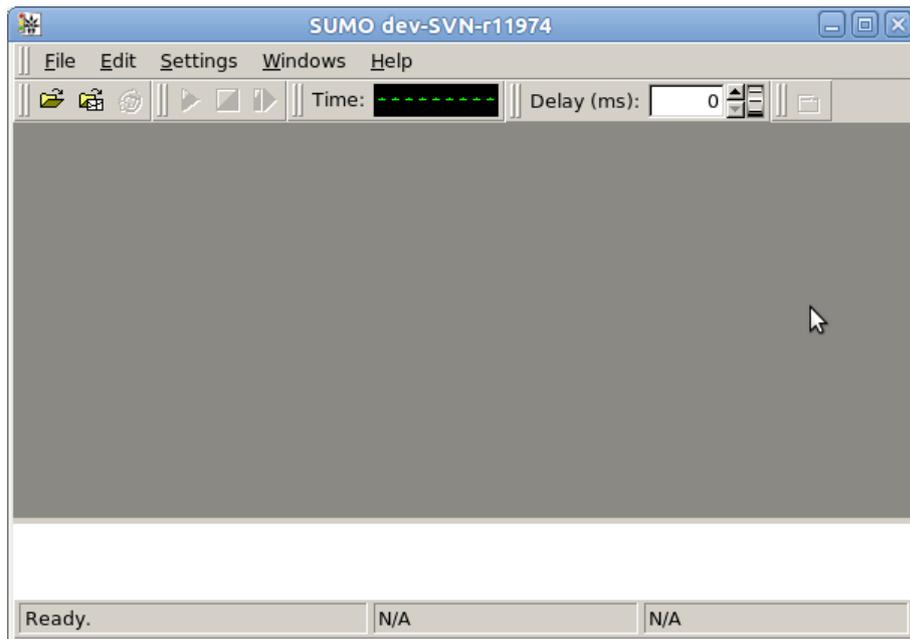


Figura B.6: Interfaz gráfica de SUMO

B.2. Instalación de JDK6 (Java Development Kit)

CityMob for Roadmaps (C4R), es una herramienta desarrollada en java, por lo tanto requiere de la instalación de JDK6 para su funcionamiento. A continuación el proceso:

1. Ejecutar desde consola lo siguiente:

```
sudo add-apt-repository ppa:sun-java-community-team/sun-java6
```

```
sudo apt-get update
```

```
sudo apt-get install sun-java6-jdk
```

La figura B.7, muestra la configuración de paquetes de java. Seleccione **Aceptar** con la tecla direccional derecha y presione enter. Seguidamente acepte los terminos de licencia (figura B.8) y espere a que finalice el proceso.

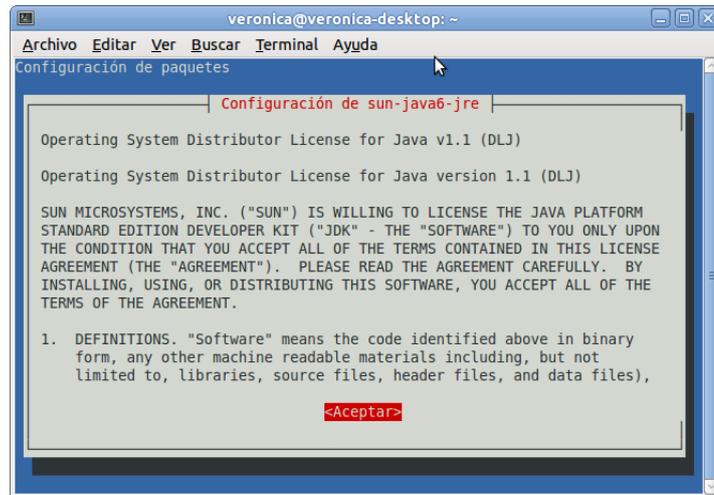


Figura B.7: Configuración de sun-java6-jre

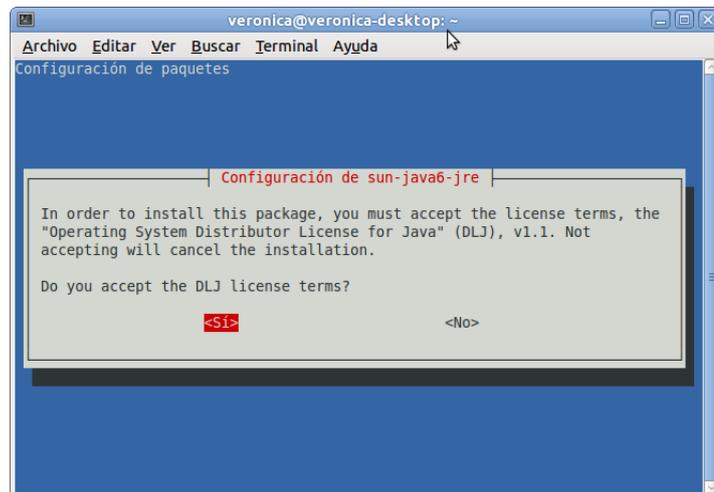


Figura B.8: Aceptación de términos de licencia de sun-java6-jre

B.3. Configuraciones previas a la ejecución de C4R

Antes de proceder a la ejecución, tome en cuenta que la carpeta `c4r` contiene la versión de `sumo` 0.11.1, que es compatible con la aplicación y cuyos ejecutables están dados por defecto para el sistema operativo Windows; en tal virtud es recomendable sustituir la carpeta `sumo-0.11.1` por la obtenida desde http://es.sourceforge.jp/projects/sfnet_sumo/downloads/sumo/version%200.11.1/sumo-src-0.11.1.tar.gz/, para el sistema linux; siguiendo el debido proceso:

1. Ingresar desde consola al directorio en que se encuentra el archivo `sumo-src-0.11.1.tar.gz`, para descomprimirlo.

```
tar xzf sumo-src-0.11.1.tar.gz
```

B.3 Configuraciones previas a la ejecución de C4R

2. Construir e instalar sumo-0.11.1

```
cd sumo-0.11.1
```

```
./configure
```

```
make
```

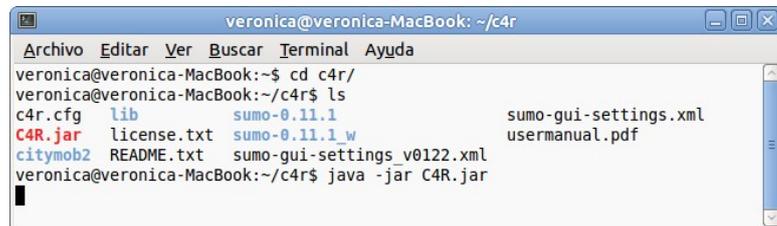
3. Copiar carpeta c4r previamente descargada, de preferencia en el directorio:
/home/veronica

4. Eliminar o cambiar de nombre a la carpeta sumo-0.11.1 contenida en la carpeta c4r para evitar inconvenientes al ejecutar el siguiente paso:

```
cp -R sumo-0.11.1/ /home/veronica/c4r
```

5. El acceso a la aplicación C4R (figura B.9) se realiza desde consola ubicándonos primero en la carpeta c4r para luego aplicar el comando:

```
java -jar C4R.jar
```



```
veronica@veronica-MacBook: ~/c4r
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
veronica@veronica-MacBook:~$ cd c4r/
veronica@veronica-MacBook:~/c4r$ ls
c4r.cfg  lib      sumo-0.11.1      sumo-gui-settings.xml
C4R.jar  license.txt sumo-0.11.1.w    usermanual.pdf
citymob2 README.txt  sumo-gui-settings_v0122.xml
veronica@veronica-MacBook:~/c4r$ java -jar C4R.jar
```

Figura B.9: Acceso a CityMob for Roadmaps - C4R en ubuntu

6. Para resolver el problema de configuración inicial que se muestra en la figura B.10. En el menú **Tools**, seleccionar **Options** y verificar que el cuadro de texto de **OpenStreetMap API** contenga:

```
http://api.openstreetmap.org/api/0.6/map?bbox=
```



Figura B.10: Error de acceso a c4r por inexistencia de c4r.cfg

B.3 Configuraciones previas a la ejecución de C4R

- Si por el contrario, al acceder a la aplicación; aparece un error en configuración de archivo `c4r.cfg` (figura B.11), se debe editar el archivo incluyendo el path de instalación de SUMO: `.\c4r\sumo-0.11.1\src` como se indica en la figura B.12, de manera que el cuadro de opciones del menú Tools, quede configurado tal como se muestra en la figura B.13

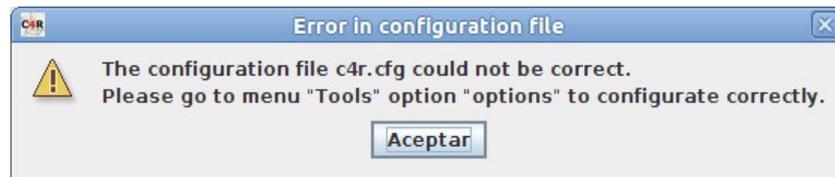


Figura B.11: Error de configuración de archivo `c4r.cfg`



Figura B.12: Edición del archivo de configuración `c4r.cfg`

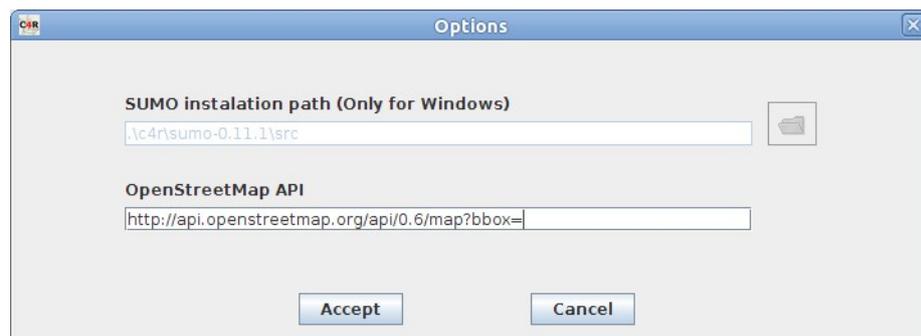


Figura B.13: Citymob for Roadmaps - cuadro de opciones

- Renombrar archivos ejecutables del directorio: `/sumo-0.11.1/src`, como a continuación se indica: **sumo-guisim** por **sumo-gui** y **sumo-netconvert** por **netconvert**

ANEXO C

Generación de escenarios con C4R

C.1. Creación de un nuevo proyecto

Se crea desde el menú 'File' o con el botón nuevo que aparece en la figura C.1.

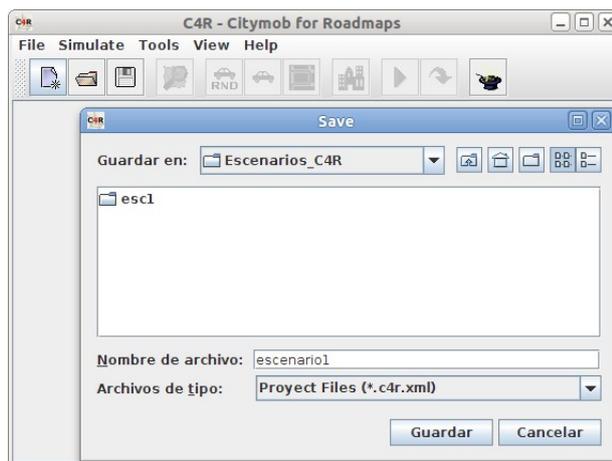


Figura C.1: Creación de un nuevo proyecto en C4R

C.2. Selección de entorno

C4R utiliza OpenStreetMap C.2 para exportar desde su plataforma mapas reales, entonces una vez seleccionada el área de simulación, se carga el mapa. Las coordenadas y área se especifican en la esquina superior izquierda (figura C.3)

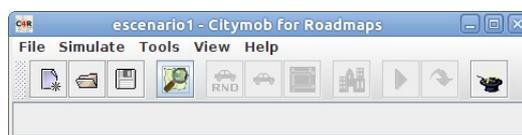


Figura C.2: Seleccionar mapa en OpenStreetMap

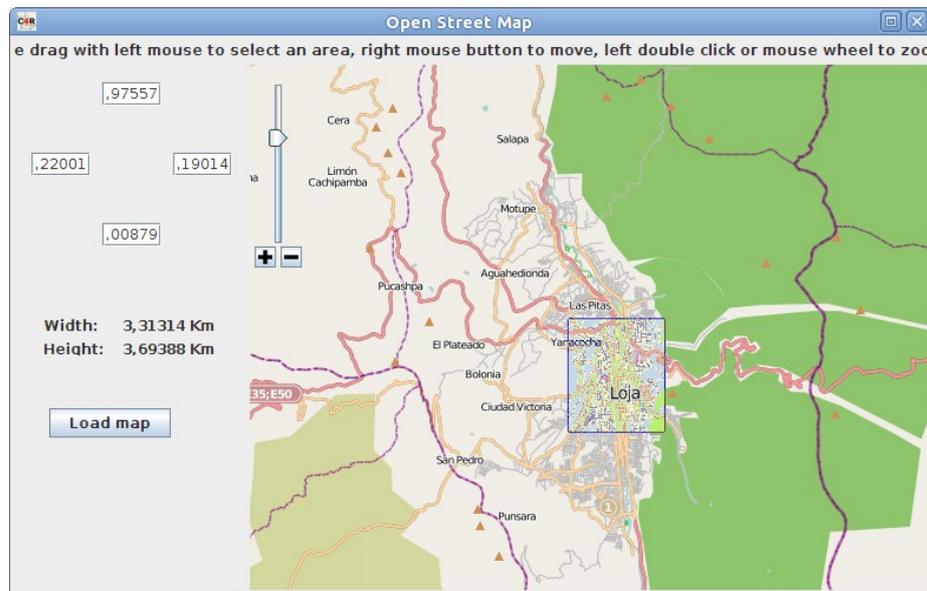


Figura C.3: Selección del área de simulación para generación del escenario móvil

C.3. Caracterización del escenario

C4R permite configurar una serie de parámetros en función del entorno que se desea generar. Así por ejemplo, para describir mejor el entorno urbano; se sitúan sobre el mapa zonas de ‘downtown’ (figura C.4) y en ellas se asigna la probabilidad de concentración y la velocidad vehicular sobre esa zona. Dichos parámetros en C4R aparecen con la siguiente nomenclatura:

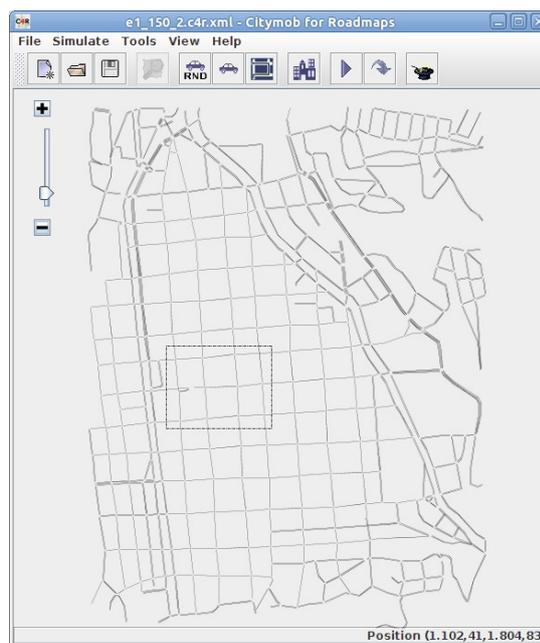


Figura C.4: Escenario urbano en C4R, con zona de downtown

1. *Attraction rate (tasa de atracción)*.- este parámetro se utiliza para describir el tráfico no uniformemente distribuido, es decir aquellas áreas en las que los vehículos pueden ser atraídos o repelidos; para ello el usuario puede asignar la probabilidad para especificar repulsión con valores cercanos a ‘0’ y atracción con valores cercanos a ‘1’.
2. *Downtown rate*.- este parámetro es útil para definir la velocidad de desplazamiento de los vehículos que entran en la zona de ‘downtown’, igualmente está representado en términos de probabilidad, es decir el valor que se asigne representa un porcentaje de la velocidad configurada para los vehículos en todo el escenario, definida en ‘Add vehicle type’ del menú ‘Tools’ [42].

Adicionalmente, C4R permite creación de rutas, flujos vehiculares definidos, flujos vehiculares aleatorios, definición de tipos de vehículos, lo cual puede realizarse con ayuda de la guía o manual de usuario de la propia herramienta incluida en la carpeta de C4R o disponible en: <http://www.grc.upv.es/Software/c4r.html>

C.4. Selección del modelo de movilidad

Se lo hace desde el menú ‘Tools’, opción ‘Add mobility model’ (figura C.5).

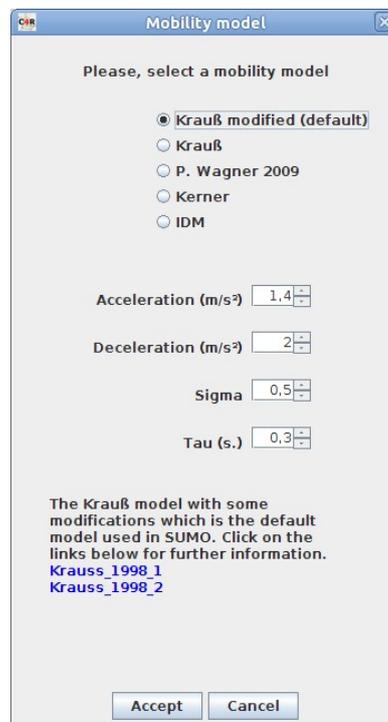


Figura C.5: Escenario urbano en C4R, con zona de downtown

Los parámetros que pueden ser modificables de acuerdo al modelo seleccionado son:

1. *Acceleration*.- define la máxima aceleración de los vehículos, por defecto se ha establecido en: $1,4m/s^2$.
2. *Deceleration*.- define la máxima deceleración de los vehículos, por defecto establecida en: $2m/s^2$.
3. *Sigma*.- indica la imperfección del conductor (valores entre 0 y 1), establecida por defecto en 0.5. Este parámetro se aplica únicamente cuando se usa el modelo Krauss y su versión modificada.
4. *Tau*.- indica el tiempo de reacción del conductor, por defecto establecida en 0.3 segundos. Este parámetro se aplica en todos los modelos a excepción del modelo IDM.
5. *Phi*.- Este parámetro se aplica sólo en el modelo Kerner, para definir la densidad vehicular, medida en vehículos por kilómetro. Por defecto se ha establecido en: 20 vehículos/km.
6. *Headway*.- Aplicable con el modelo IDM, para definir el tiempo de avance al vehículo adelante, por defecto establecido en: 1.5 segundos.
7. *MinGap*.- define la distancia mínima de separación entre vehículos, por defecto 2 metros, que se mantiene incluso cuando se presentan bloqueos del tráfico (congestionamiento) [42].

C.5. Generación de las trazas de movilidad

Desde el menú 'Simulate', opción 'Create trace' o directamente desde el botón que aparece en la figura C.6.

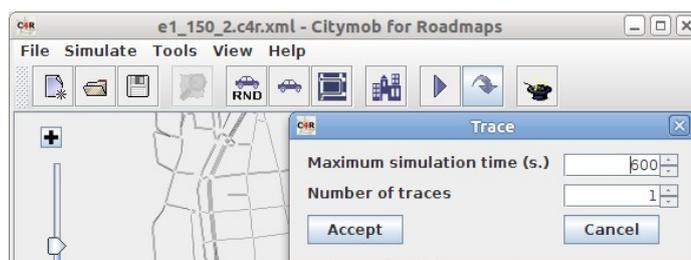


Figura C.6: Generación de traza o trazas de movilidad

C.6. Visualización del escenario generado

Desde el menú 'Simulate', opción 'Visualize simulation' o dando clic sobre el botón 'play' para proyectar desde sumo el escenario de movilidad vehicular generado.

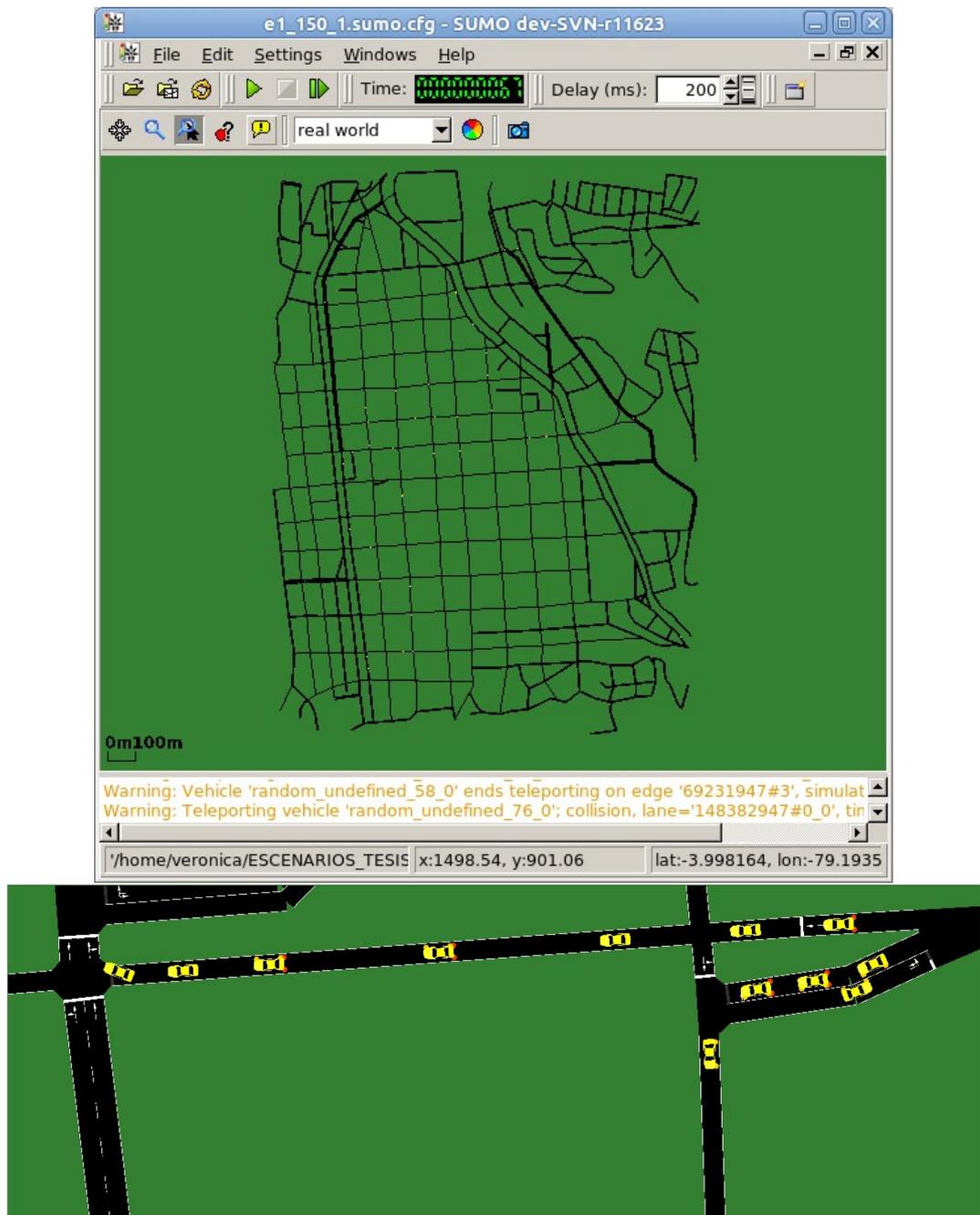


Figura C.7: Simulación de movilidad vehicular proyectada desde SUMO

ANEXO D

Scripts utilizados para la simulación

D.1. Aplicando estándar 802.11p y modelo de propagación Nakagami

```
##### UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA #####

# Por: Verónica Maldonado,
# Titulación: Electrónica y Telecomunicaciones

# Escenario: Simulación de tráfico vehicular urbano y en carretera
# Aplicando estándar 802.11p

#=====
#DEFINICIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE LOS NODOS
#=====

set val(chan)          Channel/WirelessChannel    ;# Channel Type
set val(prop)          Propagation/Nakagami       ;# radio-propagation model
set val(netif)         Phy/WirelessPhyExt        ;# network interface type
set val(mac)           Mac/802_11Ext            ;# MAC type
set val(ifq)           Queue/DropTail/PriQueue   ;# interface queue type
set val(ll)            LL                       ;# link layer type
set val(ant)           Antenna/OmniAntenna      ;# antenna model
set val(ifqlen)        5                       ;# max packet in ifq
set val(rp)            CBRP                    ;# routing protocol AODV
                                     ;# DSDV CBRP

set val(conexiones)    "conex_250_100_1"        ;# Conexiones
set val(scenario)      "e1_250_1_1"            ;# Movilidad sobre Mapa de Loja
                                     ;# (obtenida con C4R)

set val(x)             1500.0
set val(y)             2000.0
set val(seed)          1.0
set val(nn)            250                     ;# Cantidad de nodos
set val(stop)          250                     ;# Tiempo de simulación

$val(ant) set Gt_      3.2                     ;# 5 dBi
$val(ant) set Gr_      3.2                     ;# "
$val(ant) set Z_       1.5

# 802.11p parámetros
```

D.1 Aplicando estándar 802.11p y modelo de propagación Nakagami

```
Phy/WirelessPhyExt set Pt_                0.32  ;# Watts #25dBm EIRP (Pt+Gt)
Phy/WirelessPhyExt set freq_              5.9e+9
Phy/WirelessPhyExt set L_                 1.0
Phy/WirelessPhyExt set CStresh_           1e-6
                                           ;# -90 dBm Sensibilidad
Phy/WirelessPhyExt set noise_floor_       1.25892e-13
                                           ;# -99 dBm
Phy/WirelessPhyExt set PowerMonitorThresh_ 3.98107e-18
                                           ;# -144 dBm Nivel de Ruido Gaussiano
Phy/WirelessPhyExt set bandwidth_         10e+6
Phy/WirelessPhyExt set BasicModulationScheme_ 0
Phy/WirelessPhyExt set PreambleCaptureSwitch_ 1
Phy/WirelessPhyExt set DataCaptureSwitch_ 1
Phy/WirelessPhyExt set SINR_PreambleCapture_ 3.1623 ;# 5 dB
Phy/WirelessPhyExt set SINR_DataCapture_ 10.0 ;# 10 dB
Phy/WirelessPhyExt set trace_dist_        1e+6
Phy/WirelessPhyExt set PHY_DBG_           0

Mac/802_11Ext set CWMin_                  15
Mac/802_11Ext set CWMax_                  1023
Mac/802_11Ext set SlotTime_               13e-6
Mac/802_11Ext set SIFS_                   32e-6
Mac/802_11Ext set PLCPpreambleTime_       32e-6 ;# duración de preámbulo
Mac/802_11Ext set PLCPDataRate_           6e+6 ;# 6Mbps
Mac/802_11Ext set ShortRetryLimit_        7 ;# retransmisiones
Mac/802_11Ext set LongRetryLimit_         4 ;# retransmisiones
Mac/802_11Ext set HeaderDuration_         40e-6 ;# 40us
Mac/802_11Ext set SymbolDuration_         8e-6 ;# 8us
Mac/802_11Ext set BasicModulationScheme_ 0
Mac/802_11Ext set use_802_11a_flag_       true
Mac/802_11Ext set RTSThreshold_           3000 ;# 3Kbytes
Mac/802_11Ext set MAC_DBG                 0
Mac/802_11Ext set dataRate_               6e+6
Mac/802_11Ext set basicRate_              6e+6

# Modelo urbano
#-----
Propagation/Nakagami set use_nakagami_dist_ true
Propagation/Nakagami set gamma0_ 2.0
Propagation/Nakagami set gamma1_ 2.0
Propagation/Nakagami set gamma2_ 2.0
Propagation/Nakagami set d0_gamma_ 200
Propagation/Nakagami set d1_gamma_ 500
Propagation/Nakagami set m0_ 1.0
Propagation/Nakagami set m1_ 1.0
Propagation/Nakagami set m2_ 1.0
Propagation/Nakagami set d0_m_ 80
Propagation/Nakagami set d1_m_ 200
#-----

#Modelo en carretera
#-----
#Propagation/Nakagami set use_nakagami_dist_ true
#Propagation/Nakagami set gamma0_ 1.9
#Propagation/Nakagami set gamma1_ 3.8
#Propagation/Nakagami set gamma2_ 3.8
#Propagation/Nakagami set d0_gamma_ 200
#Propagation/Nakagami set d1_gamma_ 500
#Propagation/Nakagami set m0_ 1.5
```

D.1 Aplicando estándar 802.11p y modelo de propagación Nakagami

```
#Propagation/Nakagami set m1_ 0.75
#Propagation/Nakagami set m2_ 0.75
#Propagation/Nakagami set d0_m_ 80
#Propagation/Nakagami set d1_m_ 200
#-----

# -----
# PROGRAMA PRINCIPAL
# -----

# Inicialización de variables globales

set ns_ [new Simulator]

# Escritura de las trazas .tr .nam

set tracefd [open resultado_e1_802.11p.tr w]
$ns_ trace-all $tracefd

set namtrace [open resultado_e1_802.11p.nam w]
$ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)

# Topografía

set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)

create-god $val(nn)

# habilitando uso de nuevo formato de traza

$ns_ use-newtrace

# Creación de canal o múltiples canales

set chan_1_ [new $val(chan)]
set chan_2_ [new $val(chan)]

# Creación y configuración de los nodos (parámetros típicos)

$ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \
-llType $val(ll) \
-macType $val(mac) \
-ifqType $val(ifq) \
-ifqLen $val(ifqlen) \
-antType $val(ant) \
-propType $val(prop) \
-phyType $val(netif) \
-topoInstance $topo \
-agentTrace ON\
-routerTrace ON\
-macTrace OFF \
-movementTrace OFF \
-channel $chan_1_

$ns_ set WirelessNewTrace_ ON
set node_(0) [$ns_ node]

for {set i 1} {$i < $val(nn)} {incr i} {
```

D.2 Aplicando estándar 802.11b y modelo de propagación Nakagami

```
set node_($i) [$ns_ node]
    $node_($i) random-motion 0;
}

puts "Loading scenario file..."
source $val(scenario)

puts "Loading connection pattern..."
source $val(conexiones)

# Fin de la simulación

for {set i 0} {$i < $val(nn)} {incr i} {
    $ns_ at $val(stop) "$node_($i) reset";
}

$ns_ at $val(stop) "stop"
$ns_ at $val(stop).01 "puts \"NS EXITING...\" ; $ns_ halt"
proc stop {} {
    global ns_ tracefd
    $ns_ flush-trace
    close $tracefd
}

puts "Starting Simulation..."
$ns_ run

***** END *****
```

D.2. Aplicando estándar 802.11b y modelo de propagación Nakagami

```
***** UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA *****

# Por: Verónica Maldonado,
# Titulación: Electrónica y Telecomunicaciones

# Escenario: Simulación de tráfico urbano y en carretera
# Aplicando estándar 802.11b

#=====
#DEFINICIÓN DE LA CONFIGURACIÓN DE LOS NODOS
#=====

set val(chan)          Channel/WirelessChannel    ;# Channel Type
set val(prop)          Propagation/Nakagami       ;# radio-propagation model
set val(netif)         Phy/WirelessPhy           ;# network interface type
set val(mac)           Mac/802_11                ;# MAC type
set val(ifq)           Queue/DropTail/PriQueue   ;# interface queue type
set val(ll)            LL                         ;# link layer type
set val(ant)           Antenna/OmniAntenna       ;# antenna model
set val(ifqlen)        5                         ;# max packet in ifq
set val(rp)            CBRP                       ;# routing protocol AODV
                                                ;# DSDV CBRP

set val(conexiones)    "conex_250_100_1"        ;# Conexiones
set val(scenario)      "e2_250_1_4"             ;# Movilidad sobre Mapa de Loja
```

D.2 Aplicando estándar 802.11b y modelo de propagación Nakagami

```

;# (obtenida con C4R)
set val(x)          15000.0
set val(y)          7000.0
set val(seed)       1.0
set val(nn)         250           ;# Cantidad de nodos
set val(stop)       250           ;# Tiempo de simulación

# Definición del rango de transmisión

$val(ant) set Gt_ 4.0 ;# 6 dBi
$val(ant) set Gr_ 4.0 ;# "
$val(ant) set Z_ 1.5

#Comando: ./threshold -m TwoRayGround -fr 2.472e+09 -Pt 0.125892 250
#para obtener RXThresh_
#100m: 9.32665e-10---250m:1.296e-10 -----#500m:8.1e-12

$val(netif) set CStresh_ 3.16227e-12 ;# -85dBm Sensibilidad
#$val(netif) set RXThresh_ 1.296e-10 ;# 250m
$val(netif) set Pt_ 0.1 ;# Watts #20dBm
$val(netif) set freq_ 2.472e+09 ;# radio channel
$val(netif) set bandwidth_ 11e+6

Mac/802_11 set dataRate_ 11Mb
Mac/802_11 set basicRate_ 11Mb

#Modelo en carretera
#-----
Propagation/Nakagami set use_nakagami_dist_ true
Propagation/Nakagami set gamma0_ 1.9
Propagation/Nakagami set gamma1_ 3.8
Propagation/Nakagami set gamma2_ 3.8
Propagation/Nakagami set d0_gamma_ 200
Propagation/Nakagami set d1_gamma_ 500
Propagation/Nakagami set m0_ 1.5
Propagation/Nakagami set m1_ 0.75
Propagation/Nakagami set m2_ 0.75
Propagation/Nakagami set d0_m_ 80
Propagation/Nakagami set d1_m_ 200
#-----

# Modelo urbano
#-----
#Propagation/Nakagami set use_nakagami_dist_ true
#Propagation/Nakagami set gamma0_ 2.0
#Propagation/Nakagami set gamma1_ 2.0
#Propagation/Nakagami set gamma2_ 2.0
#Propagation/Nakagami set d0_gamma_ 200
#Propagation/Nakagami set d1_gamma_ 500
#Propagation/Nakagami set m0_ 1.0
#Propagation/Nakagami set m1_ 1.0
#Propagation/Nakagami set m2_ 1.0
#Propagation/Nakagami set d0_m_ 80
#Propagation/Nakagami set d1_m_ 200
#-----

# -----
# PROGRAMA PRINCIPAL
# -----
```

D.2 Aplicando estándar 802.11b y modelo de propagación Nakagami

```
# Inicialización de variables globales

set ns_ [new Simulator]

# Escritura de las trazas .tr .nam

set tracefd [open resultado_e2_802.11b.tr w]
$ns_ trace-all $tracefd

set namtrace [open resultado_e2_802.11b.nam w]
$ns_ namtrace-all-wireless $namtrace $val(x) $val(y)

# Topografía

set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid $val(x) $val(y)

create-god $val(nn)

# habilitando uso de nuevo formato de traza

$ns_ use-newtrace

# Creación de canal o múltiples canales

set chan_1_ [new $val(chan)]
set chan_2_ [new $val(chan)]

# Creación y configuración de los nodos (parámetros típicos)

$ns_ node-config -adhocRouting $val(rp) \
-llType $val(ll) \
-macType $val(mac) \
-ifqType $val(ifq) \
-ifqLen $val(ifqlen) \
-antType $val(ant) \
-propType $val(prop) \
-phyType $val(netif) \
-topoInstance $topo \
-agentTrace ON \
-routerTrace ON \
-macTrace OFF \
-movementTrace OFF \
-channel $chan_1_

$ns_ set WirelessNewTrace_ ON
set node_(0) [$ns_ node]

for {set i 1} {$i < $val(nn)} {incr i} {
set node_($i) [$ns_ node]
    $node_($i) random-motion 0;
}

puts "Loading scenario file..."
source $val(scenario)

puts "Loading connection pattern..."
source $val(conexiones)
```

D.2 Aplicando estándar 802.11b y modelo de propagación Nakagami

```
# Fin de la simulación

for {set i 0} {$i < $val(nn) } {incr i} {
    $ns_ at $val(stop) "$node_($i) reset";
}

$ns_ at $val(stop) "stop"
$ns_ at $val(stop).01 "puts \"NS EXITING...\" ; $ns_ halt"
proc stop {} {
    global ns_ tracefd
    $ns_ flush-trace
    close $tracefd
}

puts "Starting Simulation..."
$ns_ run

##### END #####
```

ANEXO E

Filtrado AWK de las trazas *.tr

AWK¹ es un lenguaje de programación diseñado para el procesamiento de datos basados en texto; generalmente se le atribuyen dos piezas de datos: un fichero de órdenes y un fichero primario de entrada. Para el caso específico del análisis de trazas .tr (fichero de entrada), el archivo filtro.awk, contiene las órdenes que indican a AWK como debe procesarlas. Para ello, es conveniente identificar el *formato de las trazas*² (cuadros E.1 y E.2) para de acuerdo a las métricas seleccionadas en el análisis; saber que campo contiene el valor correspondiente al dato que nos interesa.

Tabla E.1: Estructura de un archivo de trazas *.tr [55]

Event	Abbreviation	Flag	Type	Value
Wireless Event	s: Send r: Receive d: Drop f: Forward	-t	double	Time (* For Global Setting)
		-Ni	int	Node ID
		-Nx	double	Node X Coordinate
		-Ny	double	Node Y Coordinate
		-Nz	double	Node Z Coordinate
		-Ne	double	Node Energy Level
		-NI	string	Network trace Level (AGT, RTR, MAC, etc.)
		-Nw	string	Drop Reason
		-Hs	int	Hop source node ID
		-Hd	int	Hop destination Node ID, -1, -2
		-Ma	hexadecimal	Duration
		-Ms	hexadecimal	Source Ethernet Address
		-Md	hexadecimal	Destination Ethernet Address
		-Mt	hexadecimal	Ethernet Type
		-P	string	Packet Type (arp, dsr, imep, tora, etc.)
		-Pn	string	Packet Type (cbr, tcp)

¹<http://en.wikipedia.org/wiki/AWK>

²http://nslam.isi.edu/nslam/index.php/NS-2_Trace_Formats#New_Wireless_Trace_Formats

Tabla E.2: Estructura trazas *.tr dependiendo del tipo de paquete [55]

IP Trace	-ls	int.int	Source Address And Port
	-ld	int.int	Destination Address And Port
	-lt	string	Packet Type
	-ll	int	Packet Size
	-lf	int	Flow ID
	-li	int	Unique ID
	-lv	int	TTL Value
TCP Trace	-Ps	int	Sequence Number
	-Pa	int	Acknowledgment Number
	-Pf	int	Number Of Times Packet Was Forwarded
	-Po	int	Optimal Number Of Forwards
CBR Trace	-Pi	int	Sequence Number
	-Pf	int	Number Of Times Packet Was Forwarded
	-Po	int	Optimal Number Of Forwards

Los números en color magenta de la figura E.1, se usan como identificadores para cada campo; sobre el que se han situado respectivamente en la traza.

```

1 2 3          4 5 6 7 8 9 10 11      12 13      14 15 16 17      18 19 20 21
s -t 1.142046604 -Hs 0 -Hd -2 -Ni 0 -Nx 1186.47 -Ny 1093.76 -Nz 0.00 -Ne 100.000000 -Nl AGT -Nw ---
22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51
Ma 0 -Md 0 -Ms 0 -Mt 0 -Is 0.0 -Id 40.0 -It cbr -Il 512 -If 0 -Ii 3 -Iv 32 -Pn cbr -Pi 1 -Pf 0 -Po 16777215

```

Figura E.1: Ejemplo del nuevo formato de traza *.tr de ns-2

El comando para realizar el filtrado, se ejecuta de la siguiente manera:

```

comando | -f | nombre del filtro .awk | nombre de la traza .tr
awk -f filtro.awk resultado_e2_802.11b.tr

```

```

veronica@veronica-MacBook: ~/NS_T_VM
Archivo Editar Ver Buscar Terminal Ayuda
NS EXITING...
veronica@veronica-MacBook:~/NS_T_VM$ awk -f filtro.awk resultado_e2_802.11b.tr
enviados = 261
recibidos = 238
PDF = 91.19
Average Throughput[kbps] = 1.96
Routing Packets = 13375
NRL = 56.20
Average e-e delay [ms] = 58.10
No. paquetes perdidos [pkts] = 23
veronica@veronica-MacBook:~/NS_T_VM$ █

```

Figura E.2: Ejecución de filtrado AWK

E.1. Filtro AWK

```

***** UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA *****#

# Por: Verónica Maldonado, Titulación: Electrónica y Telecomunicaciones

# ===== Filtro AWK =====#

function average (array) {
    sum = 0;
    items = 0;
    for (i in array) {
sum += array[i];
items++;
    }
    if (sum == 0 || items == 0)
return 0;
    else
return sum / items;
}
BEGIN {
recvdSize = 0
startTime = 0
stopTime = 0
sends=0;
recvs=0;
routing_pkts=0.0;
dropped_pkts=0;
}
{
time = $3
pkt_id = $41
pkt_size = $37
src = $31
dst = $33
cbr_pkt_id = $47

#----- Cálculo de Packet Delivery Ratio -----#

if (( $1 == "s" ) && ( $35 == "cbr" ) && ( $19=="AGT" )) { sends++; }
if (( $1 == "r" ) && ( $35 == "cbr" ) && ( $19=="AGT" )) { recvs++; }

PDR = (recvs/sends)*100;

#----- Cálculo de Throughput -----#

if ($19 == "AGT" && $1 == "s" && pkt_size > 512) {
if (time < startTime) {
startTime = time
}}

if ($19 == "AGT" && $1 == "r" && pkt_size > 512) {
if (time > stopTime) {
stopTime = time
}

hdr_size = pkt_size % 512
pkt_size -= hdr_size
recvdSize += pkt_size
}

```

```

TH = (recvdSize/(stopTime-startTime))*(8/1000);

#----- Cálculo de Overhead (paquetes de enrutamiento) -----#

if (( $1 == "s" || $1 == "f" ) && $19 == "RTR" && $35 == "AODV" ||
    $35 == "message" || $35 == "DSR" || $35 == "OLSR" ) routing_pkts++;

NRL = routing_pkts/recvs; #normalized routing load

#----- Cálculo de paquetes caídos -----#

if ( ( $1 == "d" ) && ( $35 == "cbr" ) && ( $19 == "RTR" ) ) {
dropped_pkts=dropped_pkts+1;
}

#--- end to end delay
if ( $19 == "AGT" ) {
flow = src-"dst";
cbr_flow_pkt_id = flow" "cbr_pkt_id;

#--- enviados
if ( $1 == "s" ) {
pkt_start_time[cbr_flow_pkt_id] = time;
}

#--- recibidos
else if ( $1 == "r" ) {
pkt_end_time[cbr_flow_pkt_id] = time;
}}
END {

#----- Cálculo de Average end to end Delay -----#

for ( flow_pkt in pkt_end_time ) {
start = pkt_start_time[flow_pkt];
end = pkt_end_time[flow_pkt];
delta = end - start;

if ( delta > 0 ) {
delay[flow_pkt] = delta;
}}
D = average(delay)*1000;

printf("paquetes enviados = %5d\n",sends);

printf("paquetes recibidos = %5d\n",recvs);

printf("PDR = %.2f\n",PDR);

printf("Average Throughput[kbps] = %.2f\n",TH)

printf("NRL = %.2f\n",NRL);

printf("Average e-e delay [ms] = %.2f\n",D);

printf("paquetes caidos = %5d\n",dropped_pkts);
}
***** END *****

```

ANEXO F

Tabulación de Resultados

Tabla F.1: Resultados con aplicación del modelo de movilidad Krauss sobre el escenario 1 - ‘urbano’

MODELO		PROTOCOLOS					
Krauss		AODV		DSDV		CBRP	
Resultados	Nodos	802.11p	802.11b	802.11p	802.11b	802.11p	802.11b
Enviados	50	26	27	26	28	26	28
	100	62	67	65	65	64	67
	150	99	99	97	103	97	95
	200	131	125	124	126	128	123
	250	152	169	162	166	166	159
Recibidos	50	26	23	26	15	26	28
	100	62	58	65	45	64	64
	150	99	79	97	61	97	90
	200	130	98	124	84	128	117
	250	152	154	162	147	166	155
Perdidos	50	0	4	0	13	0	0
	100	0	9	0	10	0	3
	150	0	20	0	42	0	5
	200	1	27	0	42	0	6
	250	0	15	0	19	0	4
Throughput	50	0.44	0.46	0.44	0.27	0.45	0.48
	100	1.02	0.95	1.08	0.74	1.06	1.05
	150	1.63	1.30	1.66	1.04	1.59	1.51
	200	2.13	1.62	2.04	1.40	2.13	1.93
	250	2.52	2.54	2.68	2.41	2.72	2.55
PDR	50	100.00	85.19	100.00	53.57	100.00	100.00
	100	100.00	86.57	100.00	69.23	100.00	95.52
	150	100.00	79.80	100.00	59.22	100.00	94.74
	200	99.24	78.40	100.00	66.67	100.00	95.12
	250	100.00	91.12	100.00	88.55	100.00	97.48
Average Delay	50	2322.52	2207.69	1.60	3.31	1.65	633.38
	100	2070.55	818.13	1.60	8.67	1.70	54.84
	150	2839.86	1022.72	1.72	14.01	1.87	121.09
	200	1986.91	1019.95	1.86	150.28	2.21	59.62
	250	269.18	167.26	2.16	3.13	2.44	21.03
NRL	50	50.00	164.57	1977.12	3888.40	13720.96	5658.46
	100	98.39	164.81	3117.20	6531.58	22406.27	10071.64
	150	148.49	387.37	4599.46	8110.48	33141.31	15432.74
	200	194.18	455.11	6650.42	11108.54	44445.86	22720.70
	250	240.28	335.14	7672.55	14373.82	53573.83	41538.17

Tabla F.2: Resultados con aplicación del modelo de movilidad Wagner sobre el escenario 1 - ‘urbano’

MODELO		PROTOCOLOS					
Wagner		AODV		DSDV		CBRP	
Resultados	Nodos	802.11p	802.11b	802.11p	802.11b	802.11p	802.11b
Enviados	50	25	27	29	28	27	27
	100	64	70	62	67	64	66
	150	94	95	94	86	97	98
	200	127	127	126	129	126	130
	250	166	165	160	161	169	161
Recibidos	50	25	23	29	24	27	26
	100	64	59	62	45	64	66
	150	92	71	93	55	97	98
	200	126	95	126	81	126	127
	250	166	151	160	142	169	160
Perdidos	50	0	4	0	4	0	1
	100	0	11	0	22	0	0
	150	2	24	1	31	0	0
	200	1	32	0	48	0	3
	250	0	14	0	19	0	1
Throughput	50	0.42	0.38	0.48	0.42	0.45	0.44
	100	1.05	0.98	1.05	0.74	1.06	1.09
	150	1.51	1.18	1.53	0.92	1.59	1.61
	200	2.07	1.58	2.08	1.35	2.07	2.08
	250	2.74	2.51	2.65	2.35	2.78	2.63
PDR	50	100.00	85.19	100.00	85.71	100.00	96.30
	100	100.00	84.29	100.00	67.16	100.00	100.00
	150	97.87	74.74	98.94	63.95	100.00	100.00
	200	99.21	74.80	100.00	62.79	100.00	97.69
	250	100.00	91.52	100.00	88.20	100.00	99.38
Average Delay	50	1085.11	112.25	1.61	7.84	1.62	37.84
	100	474.44	672.93	1.64	4.03	1.70	350.14
	150	2057.08	1449.45	1.64	112.09	2.41	117.25
	200	1496.52	972.58	1.62	123.84	2.22	65.57
	250	723.02	383.67	2.23	4.96	2.64	75.32
NRL	50	50.04	89.74	1763.76	1991.12	13256.78	6136.81
	100	98.44	175.14	3261.48	5679.80	22406.27	10340.00
	150	149.64	412.08	5258.48	8708.45	32947.08	14138.47
	200	198.43	499.69	6529.42	12572.12	45163.90	21357.69
	250	245.49	336.89	7738.12	12392.30	52562.14	39570.16

Tabla F.3: Resultados con aplicación del modelo de movilidad Kerner sobre el escenario 1 ‘urbano’

MODELO		PROTOCOLOS					
Kerner		AODV		DSDV		CBRP	
Resultados	Nodos	802.11p	802.11b	802.11p	802.11b	802.11p	802.11b
Enviados	50	28	27	25	28	28	27
	100	73	62	67	67	64	66
	150	96	91	98	100	92	92
	200	129	126	130	130	122	122
	250	157	170	157	171	164	164
Recibidos	50	28	24	25	18	28	19
	100	73	46	67	37	64	63
	150	96	66	98	64	92	87
	200	129	104	130	90	122	121
	250	157	158	157	146	164	163
Perdidos	50	0	3	0	10	0	8
	100	0	16	0	30	0	3
	150	0	25	0	36	0	5
	200	0	22	0	40	0	1
	250	0	12	0	25	0	1
Throughput	50	0.47	0.42	0.41	0.30	0.50	0.32
	100	1.22	0.76	1.10	0.61	1.10	1.06
	150	1.57	1.09	1.61	1.08	1.53	1.45
	200	2.13	1.78	2.13	1.49	2.00	2.00
	250	2.60	2.60	2.60	2.40	2.70	2.68
PDR	50	100.00	88.89	100.00	64.29	100.00	70.37
	100	100.00	74.19	100.00	55.22	100.00	95.45
	150	100.00	72.53	100.00	64.00	100.00	94.57
	200	100.00	82.54	100.00	69.23	100.00	99.18
	250	100.00	92.94	100.00	85.38	100.00	99.39
Average Delay	50	646.22	653.78	1.61	11.85	1.62	39.76
	100	3906.04	1030.08	1.65	160.80	1.64	697.90
	150	1963.14	744.48	1.62	12.27	1.76	65.80
	200	911.82	1018.02	1.94	39.46	2.28	82.86
	250	793.14	617.81	2.04	5.68	2.56	16.17
NRL	50	48.21	93.33	2017.40	2912.17	12776.64	8020.00
	100	93.15	235.02	3027.31	7659.54	22422.72	10311.65
	150	142.19	382.26	4589.12	7587.09	34994.47	15231.63
	200	195.27	426.17	6201.94	9698.77	46339.50	21071.67
	250	246.83	354.56	7925.88	15284.39	54313.85	39197.61

Tabla F.4: Resultados con aplicación del modelo de movilidad IDM sobre el escenario 1 - ‘urbano’

MODELO		PROTOCOLOS					
IDM		AODV		DSDV		CBRP	
Métricas	Nodos	802.11p	802.11b	802.11p	802.11b	802.11p	802.11b
Enviados	50	26	27	31	25	28	25
	100	67	70	63	64	62	60
	150	95	104	90	102	96	94
	200	128	122	123	132	128	123
	250	164	160	164	158	157	161
Recibidos	50	26	21	31	13	28	25
	100	67	55	63	40	62	46
	150	95	81	90	59	96	91
	200	127	105	123	95	128	113
	250	163	145	164	139	157	161
Perdidos	50	0	6	0	12	0	0
	100	0	15	0	24	0	14
	150	1	23	0	43	0	3
	200	1	17	0	37	0	10
	250	1	15	0	19	0	0
Throughput	50	0.44	0.37	0.52	0.36	0.47	0.42
	100	1.10	0.91	1.04	0.66	1.03	0.77
	150	1.58	1.34	1.50	0.97	1.60	1.54
	200	2.09	1.80	2.05	1.57	2.14	1.85
	250	2.76	2.38	2.69	2.28	2.65	2.64
PDR	50	100.00	77.78	100.00	52.00	100.00	100.00
	100	100.00	78.57	100.00	62.50	100.00	76.67
	150	100.00	77.88	100.00	57.84	100.00	96.81
	200	99.22	86.07	100.00	71.97	100.00	91.87
	250	99.39	90.62	100.00	87.97	100.00	100.00
Average Delay	50	646.22	653.78	1.61	11.85	1.62	39.76
	100	988.16	678.45	1.60	3.68	1.62	521.20
	150	2549.57	954.51	1.63	229.75	1.69	18.65
	200	1594.63	771.04	1.90	6.48	2.18	74.00
	250	242.55	269.26	1.82	2.53	2.60	28.23
NRL	50	50.00	151.67	1655.10	3954.31	12775.57	6322.40
	100	97.01	251.76	3217.65	7318.27	23129.42	13947.09
	150	148.42	447.77	4967.02	8583.98	33495.45	14607.13
	200	200.04	385.90	6711.17	10826.59	44418.84	23717.12
	250	242.39	339.78	7569.40	14072.61	56517.37	39235.60

Tabla F.5: Resultados con aplicación del modelo de movilidad Krauss sobre el escenario 2 - ‘en carretera’

MODELO		PROTOCOLOS					
Krauss		AODV		DSDV		CBRP	
Resultados	Nodos	802.11p	802.11b	802.11p	802.11b	802.11p	802.11b
Enviados	50	29	26	29	29	29	28
	100	66	64	67	65	66	70
	150	96	104	93	102	99	99
	200	131	127	128	132	125	125
	250	166	168	160	163	170	168
Recibidos	50	19	20	20	19	20	20
	100	56	53	57	54	56	59
	150	86	92	85	91	86	89
	200	118	117	117	122	113	116
	250	151	151	143	147	156	152
Perdidos	50	10	6	9	10	9	8
	100	10	11	10	11	10	11
	150	40	12	8	11	13	10
	200	13	10	11	10	12	9
	250	15	17	17	16	14	16
Throughput	50	0.32	0.35	0.36	0.32	0.36	0.35
	100	0.92	0.91	0.94	0.94	0.95	0.98
	150	1.43	1.51	1.40	1.49	1.44	1.48
	200	1.94	1.93	1.92	2.01	1.85	1.90
	250	2.48	2.47	2.35	2.41	2.56	2.50
PDR	50	65.52	76.92	68.97	67.86	68.97	71.43
	100	84.85	82.81	85.07	83.08	84.85	84.29
	150	89.58	88.46	91.40	89.22	86.87	89.90
	200	90.08	92.13	91.41	92.42	90.40	92.80
	250	90.96	89.88	89.38	90.18	91.76	90.48
Average Delay	50	2.62	4.39	1.59	1.70	1.62	1.88
	100	3.17	44.23	1.59	1.53	1.62	1.63
	150	4.66	556.02	1.59	1.51	1.64	1.66
	200	7.83	1698.02	1.76	1.47	1.65	1.62
	250	192.09	764.43	1.86	1.47	3.42	1.57
NRL	50	59.79	21.25	1168.40	916.47	6819.45	5788.40
	100	68.98	44.00	1812.00	1508.19	10566.38	8557.36
	150	89.08	45.18	4219.69	1787.74	13960.05	12002.53
	200	169.04	73.03	9358.20	3419.23	19210.58	18834.72
	250	213.74	98.23	9862.16	4185.39	24795.64	22830.28

Tabla F.6: Resultados con aplicación del modelo de movilidad Wagner sobre el escenario 2 - ‘en carretera’

MODELO		PROTOCOLOS					
Wagner		AODV		DSDV		CBRP	
Resultados	Nodos	802.11p	802.11b	802.11p	802.11b	802.11p	802.11b
Enviados	50	27	30	30	26	28	27
	100	65	65	67	65	64	63
	150	95	100	93	99	98	92
	200	127	123	127	127	128	130
	250	168	163	165	164	171	162
Recibidos	50	18	20	21	19	20	19
	100	54	54	56	54	53	51
	150	84	88	83	89	86	82
	200	114	115	116	115	116	120
	250	151	146	150	147	163	147
Perdidos	50	9	10	9	7	8	8
	100	11	11	11	11	11	12
	150	11	12	10	10	12	10
	200	13	8	11	12	12	10
	250	17	17	15	17	8	15
Throughput	50	0.31	0.33	0.35	0.32	0.38	0.32
	100	0.91	0.91	0.93	0.89	0.88	0.84
	150	1.38	1.45	1.37	1.49	1.41	1.37
	200	1.89	1.89	1.94	1.90	1.91	2.01
	250	2.48	2.43	2.47	2.42	2.69	2.45
PDR	50	66.67	66.67	70.00	73.08	71.43	70.37
	100	83.08	83.08	83.58	83.08	82.81	80.95
	150	88.42	88.00	89.25	89.90	87.76	89.13
	200	89.76	93.50	91.34	90.55	90.62	92.31
	250	89.88	89.57	90.91	89.63	95.32	90.74
Average Delay	50	2.78	4.82	1.59	1.48	1.62	1.60
	100	3.27	4.29	1.61	1.76	1.62	1.49
	150	252.76	389.78	1.59	1.53	1.62	1.52
	200	49.23	734.95	1.70	1.56	1.64	1.49
	250	288.14	1036.49	1.97	1.53	3.23	1.68
NRL	50	55.22	27.00	1137.67	933.32	6866.40	6210.79
	100	70.39	42.00	1671.66	1513.15	11110.38	9437.59
	150	91.61	46.40	5041.69	1787.80	13834.77	12533.80
	200	164.65	73.00	10784.46	3531.32	21952.69	17491.88
	250	209.17	98.09	10442.64	4389.97	23459.78	22347.82

Tabla F.7: Resultados con aplicación del modelo de movilidad Kerner sobre el escenario 2 - ‘en carretera’

MODELO		PROTOCOLOS					
Kerner		AODV		DSDV		CBRP	
Resultados	Nodos	802.11p	802.11b	802.11p	802.11b	802.11p	802.11b
Enviados	50	27	30	30	26	28	27
	100	65	65	67	65	64	63
	150	95	100	93	99	102	97
	200	127	118	126	125	119	122
	250	157	164	151	168	164	162
Recibidos	50	18	20	21	19	20	20
	100	54	54	56	54	53	51
	150	84	88	83	89	90	87
	200	117	109	116	114	109	112
	250	140	149	135	153	155	145
Perdidos	50	9	10	9	7	8	7
	100	11	11	11	11	11	12
	150	11	12	10	10	12	10
	200	10	9	10	11	10	10
	250	17	15	16	15	9	17
Throughput	50	0.31	0.33	0.35	0.32	0.38	0.33
	100	0.91	0.91	0.93	0.89	0.88	0.84
	150	1.38	1.45	1.37	1.49	1.48	1.46
	200	1.92	1.79	1.91	1.88	1.79	1.84
	250	2.30	2.45	2.22	2.58	2.55	2.38
PDR	50	66.67	66.67	70.00	73.08	71.43	74.07
	100	83.08	83.08	83.58	83.08	82.81	80.95
	150	88.42	88.00	89.25	89.90	88.24	89.69
	200	92.13	92.37	92.06	91.20	91.60	91.80
	250	89.17	90.85	89.40	91.07	94.51	89.51
Average Delay	50	2.78	4.82	1.59	1.48	1.62	1.61
	100	3.27	4.29	1.61	1.76	1.62	1.49
	150	252.76	389.78	1.59	1.53	1.62	1.50
	200	100.79	1679.47	1.71	1.47	1.68	1.54
	250	235.94	731.52	1.74	1.49	7.86	1.46
NRL	50	55.22	27.00	1137.67	933.32	6866.40	5892.80
	100	70.39	42.00	1671.66	1513.15	11110.38	9437.59
	150	91.61	46.40	5041.69	1787.80	13256.58	11835.34
	200	163.62	75.12	10172.36	3630.41	23254.95	18737.15
	250	55.22	27.00	1137.67	933.32	6866.40	5892.80

Tabla F.8: Resultados con aplicación del modelo de movilidad IDM sobre el escenario 2 - ‘en carretera’

MODELO		PROTOCOLOS					
IDM		AODV		DSDV		CBRP	
Métricas	Nodos	802.11p	802.11b	802.11p	802.11b	802.11p	802.11b
Enviados	50	28	29	26	28	28	28
	100	63	67	68	67	63	69
	150	96	95	95	100	100	97
	200	127	133	130	128	132	126
	250	168	172	161	156	165	166
Recibidos	50	19	20	18	20	20	20
	100	53	56	56	56	53	58
	150	84	84	84	89	88	87
	200	116	121	119	114	126	115
	250	153	152	147	141	156	150
Perdidos	50	9	9	8	8	8	8
	100	10	11	12	11	10	11
	150	12	11	11	11	12	10
	200	11	12	11	14	6	11
	250	15	20	14	15	9	16
Throughput	50	0.33	0.34	0.31	0.36	0.33	0.36
	100	0.88	0.93	0.94	0.92	0.88	0.95
	150	1.39	1.38	1.38	1.48	1.46	1.51
	200	1.91	1.98	1.98	1.88	2.11	1.91
	250	2.52	2.52	2.41	2.32	2.56	2.46
PDR	50	67.86	68.97	69.23	71.43	71.43	71.43
	100	84.13	83.58	82.35	83.58	84.13	84.06
	150	87.50	88.42	88.42	89.00	88.00	89.69
	200	91.34	90.98	91.54	89.06	95.45	91.27
	250	91.07	88.37	91.30	90.38	94.55	90.36
Average Delay	50	2.88	4.01	1.59	1.57	1.62	1.79
	100	3.04	6.78	1.59	1.62	3.04	10.88
	150	3.84	870.54	1.63	1.62	1.63	1.57
	200	147.63	92.93	1.73	1.70	3.87	2.06
	250	256.94	995.35	2.04	1.44	2.91	1.52
NRL	50	50.68	25.20	1353.17	868.80	6821.10	5810.90
	100	66.75	35.75	1668.50	1409.20	66.75	8565.71
	150	99.56	45.37	4148.08	1825.34	13516.01	12135.53
	200	165.84	78.92	7304.68	3203.17	21017.19	20639.10
	250	217.07	102.19	8166.99	4103.21	25081.79	23025.13

ANEXO G

Paper

Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad para redes Ad-Hoc Vehiculares usando mapas reales

Verónica Maldonado^{#1}, Manuel Quiñones^{#2}

^{#1}Profesional en Formación, Electrónica y Telecomunicaciones - UTPL

^{#2}Docente, Electrónica y Telecomunicaciones - UTPL

Loja - Ecuador, 2012

¹vemaldonadox@utpl.edu.ec, ²mfquinonez@utpl.edu.ec

Resumen—Las redes móviles Ad-Hoc, específicamente las VANETs (Redes Ad-Hoc Vehiculares) vienen siendo objeto de investigación durante los diez últimos años. En el presente trabajo, se destacan comparaciones entre los protocolos de enrutamiento: AODV, DSDV y CBRP; sobre escenarios que describen el tráfico vehicular urbano y en carretera, utilizando mapas reales de la ciudad de Loja. Así mismo se comparan los modelos de movilidad que incorpora el simulador de tráfico CityMob for Roadmaps (C4R) y se analiza la funcionalidad de los protocolos, sobre las prestaciones de tarjetas inalámbricas bajo los estándares 802.11p y 802.11b; diseñadas para su uso en los entornos vehiculares.

Índice de términos—Ad-Hoc, C4R, protocolos de enrutamiento, VANET, métricas, modelos de movilidad, ns-2, 802.11p/b.

I. INTRODUCCIÓN

LA conectividad inalámbrica ha experimentado un amplio crecimiento, que ahora con la ubicuidad se extiende sobre escenarios diversos y de una manera totalmente independiente de la ubicación [1], es decir; a aquellos entornos que reúnen condiciones de movilidad permanente, como es el caso de las redes ad-hoc vehiculares.

Investigaciones en relación al tema, provienen en su mayoría de Europa [2], Norteamérica [3] y el Japón [4], y se han desplegado incluso experimentaciones de campo sobre escenarios reales [5]. Aunque la mayoría de estudios y simulaciones VANET encontrados, están sobre la base del estandar IEEE 802.11b; dada la aprobación del IEEE 802.11p - WAVE, se presenta un análisis comparativo del desempeño de los protocolos de enrutamiento, sobre ambas tecnologías de comunicación.

Como parte de la estructura del presente documento en la sección II, se exponen las principales características de los protocolos de enrutamiento y una breve descripción de los modelos de movilidad aplicados en las simulaciones VANET, en la sección III; se presentan los materiales y métodos que se llevaron a cabo, desde la preparación de los simuladores, la definición de escenarios con sus correspondientes parámetros de tráfico y red, el estudio de las métricas a utilizar para la evaluación de la VANET, hasta la metodología considerada

para la obtención de los resultados, los cuales se muestran en la sección IV; y finalmente en las secciones V y VI; se anotan las conclusiones y recomendaciones respectivamente, como fruto de la investigación y desarrollo del actual proyecto de fin de titulación.

II. PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO Y MODELOS DE MOVILIDAD

Se ha tomado en consideración tres protocolos de enrutamiento: AODV, DSDV y CBRP, que pertenecen al grupo “basados en topología” de la clasificación correspondiente para VANETs [6]. La tabla I resume las principales características de los mismos.

TABLA I
COMPARACIÓN DE PROTOCOLOS DE ENRUTAMIENTO: AODV, DSDV Y CBRP [7], [8], [9]

PARÁMETRO	AODV	DSDV	CBRP
Tipo de protocolo	Reactivo	Proactivo	Híbrido
Mensajes de control	RREQ, RREP, RRER	HELLO & Update	HELLO, RREQ, RREP, RRER
Administración Central	No	No	“clusterhead”
Descubrimiento de ruta	Cada nodo fuente envía broadcast de RREQs bajo demanda	Ya posee información hacia todos los destinos	Ya posee información de los vecinos dentro del cluster, pero envía broadcast bajo demanda entre clusters
Forma de construir la ruta	Cada receptor de RREQs, mantiene un puntero hacia atrás que es usado por los mensajes RREPs para el trazado de ruta hacia el destino	El siguiente salto es calculado por la tabla de enrutamiento de vecinos hasta alcanzar el destino	Mediante tabla de enrutamiento dentro del cluster y bajo demanda entre clusters
Enrutamiento sin bucles	Sí	Sí	Sí
Tipo de enrutamiento	salto a salto	salto a salto	fuelle de enrutamiento
SopORTE de enlaces	Simétrico	Simétrico	Simétrico, selectivo, asimétrico
Escalabilidad	Sí, pero vulnerable a cambios de la red	No	Sí, pero puede llegar a introducir demasiado overhead
Métrica	Ruta más corta	Ruta más corta	Ruta más corta
Ventajas	- Bajo overhead - Soporte de mensajes unicast, multicast y broadcast. - Bajo consumo de recursos	- Baja probabilidad de colisiones - Alto rendimiento y bajo retardo en redes pequeñas - Mantiene sólo la mejor ruta hacia el destino	- Baja demanda para el descubrimiento de rutas (clustering) - Reparación de enlaces rotos a nivel local - Optimización de enrutamiento con el acortado de rutas
Desventajas	- Mayor probabilidad de colisiones - Latencia media o alta en el descubrimiento de rutas dependiendo del tamaño de la red	- Alto overhead - Retardo incremental en redes de gran escala - Desperdicio de ancho de banda - Alto consumo de recursos	- Debido al tipo de enrutamiento, el tamaño de paquete aumenta en proporción a la longitud del recorrido de la ruta; siendo apropiado para clusters pequeños

A. Modelo Krauss

Es un modelo microscópico de seguimiento de autos propuesto por Stefan Krauß [10], [11]; que permite representar las variaciones de velocidad producidas por la dependencia correspondiente a la mínima distancia de frenado, que han de mantener los conductores respecto al vehículo que les precede en la vía, con la intención de evitar choques o colisiones [12].

B. Modelo Wagner

Desarrollado por Peter Wagner, con el fin de introducir dos características importantes de la conducción humana: la primera bajo el supuesto de que las personas suelen planificar el evento futuro mientras conducen, y la segunda referente al hecho; de que el tipo de control que ejercen sobre sus vehículos, no es continuo pero sí discreto en el tiempo, es decir; sólo actúan en determinados momentos que se denominan *puntos de acción*, los cuales son considerados como fenómenos aleatorios; pues suceden con mayor o menor motivo en función del entorno y la situación del conductor [12], [13].

C. Modelo Kerner

Conocido también como teoría del tráfico trifásico [12], [14], porque divide el tráfico vehicular en tres fases para modelarlo: flujo libre, flujo sincronizado y amplio congestionamiento. A continuación la explicación de cada estado:

1) *Flujo libre*: en este estado los vehículos pueden circular sin problemas de congestión.

2) *Flujo sincronizado*: el termino “sincronizado” se refiere a la tendencia de sincronización, de las velocidades de los vehículos en la carretera; debido a la baja probabilidad de paso que hay en el tráfico congestionado.

3) *Amplio congestionamiento*: es un caso de tráfico congestionado; que se da cuando la densidad de tráfico es extremadamente alta y la velocidad a la que circulan los vehículos es casi nula.

D. Modelo de Conducción Inteligente (IDM)

Modelo determinista, en el cual la aceleración de un vehículo depende de la suya propia, de la que tienen los vehículos que le rodean y de la distancia mantenida hacia el vehículo precedente. Con IDM, es posible simular además de los aspectos relacionados con el vehículo y su entorno; el comportamiento de los conductores, para lo cual supone tres tipos diferentes: agresivo, normal y tímido. Así mismo, permite diferenciar entre conductores de autos pequeños y camiones conforme se aprecia en la tabla II [12].

TABLA II

PARÁMETROS DEL MODELO IDM PARA SIMULAR EL COMPORTAMIENTO DE TRES CLASES DE CONDUCTORES Y DE CONDUCTORES DE CAMIÓN [12]

Parámetros IDM	Normal	Tímido	Agresivo	Camión
Velocidad deseada v_0 (Km/h)	120	100	140	85
Tiempo espacial T deseado (s)	1.5	1.8	1.0	2.0
Distancia de seguridad δ_0 (m)	2.0	4.0	1.0	4.0
Aceleración máxima a (m/s^2)	1.4	1.0	2.0	0.7
Deceleración b (m/s^2)	2.0	1.0	3.0	2.0

Sin embargo, los valores en la tabla II sirven únicamente de referencia, y varían de acuerdo a los límites de velocidad; establecidos por la ley de transporte y seguridad vial de un país o región en específico.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Preparación de Simuladores

Para este estudio, se han usado las herramientas de simulación de tráfico y red: C4R¹) y NS-2² respectivamente. La figura 1, representa el esquema principal, en el cual se fundamentan de principio a fin los procesos para la simulación y análisis de resultados.

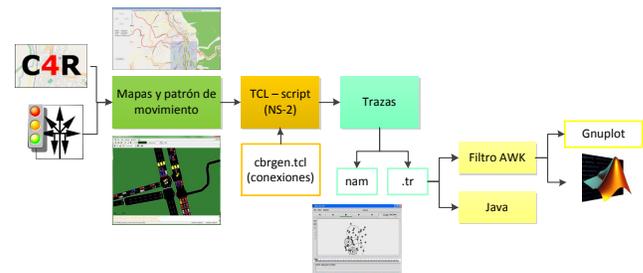


Fig. 1. Diagrama de procesos para la simulación y análisis de resultados

Primeramente con el software C4R, se genera el escenario de tráfico vehicular a partir de mapas reales en los que se puede delimitar el área de simulación, la traza de movilidad generada (*.tcl); es compatible con el simulador de red NS-2, y se carga junto con el fichero de las conexiones en los scripts de simulación creados previamente para cada tecnología de comunicación (802.11p y 802.11b). Luego de ejecutar las simulaciones en NS-2, se generan las trazas *.tr y *.nam, donde la primera permite distinguir todos los eventos producidos durante la simulación línea por línea para un análisis exhaustivo de la red, y la segunda los representa en una interfaz gráfica, amigable al usuario. En el apartado D, se explica la metodología empleada para la obtención de los resultados a partir de la traza *.tr, que sigue en el diagrama de procesos de la simulación.

B. Definición de Escenarios

Con el fin de evaluar de mejor manera las prestaciones de las tarjetas inalámbricas seleccionadas como parte del equipamiento OBU (On Board Unit) en los vehículos, se plantean los siguientes escenarios:

1) *Escenario 1: Simulación del tráfico vehicular urbano en la ciudad de Loja*: la figura 2, representa el área de simulación sobre la que se despliega el tráfico vehicular urbano de acuerdo a las configuraciones expuestas en la tabla III.

¹<http://www.grc.upv.es/Software/c4r.html>

²<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>



Fig. 2. Área de simulación del Escenario 1 – Centro urbano de la ciudad de Loja; a) representación en C4R; b) representación en SUMO

TABLA III
PARÁMETROS DE GENERACIÓN DE TRÁFICO - ESCENARIO 1

Parámetros	Valor
Área de simulación	1500m × 2000m
Área en 'downtown'*	550m × 350m
Atracción en 'downtown'*	0.5
Número de vehículos	50, 100, 150, 200, 250
Velocidad vehicular máxima	13.89 m/s ≈ 50 Km/h
Velocidad vehicular en 'downtown'*	8.33 m/s ≈ 30 Km/h
Aceleración	1.4 m/s ²
Desaceleración	2 m/s ²
Modelos de Movilidad	Krauss, Wagner, Kerner, IDM
Tiempo de simulación	250 s

*Término empleado para referirse a las zonas en el mapa donde los vehículos tienden a concentrarse o dispersarse según la probabilidad de atracción asignada

Los parámetros de simulación de red expuestos en la tabla IV, se han configurado en base a las especificaciones contenidas en los 'datasheets' de las interfaces inalámbricas consideradas: OBU-102 [15] bajo el estándar 802.11p y WMIC Cisco 3201 [16] bajo el estándar 802.11b.

TABLA IV
PARÁMETROS DE SIMULACIÓN DE RED - ESCENARIO 1

Parámetros	Valor
Área de simulación	1500m × 2000m
MAC/PHY	802.11b / 802.11p
Modelo de Propagación	Nakagami
Rango de transmisión	250m
Modelo de Antena	Omnidireccional 6dBi / 5dBi
Potencia de transmisión	20dBm / 30dBm (EIRP)
Sensibilidad	-85dBm / -90dBm
Tasa de transmisión	11Mbps / 6Mbps
Número de nodos (vehículos)	50, 100, 150, 200, 250
Número de conexiones	25, 50, 75, 100, 125
Protocolos de enrutamiento	AODV, CBRP, DSDV
Protocolo de transporte	UDP
Tipo de tráfico	CBR
Tamaño de paquete	512 bytes
Tasa de transmisión	150 pack/s
Tiempo de simulación	250s

2) *Escenario 2: Simulación del tráfico vehicular sobre carretera (trayecto Catamayo - Loja):* la figura 3 representa el escenario generado en base a los parámetros expuestos en la tabla V, considerando para la simulación; flujos de salida desde ambos extremos de la vía. Los parámetros de simulación

de red considerados en el Escenario 1 (tabla IV), se mantienen para este escenario, a excepción del área de simulación que se establece con el valor de: 15000m × 7000m

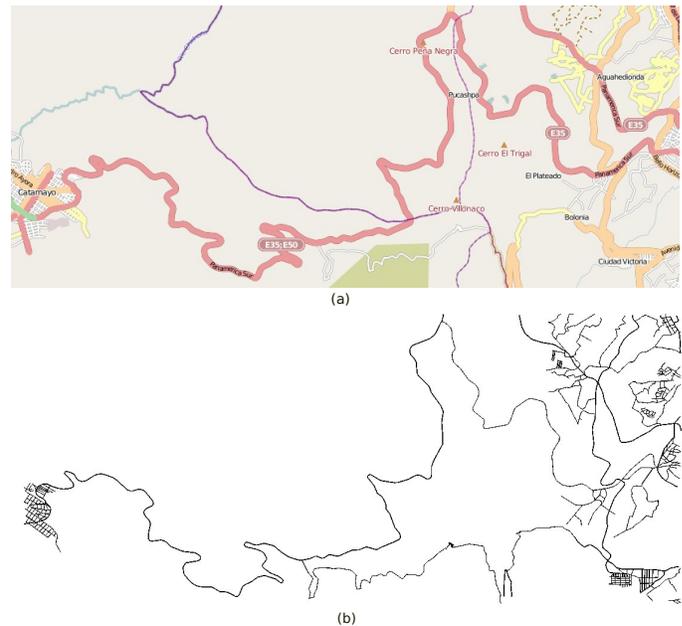


Fig. 3. Área de simulación del Escenario 2 – Trayecto Catamayo - Loja; a) representación en C4R; b) representación en SUMO

TABLA V
PARÁMETROS DE GENERACIÓN DE TRÁFICO - ESCENARIO 2

Parámetros	Valor
Área de simulación	17000m × 7000m
Número de vehículos	50, 100, 150, 200, 250
Velocidad vehicular máxima	22.22 m/s ≈ 80 Km/h
Aceleración	1.4 m/s ²
Desaceleración	2 m/s ²
Modelos de Movilidad	Krauss, Wagner, Kerner, IDM
Tiempo de simulación	250 s

C. Métricas de Evaluación de Red

En RFC 2501¹, se exponen algunas métricas cuantitativas comúnmente utilizadas para evaluar el desempeño de los protocolos de enrutamiento en redes móviles ad-hoc, ya sea para determinar la fiabilidad y eficiencia del protocolo (PDR, throughput, delay y jitter) o para obtener medidas que ayudan a optimizar la asignación de los recursos (gasto energético, sobrecarga de enrutamiento y NRL).

Para este trabajo se han considerado únicamente las siguientes: throughput, average end to end delay, pdf y nrl, por ser las más empleadas [19], [20], [21], [22], [23] y suficientes para diferenciar el comportamiento de los protocolos sobre los distintos escenarios de movilidad y mapas. A continuación la descripción de las métricas utilizadas y el cálculo de las mismas.

¹<http://www.ietf.org/rfc/rfc2501.txt>

1) *Throughput*: Es el número total de bits entregados exitosamente al destino durante el tiempo de simulación. La ecuación 1 se usa para éste cálculo.

$$TH = \frac{B_r \times 8}{T_s \times 1000} \quad [Kbps] \quad (1)$$

En donde:

TH , Throughput
 B_r , Bytes recibidos
 T_s , Tiempo de simulación

2) *Packet Delivery Ratio*: Es la relación cociente de los paquetes de datos entregados al destino y los generados por las fuentes CBR. [24] Se calcula en base a la ecuación 2.

$$PDR = \frac{P_r}{P_s} \times 100\% \quad (2)$$

En donde:

PDR , Packet Delivery Ratio
 P_r , Paquetes CBR recibidos
 P_s , Paquetes CBR enviados

3) *Average end to end Delay*: Se define como el tiempo necesario para que un conjunto de paquetes de datos se transmita a través de la red, desde la fuente al destino. [24] La ecuación 3, se emplea para calcular el retraso promedio de extremo a extremo [25].

$$D = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Tr_i - Ts_i) \times 1000 \quad [ms] \quad (3)$$

En donde:

D , Average end to end delay
 i , Identificador de paquete
 n , Número de paquetes entregados exitosamente
 Tr_i , Tiempo de recepción
 Ts_i , Tiempo de envío

4) *Normalized Routing Load*: Es la carga de enrutamiento normalizada, expresada por la relación cociente entre el número de paquetes de enrutamiento transmitidos y el número de paquetes de datos entregados a su destino (ecuación 4) [24].

$$NRL = \frac{Pr_s}{Pd_r} \quad (4)$$

En donde:

NRL , Normalized Routing Load
 Pr_s , paquetes de enrutamiento transmitidos
 Pd_r , paquetes de datos recibidos

D. Metodología para la obtención de resultados

Previa ejecución de los scripts de simulación para ambas tecnologías, dependiendo del escenario; se varían los parámetros señalados en la figura 4 como a continuación se indica.

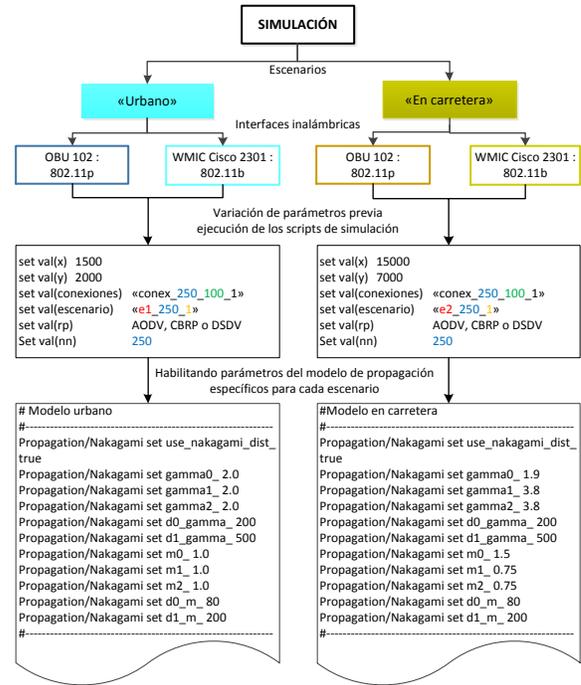


Fig. 4. Diagrama de procesos para la obtención de resultados

- Se establece el área de simulación correspondiente según el escenario.
- Se recarga los archivos del escenario móvil y las conexiones para cada densidad de tráfico (número de nodos - color azul).
- Los números en color amarillo varían de 1 a 4 e indican el modelo de movilidad aplicado: (1) Krauss, (2) Wagner, (3) Kerner y (4) IDM.
- Los números en color verde indican el número máximo de conexiones generadas que corresponden al 40% del número de nodos en la red.
- El prefijo en color rojo, indica el escenario: (e1) urbano, (e2) en carretera.
- Se simula un protocolo a la vez sobre el escenario en estudio.
- Se verifica que estén habilitados los parámetros del modelo de propagación correspondiente a cada escenario.

A cada simulación ejecutada con NS-2, se realiza el filtrado awk de la traza resultante según como se indica en la figura 5 y la representación gráfica de los resultados se obtuvo con la herramienta 'plottools' de MATLAB.

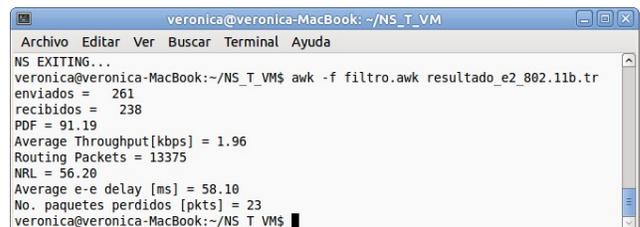


Fig. 5. Ejecución de filtrado AWK

IV. RESULTADOS

A. Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad en el escenario "urbano"

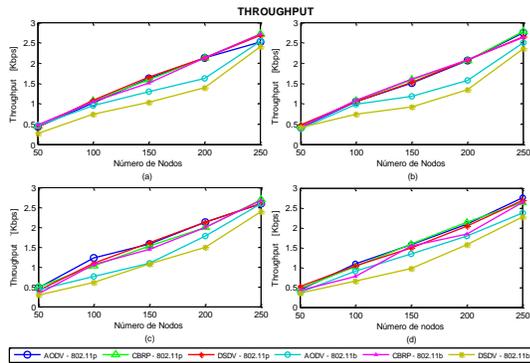


Fig. 6. Evaluación de protocolos de enrutamiento con la métrica Throughput sobre el escenario 'urbano'. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM

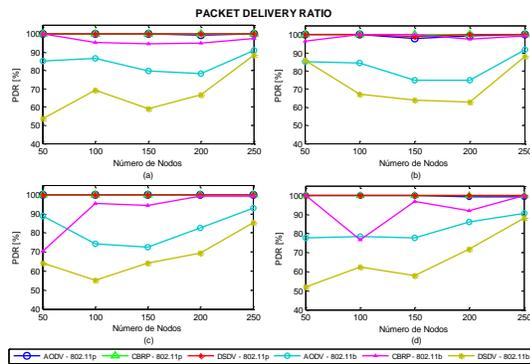


Fig. 7. Evaluación de protocolos de enrutamiento con la métrica PDR sobre el escenario 'urbano'. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM

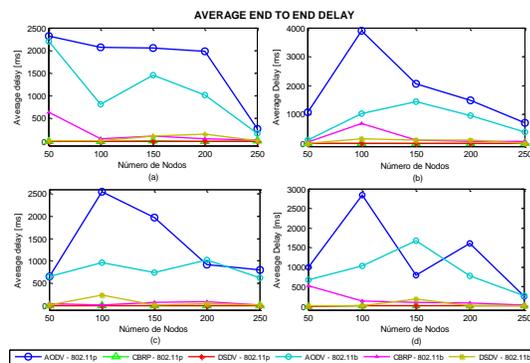


Fig. 8. Evaluación de protocolos de enrutamiento con la métrica Average delay sobre el escenario 'urbano'. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM

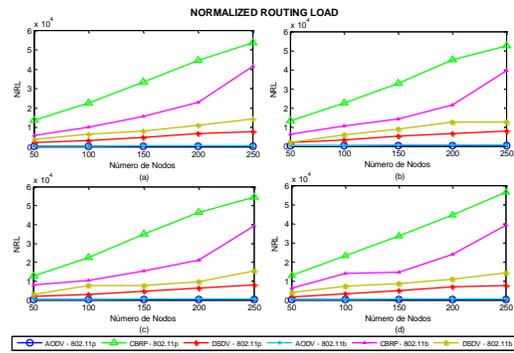


Fig. 9. Evaluación de protocolos de enrutamiento con la métrica NRL sobre el escenario 'urbano'. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM

B. Comparación de protocolos de enrutamiento y modelos de movilidad en el escenario "en carretera"

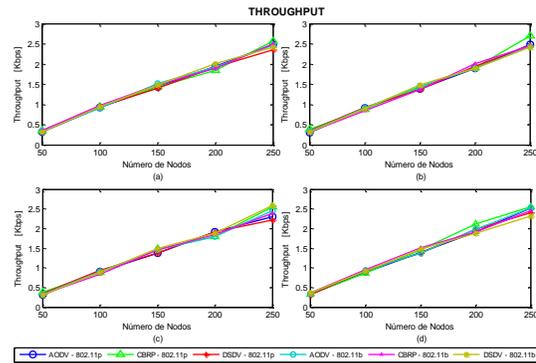


Fig. 10. Evaluación de protocolos de enrutamiento con la métrica Throughput sobre el escenario 'en carretera'. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM

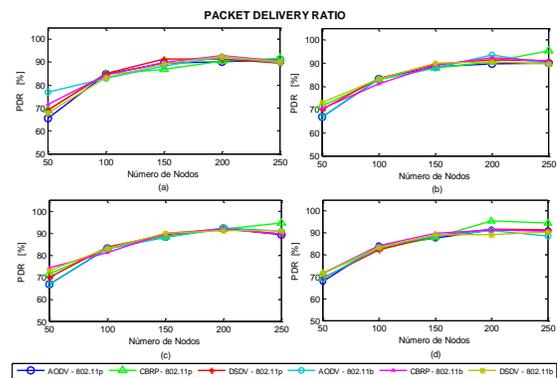


Fig. 11. Evaluación de protocolos de enrutamiento con la métrica PDR sobre el escenario 'en carretera'. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM

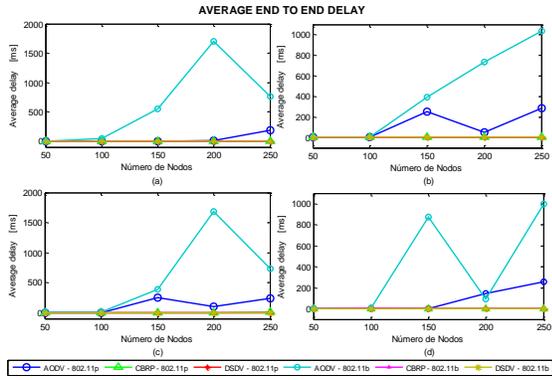


Fig. 12. Evaluación de protocolos de enrutamiento con la métrica Average delay sobre el escenario 'en carretera'. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM

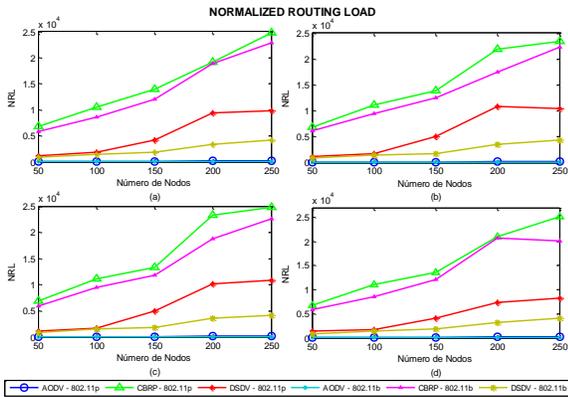


Fig. 13. Evaluación de protocolos de enrutamiento con la métrica NRL sobre el escenario 'en carretera'. Modelos de movilidad: a) Krauss, b) Wagner, c) Kerner y d) IDM

C. Comparación de escenarios

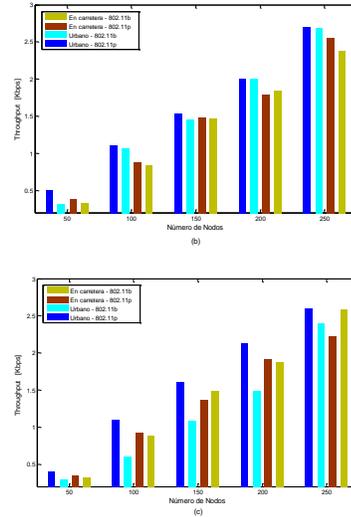
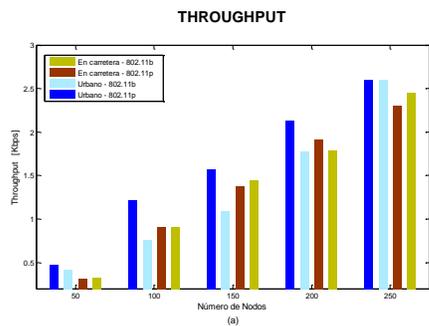


Fig. 14. Comparación de escenarios: 'urbano' y 'en carretera' con la métrica Throughput. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV

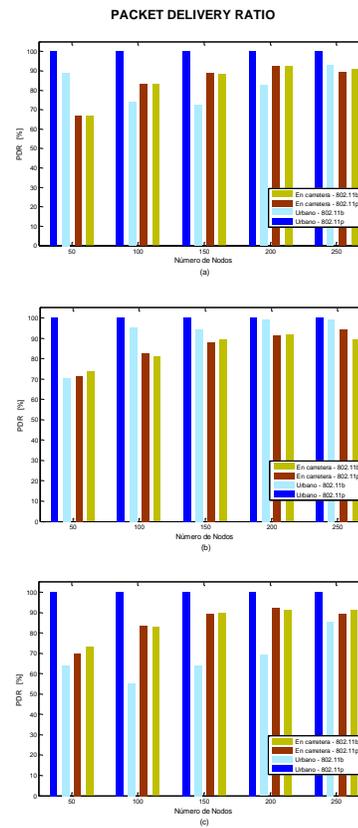


Fig. 15. Comparación de escenarios: 'urbano' y 'en carretera' con la métrica PDR. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV

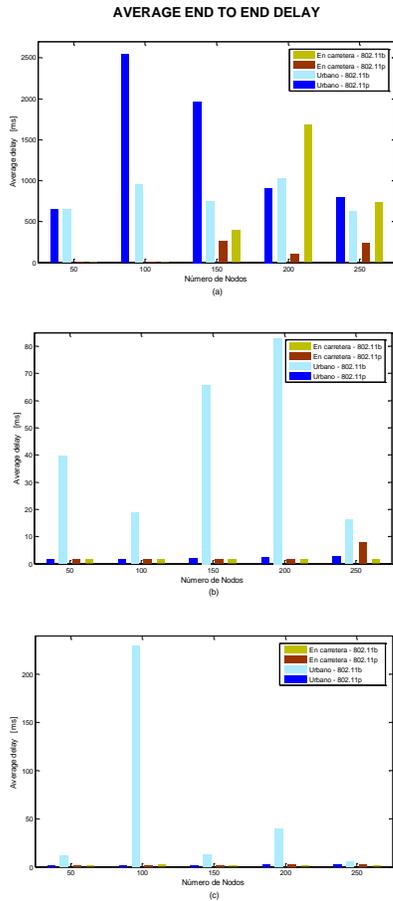


Fig. 16. Comparación de escenarios: 'urbano' y 'en carretera' con la métrica Average delay. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV

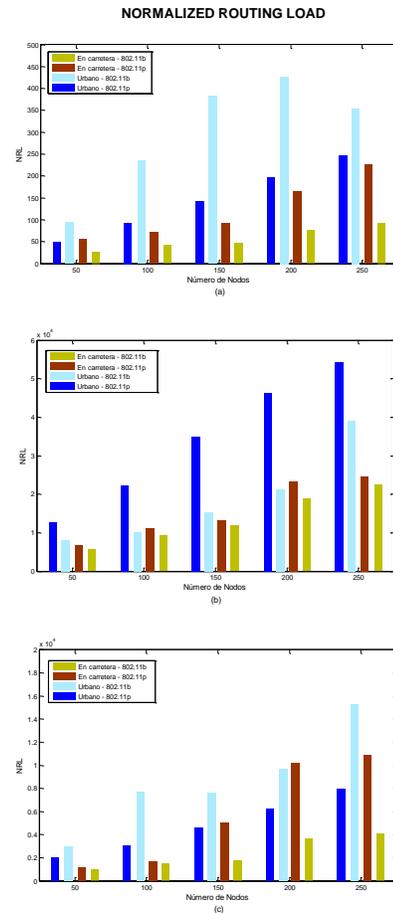


Fig. 17. Comparación de escenarios: 'urbano' y 'en carretera' con la métrica NRL. Protocolos de enrutamiento: a) AODV, b) CBRP y c) DSDV

V. CONCLUSIONES

- El uso de mapas reales y modelos de movilidad, favoreció a la inserción de realismo en la simulación, sin embargo sigue habiendo incertidumbre en los resultados; pues no se ha considerado en la simulación del entorno urbano la ubicación de semáforos en las intersecciones de forma semejante a la realidad y el efecto de obstáculos característicos del medio que necesariamente introducen pérdidas en la comunicación.
- A partir de la comparación de escenarios (figuras 14, 15, 16 y 17) se analizaron las prestaciones de las interfaces inalámbricas seleccionadas, pudiendo concluir de forma general que la OBU 102 basada en el estándar 802.11p es apropiada para entornos VANET urbanos y que la WMIC Cisco 2301 sobre la base de 802.11b, tiene mejor desempeño sobre entornos VANET en carretera.
- Sobre el escenario en carretera (figura 11) resulta evidente que el protocolo AODV, es el que mejor desempeño tiene independientemente de la tecnología que se seleccione por el mínimo NRL (figura 13), y aunque se ha dicho que sobre el estándar 802.11b; los tres protocolos tienen un desempeño óptimo, si

se considera enrutamiento AODV, sería preferible aplicarlo sobre la base 802.11p, pues aunque signifique incrementar un poco el 'overhead', se conseguiría reducir significativamente el retardo (figura 12) en la transmisión y recepción de paquetes de datos hacia el destino.

- A partir de la evaluación de los modelos de movilidad sobre los escenarios 'urbano' y 'en carretera', se encontró que en este último (figura 11); existe una diferencia entre modelos de movilidad de aproximadamente un 5 a 10%, considerando la métrica PDR con ambas tecnologías de comunicación (802.11p y 802.11b), lo cual es tolerable o insignificante debido a que el tráfico en carretera no se ve afectado por las intersecciones como en el caso urbano (figura 7); donde se obtiene una pérdida levemente mayor (entre 20 a 30%) con tecnología 802.11b, sobre todo cuando la red se compone de 50 a 100 nodos, tendiendo a ser casi irrelevante (3 a 5%) en escenarios más grandes. No obstante, con tecnología 802.11p; la diferencia entre modelos de movilidad es prácticamente nula. Por lo tanto, se concluye que los modelos de movilidad no tienen incidencia importante en el tráfico vehicular en carretera, pero si la tienen en el tráfico vehicular urbano con tecnología 802.11b.

- En el entorno urbano, CBRP ejecutándose sobre el estándar 802.11b, reduce el nivel de overhead obtenido con el mismo protocolo sobre 802.11p (figura 9), lo cual es significativo para salvaguardar el ancho de banda, evitando que se haga un consumo exagerado del mismo, en la operación del protocolo.
- DSDV puede ser un buen sustituto de CBRP, en el escenario urbano, ejecutándose sobre el estándar 802.11p, ya que asegurando una entrega de paquetes de datos confiable (figura 7), minimiza la carga de enrutamiento de forma significativa (figura 9).
- Comparando la cantidad de paquetes que los protocolos son capaces de entregar al destino, se llega a la conclusión de que AODV tiene mejor desempeño sobre el escenario urbano operando con el estándar 802.11p, principalmente por su bajo overhead y alta escalabilidad (figura 7). Su desempeño es óptimo, sobre todo en redes con mayor número de nodos, pues consigue disminuir el retardo promedio.
- CBRP puede ser ideal como fuente de enrutamiento en RSUs, debido a que presenta retardos sumamente bajos, principalmente en redes pequeñas. Puede ser óptimo para indicar cambio de luces a los semáforos en función de la presencia-ausencia de vehículos en las intersecciones. (consideración para trabajos futuros).
- Los resultados obtenidos, permiten distinguir que en el escenario urbano hay mayor desvanecimiento y multi-trayecto, apreciable en los valores de NRL (figuras 9, 13 y 17 superiores a los del escenario en carretera, que indican que en el escenario urbano los protocolos han requerido del envío de una gran cantidad de mensajes de control para el descubrimiento y mantenimiento de rutas, a diferencia del escenario en carretera donde para enviar similar cantidad de paquetes se ha requerido menor carga de enrutamiento.

REFERENCIAS

- [1] ERICSSON: *More than 50 billion connected devices*, (Febrero 2011), <http://www.ericsson.com/res/docs/whitepapers/wp-50-billions.pdf>
- [2] *Intelligent Transport Systems and Services for Europe*, <http://www.ertico.com/>
- [3] *Intelligent Transportation Society of America*, <http://www.itsa.org/>
- [4] *Intelligent Transportation Systems - Japan*, <http://www.its-jp.org/english/>
- [5] *Pruebas de campo, redes VANET reales*, modificada el 17 de enero de 2012. http://www.deusto.es/servlet/Satellite/Noticia/1326708106947/_cast/%231/cx/UniversidadDeusto/comun/render?esHome=si
- [6] N. BRAHMI, M. BOUSSEDJRA & J. MOUZNA (2011). *Routing in Vehicular Ad Hoc Networks: towards Road-Connectivity Based Routing*, Mobile Ad-Hoc Networks: Applications, Prof. Xin Wang (Ed.), ISBN: 978-953-307-416-0, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/mobile-ad-hoc-networks-applications/routing-in-vehicular-ad-hoc-networks-towards-road-connectivity-based-routing>
- [7] K. GORANTALA: *Routing Protocols in Mobile Ad-hoc Networks*. (Junio 2006), <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.159.9713&rep=rep1&type=pdf>
- [8] E. ROYER & CHAI-KEONG TOH: *"A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks"*. http://graphics.stanford.edu/courses/cs428-03-spring/Papers/readings/Networking/Royer_IEEE_Personal_Comm99.pdf
- [9] P. PATIL & R. SHAH: *"Adjacency Cluster Based Routing Protocol"*. International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies (IJESSET), Vol. 1, pp. 77-82 (Febrero 2012) <http://www.ijeset.com/media/9N2-DEPTH-3-ADJACENCY-CLUSTER-BASED-ROUTING.pdf>
- [10] S. KRAUSS, P. WAGNER & C. GAWRON: *"Metastable States in a Microscopic Model of Traffic Flow"*. (1997) <http://sumo.sourceforge.net/pdf/sk.pdf>
- [11] S. KRAUSS: *"Microscopic Modeling of Traffic Flow: Investigation of Collision Free Vehicle Dynamics"*. (1998) <http://sumo.sourceforge.net/pdf/KraussDiss.pdf>
- [12] A. PARDO: *"CAR: Generación de Modelos de movilidad para redes de vehículos a partir de mapas reales"*. Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas de la Escuela Universitaria Politécnica de Teruel. pp.1-91. (Marzo, 2011).
- [13] P. WAGNER *"How human drivers control their vehicle"*. (Febrero, 2008). pp. 1-5 <http://arxiv.org/pdf/physics/0601058.pdf>
- [14] *"Three-phase traffic theory"*. modificada el 06 de febrero de 2012. http://en.wikipedia.org/wiki/Three_phase_traffic_theory
- [15] *802.11p ETSI TC ITS Wireless Communication System, On Board Unit*, <http://www.unex.com.tw/product/obu-102>
- [16] *Cisco 3201 802.11b/g Wireless Mobile Interface Card*, http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/routers/ps272/product_data_sheet0900aecd800fe971.html
- [17] *Mobile Ad hoc Networking (MANET): Routing Protocol Performance Issues and Evaluation Considerations*, <http://www.ietf.org/rfc/rfc2501.txt>
- [18] S. KERREMANS: *Ad hoc networks and the future of mobile network operators*, pp. 69-100, (Septiembre 2011). http://alexandria.tue.nl/extra2/afstvers/tm/Kerremans_2011.pdf
- [19] B. RAMAKRISHNAN, DR. R. S. RAJESH & R. S. SHAJI *"Performance Analysis of 802.11 and 802.11p in Cluster Based Simple Highway Model"*, pp. 420-426, International Journal of Computer Science and Information Technologies (IJCSIT) Vol. 1, (2010). <http://www.ijcsit.com/docs/vol1issue5/ijcsit2010010520.pdf>
- [20] D. ACATAUASSU, I. COUTO, P. ALVES & K. DIAS *"Performance Evaluation of Inter-Vehicle Communications Based on the Proposed IEEE 802.11p Physical and MAC Layers Specifications"*, The Tenth International Conference on Networks, (2011).
- [21] P. KUMAR, K. LEGO & DR. T. TUIHUNG: *"Simulation based Analysis of Adhoc Routing Protocol in Urban and Highway Scenario of VANET"*. International Journal of Computer Applications (0975 - 8887) Vol. 12, No. 10, pp. 42-49, (Enero 2011).
- [22] P. KUMAR & K. LEGO: *"Comparative Study of Radio Propagation and Mobility Models in Vehicular Adhoc Network"*. International Journal of Computer Applications, Vol.16, No.8, pp. 37-42, (Febrero 2011).
- [23] NIDHI & D.K. LOBIYAL: *"Performance Evaluation of Realistic VANET using Traffic Light Scenario"*. International Journal of Wireless & Mobile Networks (IJWMN), Vol.4, No.1, pp. 327-249, (Febrero 2012).
- [24] H. BINDRA, S. MAAKAR & A. SANGAL: *Performance Evaluation of Two Reactive Routing Protocols of MANET using Group Mobility Model*. IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 7, Issue 3, No 10, pp. 38-43, (Mayo 2010).
- [25] A. JAFARI: *"Performance Evaluation of IEEE 802.11p for Vehicular Communication Networks"*, pp. 1-78, (Septiembre 2011).