

Impacto de la velocidad y modelo de movilidad en una comunicación de datos de una red vehicular¹

Impact of the speed and mobility model in a data communication for a vehicular network

O. A. Orozco, D. F. Chavarro y O. J. Calderón

Recibido Enero 15 de 2014 – Aceptado Junio 6 de 2014

Resumen - En los últimos años, las redes inalámbricas han evolucionado en su desarrollo con el fin de soportar nuevos servicios y optimizar el rendimiento de servicios tradicionales para los usuarios finales. Bajo este contexto, uno de los nuevos tópicos de mayor interés científico es el de la comunicación en redes vehiculares *ad hoc* (VANET), el cual hace referencia a la interconexión de vehículos entre sí y entre éstos y la infraestructura fija. Las VANET presentan características especiales en aspectos como *throughput*, confiabilidad, velocidad de los nodos y utilización de ancho de banda, en comparación con otras redes inalámbricas. Como resultado surgen modelos de movilidad que cuantifican el movimiento de los nodos y se hacen necesarios estudios para analizar la forma como pueden llegar a impactar dichos modelos en una comunicación de datos de una VANET.

Palabras Clave - modelo de movilidad, simulación, V2V, VANET, velocidad.

Abstrac - In the last few years, wireless networks have evolved in their development in order to support new services and optimize the performance of traditional services for final-users. Under this context, one of the new topics with major scientific interest is the communication in vehicular *ad hoc* networks (VANET), which refers to vehicles interconnection among them and between fixed infrastructures. VANET present special features in aspects like throughput, reliability, nodes' speed and bandwidth in comparison to other wireless networks. As a result, mobility models have emerged to quantify node's movement and studies are necessary to analyze how mobility models can affect a communication in a VANET.

Key Words --- mobility model, Simulation, V2V, VANET, speed.

I. INTRODUCCIÓN

Con la masificación de las tecnologías de la información y las comunicaciones, las redes vehiculares *ad hoc* (VANET) han venido ganando popularidad al momento de interconectar vehículos en movimiento. Una VANET se define como un conjunto de vehículos e infoestaciones interconectados inalámbricamente y espontáneamente con el fin de mejorar la experiencia de los usuarios al conducir, aumentar la seguridad en las vías e incrementar la conectividad de los conductores [1,2].

Con el fin de afrontar las características especiales de las redes VANET, han surgido investigaciones que buscan modelar ambientes vehiculares para facilitar la simulación de los mismos. Como resultado se han desarrollado modelos de movilidad adaptados a dichos ambientes, los cuales tratan de predecir el comportamiento de los nodos en las carreteras

¹ Producto derivado del proyecto de Investigación “Impacto de la Velocidad y Modelo de Movilidad en una Comunicación de Datos de Una Red Vehicular”, apoyado por la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca a través del grupo de investigación de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT).

O. A. Orozco es Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, actualmente se desempeña como joven investigador en la Universidad ICESI, calle 18 # 122-135, Cali-Colombia. Teléfono: 572-5552334. (e-mail: oorozco@icesi.edu.co).

D. F. Chavarro es Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, calle 5 # 4-70, Popayán-Colombia. Teléfono: 572-8235809. (e-mail: danielchavarro@unicauca.edu.co).

O. J. Calderón es Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca con Especialización en Redes y Servicios Telemáticos de la misma universidad, actualmente se desempeña como decano de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, calle 5 # 4-70, Popayán-Colombia. (e-mail: oscald77@gmail.com).

con el fin de aumentar el realismo de las simulaciones computacionales y cuantificar mejor los resultados que se obtengan [3].

Con la aparición de los modelos de movilidad surgieron diversas investigaciones en redes VANET. En [4] se analiza de manera general el rendimiento del protocolo IEEE 802.11p junto con la tecnología DSRC; los autores en [5] y [6] se centran en estudios acerca del rendimiento de protocolos de enrutamiento y en [7] se presenta un análisis del *throughput*, paquetes perdidos y colisiones de tráfico TCP pero sin tener en cuenta el impacto que pueda llegar a tener la velocidad y el modelo de movilidad de los nodos.

El objetivo de este artículo es el de analizar el impacto que pueda llegar a tener la velocidad y el modelo de movilidad en una comunicación de datos de una red vehicular, para esto se formula la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el impacto de la velocidad y del modelo de movilidad en una comunicación de datos de una red vehicular? Este documento se divide en las siguientes secciones: en la Sección II se presentan conceptos teóricos acerca de redes VANET y modelos de movilidad, en la Sección III se presentan los simuladores, escenarios y casos establecidos a simular, en la Sección IV se describen los resultados con su respectivo análisis y en la sección V se detallan las conclusiones.

II. BASE TEÓRICA

Las VANET se forman mediante la interconexión de vehículos en movimiento y/o infoestaciones. Se presenta a continuación una descripción de sus componentes y escenarios de comunicación.

A. Componentes

Una red VANET está compuesta por dispositivos que poseen características que definen su funcionalidad e interacción en la red. En términos generales, una red vehicular *ad hoc* está conformada por dos tipos de dispositivos: **nodo** (vehículo) y **Road-Side Unit** (RSU).

Los **nodos** son vehículos que circulan por las carreteras, dentro de éstos se encuentran los componentes que hacen posible la comunicación: OBU (*On Board Unit*) y AU (*Application Unit*) [1,8-10].

Las **RSU** son entidades encargadas de gestionar las conexiones entre los nodos para establecer comunicaciones bidireccionales entre ellos. También actúan como pasarela o *gateway* para proveer acceso a internet a los vehículos.

B. Escenarios de Comunicación

En las redes vehiculares, un escenario de comunicación es una clasificación dada a las distintas maneras en que los nodos pueden comunicarse. Un aspecto clave de dicha comunicación en las redes VANET es la conexión entre OBU y RSU, o entre OBU de diferentes vehículos. La ITU utiliza la letra V de vehículo para referirse a sus escenarios; mientras que la ETSI utiliza en su notación la letra C de carro.

Se han planteado diversos escenarios para establecer comunicaciones en una red vehicular, los cuales se describen a continuación [1,11-14]

- Vehículo a Vehículo (V2V: *Vehicle to Vehicle*): se refiere a la comunicación directa o basada en multi-saltos entre vehículos en una red VANET.
- Vehículo a Infraestructura (V2I: *Vehicle to Infrastructure*): el escenario de comunicación V2I hace referencia a la conexión existente entre los vehículos y la infraestructura a lo largo de la carretera.
- Vehículo a Peatón (V2P: *Vehicle to Pedestrian*): hace referencia a la comunicación entre los nodos de una red VANET y los peatones que circulan por las calles.
- Directo en el Vehículo (DIV: *Direct in Vehicle*): la comunicación DIV es poco referenciada por la literatura y se da cuando dos o más AU *en el mismo vehículo* intercambian información entre ellas.
- Vehículo a Hogar (V2H: *Vehicle to Home*): escenario propuesto por la ITU para la convergencia de Redes de Nueva Generación con redes VANET. Hace referencia a la comunicación entre un nodo de una red vehicular con un nodo de una red fija en el hogar a través de una infraestructura de red NGN.

Teniendo en cuenta los componentes y escenarios de comunicación en las redes vehiculares, es necesario destacar las variables que puedan afectar el movimiento de los vehículos en las carreteras. Por esta razón, los modelos de movilidad surgen como estrategia para cuantificar los aspectos más relevantes relacionados con la movilidad de los nodos en las VANET.

Específicamente, los modelos de movilidad hacen referencia al patrón de movimiento de los nodos en una red *ad hoc* y determinan la ubicación de éstos en la topología en un instante de simulación dado. Además describen el cambio de posición, velocidad y aceleración de los nodos en el tiempo [15-17].

Los modelos de movilidad en redes vehiculares se clasifican de acuerdo a las características con las que describen el patrón de movimiento de los nodos. Específicamente, hay cuatro clasificaciones para los modelos de movilidad: *Modelos Aleatorios*, *Modelos de Tráfico*, *Modelos de Comportamiento* y *Modelos de Flujo*.

De estas clasificaciones se destacan los modelos de flujo, los cuales consideran numerosas características de las redes vehiculares y clasifican el nivel de detalle de las variables a tener en cuenta. Por ende, en esta clasificación recae la taxonomía más mencionada en la literatura: *Modelos de movilidad macroscópicos*, *microscópicos* y *mesoscópicos*.

Estos modelos se diferencian por su nivel de detalle al momento de caracterizar redes vehiculares de la siguiente manera: los modelos macroscópicos se basan en las características externas al nodo (tamaño de calles, obstáculos, intersecciones, cruces, paradas, semáforos, etc.), además de

analizar la densidad y el flujo de tráfico como un conjunto. Los modelos microscópicos se centran en lo que concierne al vehículo en sí (velocidad individual, aceleración, criterios de adelanto, estilo particular de conducción, etc.) y los modelos mesoscópicos buscan un equilibrio entre características macroscópicas y microscópicas.

Por otra parte, la simulación en redes VANET es el método preferido para comprobar resultados de análisis debido a limitaciones económicas y físicas. Los tipos de simuladores existentes para redes VANET son: *Simuladores de tráfico vehicular*, *Simuladores de Red*, *Simuladores Híbridos* y *Simuladores VANET*. Una descripción más detallada de estos tipos de simuladores se encuentra en [18, 19]. La Tabla I es el resultado de un análisis cualitativo (realizado en el desarrollo de este proyecto de investigación) de las herramientas

software más importante para redes VANET, en donde las seleccionadas para el desarrollo de las simulaciones fueron: **SUMO** y **MOVE** como simuladores de tráfico; **OMNeT++** como simulador de red y **VeINS** como simulador híbrido. Se presenta a continuación una descripción de dichos simuladores.

- **SUMO** (*Simulation of Urban MObility*): es un programa diseñado para soportar grandes tamaños de escenarios de red. Altamente portable y *open source*, incluye diferentes tipos de vehículos, Interfaz Gráfica de Usuario (GUI: *Graphical User Interface*), manejo de jerarquías en los mapas, posibilidad de importación de mapas, entre otras características. Está centrado en la simulación de modelos de tráfico a nivel microscópico y puede importar varios formatos de red como XML, ArcView, Visum, entre otros [20].

TABLA I. COMPARACIÓN ENTRE AMBIENTES DE SIMULACIÓN PARA REDES VANET

CARACTERÍSTICA	SIMULADORES DE TRÁFICO			SIMULADORES DE RED			SIMULADORES HÍBRIDOS			SIMULADORES VANET	
	SUMO	MOVE	CityMob	NS-2	NS-3	OMNeT	Trans	MobiREAL	VeINS	GrooveNET	NCTUns
Portabilidad	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓	×	×	×	×
Freeware	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Open Source	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	×	×
GUI	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓
Desarrollo Continuo	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	✓	×	✓
Facilidad de Uso	✓	✓	✓	✓	×	×	×	×	✓	×	✓
Mapas Reales	✓	✓	✓	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	✓	✓
Importación de Mapas	✓	✓	✓	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	×	×
Modelos Microscópicos	✓	✓	✓	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	✓	×
Protocolo IEEE 802.11p	N.D	N.D	N.D	✓	✓	✓	×	×	✓	×	✓

- **MOVE** (*MObility model generator for VEhicular networks*): este simulador está construido en el tope de SUMO y genera rápidamente trazas de movilidad para simuladores de red. Presenta una GUI que permite al usuario crear escenarios realistas de simulación sin la complicación de escribir scripts de simulación [21].
- **OMNeT++**: es una herramienta extensible y modular, basada en componentes de la biblioteca de C++. Permite simular redes cableadas, inalámbricas, redes de sensores, redes ópticas, entre otras; además ofrece un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) basado en Eclipse, junto con un entorno de ejecución gráfico y es anfitrión de diversos *frameworks* externos [22].
- **VeINS**: consiste en un marco de simulación compuesto por un simulador de redes basado en eventos (OMNeT++) y un generador de movilidad microscópico (SUMO). Ambos dominios se acoplan bidireccionalmente por medio de un *socket* TCP y trabajan en tiempo real, de manera que la comunicación entre vehículos tiene efectos en la movilidad del tráfico [23].

Los simuladores previamente descritos se eligieron porque cumplen con los requerimientos descritos a continuación, en donde se asegura confiabilidad en las simulaciones realizadas.

- **Áreas de trabajo reales**: el área deseada de simulación debe ser real, por lo que el simulador debe permitir la importación de mapas realistas de diversas fuentes.
- **Diversos tipos de vehículos**: para brindar un nivel de detalle mayor, la simulación de tráfico vehicular debe soportar diferentes tipos de vehículos. Lo ideal es que soporte desde vehículos particulares hasta buses y camiones.
- **Soporte para varios modelos de movilidad**: como este trabajo de grado busca cuantificar el impacto de la variación del modelo de movilidad en una comunicación de datos de una VANET, es primordial que las herramientas elegidas soporten más de un modelo de movilidad.
- **Velocidad variable**: la velocidad de los nodos debe ser variable en el tiempo para aumentar el realismo de la simulación. Además debe ser dependiente del tipo de vehículo.
- **Manejo de características de movilidad vehicular**: la simulación debe implementar cruces, intersecciones y semáforos presentes en el área deseada.
- **Soporte del estándar IEEE 802.11p**: es importante que se tenga soporte para el protocolo IEEE 802.11p, con el fin de establecer comunicaciones V2V.

III. ESCENARIOS Y CASOS A SIMULAR

C. Definición de escenarios y casos de simulación

Para la definición de los escenarios, sus respectivos casos y las variables a modificar se tuvo en cuenta la pregunta de investigación que busca responder este artículo; por lo tanto la caracterización de escenarios parte del número de usuarios, para seguir con la variación de la velocidad y, por último, la variación del modelo de movilidad. El mapa conceptual de este proceso se muestra en la Figura 1.

Para cada escenario y caso se analizó el comportamiento de tres modelos de movilidad.

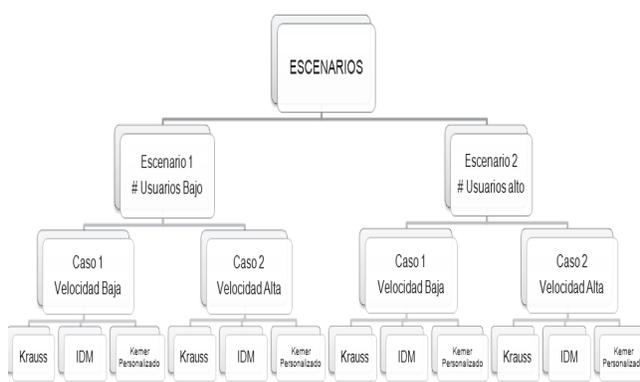


Fig. 1. Escenarios y casos a simular

1) Escenario 1: número de usuarios bajo

Para este escenario, el número total de autos que circulan a través del mapa durante el tiempo de simulación es de 51 vehículos.

2) Escenario 2: número de usuarios alto

Para este escenario, la cantidad de nodos presentes en la simulación aumenta a 172 vehículos.

Para los dos escenarios, el número de vehículos se estableció en 51 y 172, puesto que se realizó una inspección al lugar que se tuvo en cuenta para el desarrollo de la simulación, para observar el flujo vehicular; tanto en horas valle (o de poca afluencia de autos) como en horas pico (cuando el flujo de vehículos aumenta considerablemente). Lo anterior siempre tomando en cuenta el tiempo de simulación descrito más adelante (600 segundos o 5 minutos).

a) Caso 1: velocidad baja

Para este caso se maneja una velocidad máxima alcanzable por los nodos de 8.5 m/s, lo que equivale a 30.6 km/h. Esta velocidad está basada en estudios realizados por la Secretaría de Tránsito Municipal de la ciudad de Popayán (ciudad donde se realizó la simulación de escenarios), donde se afirma que la velocidad mínima promedio de los vehículos que circulan por la zona en estudio es de 30 km/h [24].

b) Caso 2: velocidad baja

Para el caso de velocidad alta, se consideró una velocidad

máxima de 17 m/s (61.2 km/h) alcanzable por los nodos en el área de simulación. Al igual que el caso 1, este valor de velocidad está basado en los estudios descritos en [24].

El área de estudio elegida para realizar las simulaciones de escenarios y casos fue la glorieta de Santa Clara, sector de la ciudad de Popayán, Colombia. La Figura 2 muestra este sector de la ciudad.



Fig. 2. Área de simulación en Google Earth®

Los parámetros técnicos que comparten los escenarios y casos simulados se muestran en la Tabla 2. Aquí es necesario destacar que la tasa de bits, modulación y codificación se eligieron basados en [25].

TABLA II. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS ESCENARIOS Y CASOS

Frecuencia	5.89 GHz
Potencia de transmisión	20 mW (13 dBm)
Sensibilidad de receptores	- 89 dBm
Umbral de ruido térmico	-110 dBm
Relación señal a ruido	10 dB
Tasa de bits	6 Mbps
Modulación	QPSK
Tasa de codificación	1/2
Escenario de comunicación	V2V
Estándar	IEEE 802.11p
Protocolo de transporte	WSMP
Aplicaciones simuladas	Alarmas por accidentes de tránsito y control de flujo de tráfico
Tiempo de simulación	600 s

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para el análisis de resultados se tomaron como base los datos obtenidos desde el simulador OMNeT++ relacionado con pérdida de paquetes, velocidad, aceleración y otros parámetros de cada escenario, caso y modelo de movilidad utilizado. A continuación se muestran dichos resultados para cada escenario establecido.

1) Impacto del modelo de movilidad

a) Escenario 1, Caso 1, Modelo de Krauß-IDM-Kerner Personalizado

Se escogieron 5 nodos al azar para determinar cuál de los 3 modelos escogidos presenta un mejor desempeño. Con el fin de identificar el modelo de movilidad con mejores resultados se hace uso de la Tasa de Error de Paquete o PER, la cual relaciona los paquetes errados o perdidos con el total de paquetes procesados por el nodo así:

$$PER = \frac{\text{Paquetes Errados}}{\text{Total de Paquetes procesados}} \quad (1)$$

La Tabla 3 muestra los diversos valores de PER para cada nodo y modelo de movilidad.

TABLA III. VALORES DE PER POR NODO, ESCENARIO 1 CASO 1

NODO	MODELO DE MOVILIDAD	PER
3	KRAUß	0.441
	IDM	0.529
	KERNER PERSONALIZADO	0.559
6	KRAUß	0.428
	IDM	0.514
	KERNER PERSONALIZADO	0.543
14	KRAUß	0.300
	IDM	0.486
	KERNER PERSONALIZADO	0.500
17	KRAUß	0.459
	IDM	0.469
	KERNER PERSONALIZADO	0.567
26	KRAUß	0.167
	IDM	0.621
	KERNER PERSONALIZADO	0.600

Los datos en la Tabla 3 permiten deducir que el modelo de Krauß es el que mejor resultado presenta cuando el número de usuarios como la velocidad de los nodos es baja.

b) Escenario 1, Caso 2, Modelo de Krauß-IDM-Kerner Personalizado

Este caso se diferencia del anterior al introducir un aumento en la velocidad de los nodos. Se analizaron la cantidad de paquetes perdidos y recibidos por nodo para cada modelo de movilidad en estudio. La Tabla 4 muestra los valores de PER para este caso.

TABLA IV. VALORES DE PER POR NODO, ESCENARIO 1 CASO 2

NODO	MODELO DE MOVILIDAD	PER
3	KRAUß	0.485
	IDM	0.552
	KERNER PERSONALIZADO	0.529
6	KRAUß	0.470
	IDM	0.486
	KERNER PERSONALIZADO	0.543
14	KRAUß	0.324
	IDM	0.513
	KERNER PERSONALIZADO	0.454
17	KRAUß	0.432
	IDM	0.454
	KERNER PERSONALIZADO	0.567
26	KRAUß	0.529
	IDM	0.700
	KERNER PERSONALIZADO	0.700

Los datos en la Tabla 4 muestran que el modelo de Krauß sigue siendo el que presenta mejor desempeño. Asimismo, comparando los valores de PER para el caso 1 y el caso 2, puede verse que el aumento de la velocidad produce un aumento en el valor de PER para los modelos de movilidad de Krauß e IDM. Por el contrario, el modelo de Kerner personalizado tiende a ser menos inmune a los cambios de velocidad de los nodos (el valor de PER se mantiene estable para los nodos 6 y 17 y disminuye para los nodos 3 y 14).

c) Escenario 2, Caso 1, Modelo de Krauß-IDM-Kerner Personalizado

Dado que en el escenario 2 se tiene un mayor número de nodos (172 en total), el identificador de los nodos en estudio varía en relación al escenario 1. La equivalencia entre nodos para este segundo escenario es:

$$\begin{aligned} \text{Nodo 3} &\Leftrightarrow \text{Nodo 30} & \text{Nodo 14} &\Leftrightarrow \text{Nodo 15} \\ \text{Nodo 6} &\Leftrightarrow \text{Nodo 17} & \text{Nodo 17} &\Leftrightarrow \text{Nodo 3} \\ \text{Nodo 26} &\Leftrightarrow \text{Nodo 41} \end{aligned}$$

Con los datos paquetes perdidos y recibidos se obtiene el valor de PER para cada nodo y modelo de movilidad. La Tabla 5 muestra dichos resultados.

TABLA V. VALORES DE PER POR NODO, ESCENARIO 2 CASO 1

NODO	MODELO DE MOVILIDAD	PER
30	KRAUß	0.241
	IDM	0.363
	KERNER PERSONALIZADO	0.618
17	KRAUß	0.500
	IDM	0.649
	KERNER PERSONALIZADO	0.654
15	KRAUß	0.377
	IDM	0.578
	KERNER PERSONALIZADO	0.495
3	KRAUß	0.421
	IDM	0.532
	KERNER PERSONALIZADO	0.506
41	KRAUß	0.322
	IDM	0.730
	KERNER PERSONALIZADO	0.609

Comparando los resultados de PER obtenidos en la Tabla 3 y en la Tabla 5 puede evidenciarse que el aumento en el número de usuarios incrementa el valor de PER para tres de cinco nodos que siguen el modelo de Krauß, aunque este modelo sigue siendo el de mejor desempeño en relación a los otros dos modelos. Para los modelos de Kerner Personalizado e IDM también se cumple que el aumento en el número de usuarios eleva el valor de PER, afectando el desempeño de los nodos que siguen dichos modelos.

d) Escenario 2, Caso 2, Modelo de Krauß-IDM-Kerner Personalizado

Los valores de PER, número de paquetes perdidos y procesados para este caso se muestran en la Tabla 6.

TABLA VI. VALORES DE PER POR NODO, ESCENARIO 2 CASO 2

NODO	MODELO DE MOVILIDAD	PER
30	KRAUß 0	.550
	IDM	0.364
	KERNER PERSONALIZADO	0.588
17	KRAUß 0	.560
	IDM	0.518
	KERNER PERSONALIZADO	0.618
15	KRAUß	0.385
	IDM	0.508
	KERNER PERSONALIZADO	0.428
3	KRAUß 0	.435
	IDM	0.421
	KERNER PERSONALIZADO	0.507
41	KRAUß 0	.387
	IDM	0.276
	KERNER PERSONALIZADO	0.474

Analizando los resultados de la Tabla 6, se observa que el modelo de mejor desempeño es ahora el modelo IDM, ya que en 4 de 5 nodos presenta el menor valor de PER. Además teniendo en cuenta la variación en el número de usuarios y comparando los datos de la Tabla 6 con los datos de la Tabla 5 se observa que el valor de PER para el modelo de Krauß aumenta para tres de cinco nodos, lo que incide negativamente en el desempeño de dicho modelo cuando se presenta un elevado número de usuarios con velocidades altas. Los resultados analizados anteriormente están basados en nodos elegidos al azar con el fin de cuantificar el impacto del modelo de movilidad en una comunicación de datos de una VANET. Sin embargo, para un análisis más general se tomó en cuenta el número total de nodos que circularon por el área seleccionada para simulación. Se prestó atención especial a los paquetes recibidos y perdidos para obtener una comparación global entre todos los modelos de movilidad (Figura 3) por medio de la PER (Tabla 7).

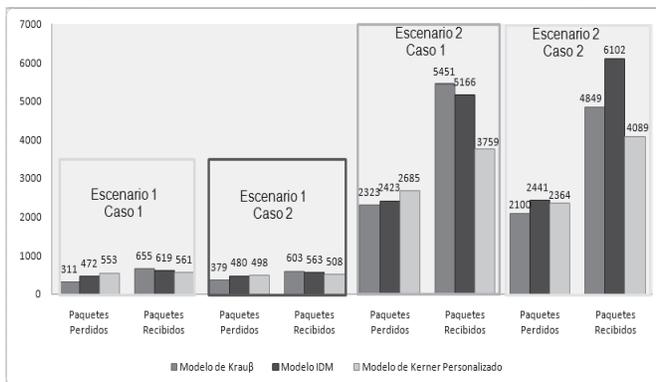


Fig.3. Paquetes recibidos y perdidos por modelo de movilidad en cada escenario y caso

TABLA VII. VALORES DE PER PARA LOS ESCENARIOS Y CASOS SIMULADOS

ESCENARIO Y CASO	MODELOS DE MOVILIDAD	PER
ESCENARIO 1 CASO 1	KRAUß	0.322
	IDM	0.433
	KERNER	0.496
	PERSONALIZADO	0.496
ESCENARIO 1 CASO 2	KRAUß	0.386
	IDM	0.460
	KERNER	0.495
	PERSONALIZADO	0.495
ESCENARIO 2 CASO 1	KRAUß	0.299
	IDM	0.319
	KERNER	0.417
	PERSONALIZADO	0.417
ESCENARIO 2 CASO 2	KRAUß	0.302
	IDM	0.285
	KERNER	0.366
	PERSONALIZADO	0.366

Los datos presentados en la Figura 3 y en la Tabla 7 evidencian que el número de paquetes perdidos y recibidos aumenta considerablemente cuando el número de usuarios en la red VANET aumenta. También se observa que el modelo de Krauß es el que presenta mejor desempeño en tres de los cuatro casos de estudio y el modelo IDM presenta mejores resultados para el caso restante, cumpliéndose así el análisis realizado con nodos específicos.

Puede verse que el modelo de Kerner Personalizado sigue cumpliendo la característica de mayor inmunidad ante

el aumento de la velocidad de los nodos; esto también se ve en el número de paquetes perdidos, ya que disminuyen cuando la velocidad de los nodos es alta (aunque el modelo de Kerner sigue siendo el de peores resultados generales).

2) Impacto de la velocidad

Se presenta el análisis del impacto que tiene la velocidad en una comunicación de datos de una red vehicular. Para esto se estudió el tiempo exacto en el cual los nodos procesan paquetes y qué velocidad llevaban en dicho instante.

e) Escenario 1, Caso 1, Modelo de Krauß:

La Tabla 8 muestra los instantes exactos en que los nodos procesan paquetes de datos, así como la velocidad instantánea que llevan en ese momento.

TABLA VIII. PAQUETES RECIBIDOS Y PERDIDOS POR INSTANTE, ESCENARIO 1 CASO 1

NODO	PAQUETES RECIBIDOS	PAQUETES PERDIDOS	INSTANTE DE TIEMPO ANALIZADO (s)	VELOCIDAD INSTANTÁNEA (m/s)
3	9	12	21.2	8.5
	10	2	62.8	8.5
6	10	12	21.2	8.5
	10	3	62.8	0.0
14	9	6	21.2	6.8
	10	3	62.8	8.5
	1	0	107.7	0.0
	1	0	135.5	8.5
17	8	14	21.2	3.6
	10	3	62.8	0.0
	1	0	107.7	0.0
26	1	0	135.5	8.5
	10	2	62.8	8.5

De los datos presentados en la Tabla 8 puede comprobarse que, para el instante de 21.2 segundos es cuando se presentan mayores pérdidas de paquetes en cuatro de los cinco nodos en estudio, esto debido a que los nodos presentan una alta velocidad y se encuentran separados una distancia considerable, por lo que los paquetes transmitidos realizan mayores saltos entre vehículos. Además, es necesario destacar que en la primera transmisión de datos los nodos envían un mayor número de paquetes en relación a los demás instantes de tiempo analizados, dado que están enviando paquetes de reconocimiento de los vehículos presentes en la VANET en dicho instante. Por otra parte, cuando la velocidad instantánea es la máxima permitida por el escenario y el caso, se presentan mayores pérdidas, como se observa para los nodos 3, 6 y 26.

e) Escenario 1, Caso 2, Modelo de Krauß:

Para el escenario 1, caso 2 el modelo de Krauß fue el que presentó mejores resultados. En la Tabla 9 se observa la velocidad que alcanzan los nodos y el tiempo exactos de los paquetes perdidos y recibidos.

TABLA IX. PAQUETES RECIBIDOS Y PERDIDOS POR INSTANTE, ESCENARIO 1 CASO 2

NODO	PAQUETES RECIBIDOS	PAQUETES PERDIDOS	INSTANTE DE TIEMPO ANALIZADO (s)	VELOCIDAD INSTANTÁNEA (m/s)
3	9	16	26.0	2.5
	8	0	51.5	10.5
6	10	16	26.0	2.5
	8	0	51.5	0.0
14	10	12	26.0	10.0
	8	0	51.5	7.5
	2	0	116.3	5.7
	1	0	135.5	0.0
	4	0	232.4	11.3
17	10	16	26.0	2.5
	8	0	51.5	0.9
	2	0	116.3	0.0
	1	0	135.5	12.0
26	8	16	26.0	2.5
	8	0	51.5	4.2

Por los datos presentados en la Tabla 9 puede concluirse que, 26 segundos después de iniciarse la simulación se presenta el peor desempeño de los nodos en estudio. Esto se debe principalmente a que cuatro de los cinco nodos se encuentran cerca de la glorieta y se presenta elevada ocupación del canal

Una característica en particular de este caso es que sólo se presentan pérdidas en el primer instante de transmisión y recepción de paquetes. Esto se debe principalmente a que los nodos 3, 6 y 26 abandonan el área seleccionada para simulación más rápido en relación al escenario 1, caso 1; mientras que los nodos 14 y 17 permanecen en dicha área más tiempo pero circulan a bajas velocidades en tres de cuatro instantes de análisis, influyendo así en que no haya pérdidas de paquetes.

e) *Escenario 2, Caso 1, Modelo de Krauß:*

Para el escenario 2, caso 1, se tiene un mayor número de usuarios a una velocidad máxima de 8.5 m/s. La Tabla 10 muestra los datos de paquetes recibidos, perdidos, instantes donde se pierden y velocidad instantánea de los nodos.

TABLA X. PAQUETES RECIBIDOS Y PERDIDOS POR INSTANTE, ESCENARIO 2 CASO 1.

NODO	PAQUETES RECIBIDOS	PAQUETES PERDIDOS	INSTANTE DE TIEMPO ANALIZADO (s)	VELOCIDAD INSTANTÁNEA (m/s)
3	8	21	26.9	0.0
	14	7	60.9	0.0
	9	2	107.6	0.0
	6	2	145.9	8.5
	7	0	172.9	8.5
15	9	15	26.9	8.5
	10	11	60.9	8.5
	9	2	107.6	0.0
	6	2	145.9	0.0
	8	1	172.9	0.0
	9	6	226.4	7.2
	6	0	244.6	8.5
4	0	275.3	8.5	
17	7	22	26.9	7.5
	14	7	60.9	5.0
	8	0	107.6	8.5
30	13	7	60.9	8.5
	9	0	107.6	8.5
41	12	8	60.9	4.3
	9	2	107.6	0.3

De los resultados en la Tabla 9 se observa que, para el instante de 26.9 segundos el nodo 15 y el nodo 17 presentan las mayores pérdidas debido a la velocidad máxima que llevan; mientras que el nodo 3 se encuentra en la glorieta, lugar donde se presenta un mayor tiempo de ocupación del canal, por esto se presentan las pérdidas para el nodo 3 en dicho instante.

Para 60.9 segundos se tiene que el nodo 3 presenta velocidad cero, pero menos paquetes perdidos en relación al instante de 26.9 segundos. Esto se debe a que aún se encuentra en la glorieta pero los saltos que dan los paquetes entre vehículo y vehículo son más pequeños (debido al mayor número de nodos presentes), facilitando así la recepción de los mismos. Por otro lado los nodos restantes presentan altas velocidades, lo que influye en las pérdidas de paquetes; además de que el nodo 17 y el nodo 30 se acercan a la glorieta donde se presentan pérdidas por uso elevado del canal.

f) *Escenario 2, Caso 2, Modelo IDM:*

Para el último escenario y el último caso el modelo con mejor desempeño fue el IDM. En la Tabla 11 se muestra el resumen de paquetes recibidos y perdidos, el tiempo exacto donde se perdieron y la velocidad instantánea.

Para este último caso se tienen pérdidas en cuatro nodos en 19.4 segundos, los cuales transitan a una velocidad alta en dicho instante de tiempo, lo que incide en la cantidad de paquetes perdidos, además el número de paquetes perdidos es mayor en comparación a los datos de los anteriores casos dado que en este, los nodos circulan a una velocidad máxima más alta y el número de usuarios es alto. Por otra parte, para el instante de 47.6 segundos cuatro de los cinco nodos en estudio presentan velocidad cero y paquetes perdidos (aunque en menor cantidad que en el primer instante de tiempo), esto se debe al elevado tiempo de ocupación del canal por parte de los nodos presentes en la red VANET. El nodo 30 en éste instante de tiempo presenta una velocidad alta, lo que incide en el número de paquetes perdidos que presenta.

TABLA XI PAQUETES RECIBIDOS Y PERDIDOS POR INSTANTE, ESCENARIO 2 CASO 2.

NODO	PAQUETES RECIBIDOS	PAQUETES PERDIDOS	INSTANTE DE TIEMPO ANALIZADO (s)	VELOCIDAD INSTANTÁNEA (m/s)
3	8	23	19.4	6.7
	12	6	47.6	0.0
	5	0	75.2	1.0
	5	2	106.5	0.0
	7	1	138.9	0.0
	7	0	168.6	17
15	6	25	19.4	13.9
	12	6	47.6	0.0
	5	0	75.2	0.0
	6	0	106.5	16.1
17	8	23	19.4	6.7
	13	5	47.6	0.0
	5	0	75.2	1.1
	7	11	19.4	13.0
30	12	6	47.6	14.2
	5	0	75.2	0.0
	5	2	106.5	0.0
	7	1	138.9	0.0
	7	0	168.6	0.0
	2	0	193.3	0.0
	5	10	214.5	2.2
	6	2	244.5	14.5
	11	6	47.6	0.0
41	5	0	75.2	0.0
	5	2	106.5	13.5

Posteriormente en el instante de 75.2 segundos se tiene que ningún nodo presenta pérdidas de paquetes, esto se debe principalmente al bajo número de paquetes recibidos por nodo (5) y a la velocidad casi nula de éstos. Por ende, mientras los nodos circulen con bajas velocidades o permanezcan con velocidad nula presentan menores pérdidas de paquetes.

En resumen, la velocidad de los nodos, el tiempo de ocupación del canal y los nodos presentes afectan el desempeño de una comunicación de datos en una VANET.

V. CONCLUSIONES

Se ha estudiado el impacto de la velocidad y del modelo de movilidad en una comunicación de datos de una red vehicular, se observó que velocidades altas de los nodos afectan directamente en el desempeño de la red VANET al producir un aumento en el valor de PER; también, a nivel general un mayor número de usuarios en la red vehicular influye directamente en el aumento de paquetes perdidos y recibidos.

Además de los resultados presentados se dedujo que las variables que afectan las comunicaciones de datos en redes VANET son: el número de usuarios, la trayectoria y velocidad de éstos, el modelo de movilidad que gobierne a los vehículos, el tiempo de ocupación del canal radio y la distancia entre nodos.

REFERENCIAS

- [1] S. Senouci, H. Moustafa y M. Jerbi, *Vehicular Networks: Techniques, Standards and Applications*, 1a ed. Boston, Massachusetts, USA: Auerbach Publications, 2009. Cap. 1.
- [2] I. Leontiadis y C. Mascolo, "GeOpps: Geographical Opportunistic Routing for Vehicular Networks," en *IEEE Internat. Sympos. on World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, Helsinki: Finlandia, ACM 2007: pp. 1-6.
- [3] A. Mahajan et al., "Evaluation of Mobility Models for Vehicular Ad-

- hoc Network Simulations*," Reporte Técnico N.051220, Universidad del Estado de Florida, USA, 2005.
- [4] A. Cabrera y E. Casilari, "Acceso a Internet desde los Vehículos," Departamento de Tecnología Electrónica, Universidad de Málaga, España, 2008.
 - [5] R. Baumann, "Vehicular Ad hoc Networks (VANET): Engineering and simulation of mobile ad hoc routing protocols for VANET on highways and in cities" Tesis de Maestría, Instituto Suizo Federal de Tecnología, Zurich, Suiza, 2004
 - [6] Y. Chen et al., "Network Mobility Protocol for Vehicular Ad Hoc Networks," en *Wirel. Commun. and Networking Conference*, Budapest: Hungría: ACM: 2009, pp. 1-6.
 - [7] A. Pachón, C. Nieto y M. Velasco, "Modelos de comportamiento de las redes vehiculares en sus escenarios más representativos, utilizando simulación en la herramienta NCTUns," *Sistemas y Telemática: Revista de la Facultad de Ingeniería, Universidad ICESI*, vol. 8, no 15, Ene. 2010, pp. 13-25.
 - [8] V. Sardeshmukh, "Vehicular Ad Hoc Networks," en *Class Conference in School of Information Technology*, Kharagpur: India, 2010.
 - [9] M. Gerla, L. Kleinrock, Vehicular networks and the future of the mobile internet, *Comput. Netw.* (2011), doi:10.1016/j.comnet.2010.10.015.
 - [10] R. Baldessari et al., "Flexible Connectivity Management in Vehicular Communication Networks," en *Proc. of International Workshop on Intelligent Transportation*, Hamburgo, Alemania, Marzo 2006.
 - [11] T. Strang y M. Rockl, *Vehicle Networks-V2X communication protocols*, Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, Colonia, Alemania, 2008.
 - [12] H. Moustafa y Y. Zhang, *Vehicular Networks: Techniques, Standards and Applications*, 2a ed. Boston, Massachusetts: USA, Auerbach Publications, 2011.
 - [13] International Telecommunication Union, ITU-T, Recommendation ITU-T Y.2281: Framework of networked vehicle services and applications using NGN, Enero 2011.
 - [14] Car 2 Car Communication Consortium, Organisation. [Online]. Disponible: <http://www.car-to-car.org/index.php?id=22> [Consultado: 20 Sep 2012].
 - [15] A. Mahajan et al., "Urban Mobility Models for VANETs," en *Proc. of 2nd Workshop on Next Generation Wireless Networks*, Bangalore, India, Diciembre 2006.
 - [16] L. Khan, N. Ayub y A. Saeed, "Anycast Based Routing in Vehicular Adhoc Networks (VANETS) using Vanetmobisim," *World Applied Sciences Journal 7 (11)*, ISSN 1818-4952, IDOSI Publications, 2009, pp. 1341-1352.
 - [17] J. Harri, et al., "Vehicular mobility simulation with vanet-mobisim," *Transactions of The Society for Modeling and Simulation*, Septiembre 2009.
 - [18] O. Orozco y G. Llano, "Aplicaciones para redes VANET enfocadas en la Sostenibilidad Ambiental, una Revisión Sistemática," *Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Universidad Militar Nueva Granada*, vol. 24, no.2, Julio-Diciembre 2014, pp. 1-24.
 - [19] O. Orozco y G. Llano, "OSA: A VANET Application Focused in Energy Efficiency," *7th IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, Bogotá: Colombia, Universidad de los Andes. Junio de 2014 (Proceedings).
 - [20] M. Behrisch, L. Bieker, J. Erdmann y D. Krajzewicz. *SUMO - Simulation of Urban MObility: An Overview* In: SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation, 2011.
 - [21] Rapid Generation of Realistic Simulation for VANET, Chien-Ming Chou. [Online]. Disponible: http://lens.csie.ncku.edu.tw/Joomla_version/index.php/research-projects/past/18-rapid-vanet. [Consultado: 4 Mar 2014].
 - [22] OMNeT++ Network Simulation Framework. [Online]. Disponible: <http://www.omnetpp.org/>. [Consultado: 12 Nov 2014].
 - [23] Veins - Vehicles in Network Simulation, C. Sommer. [Online]. Disponible: <http://veins.car2x.org/>. [Consultado: 12 Nov 2014].
 - [24] Miguel Hernán Muñoz Salamanca, Respuesta a Derecho de Petición, Secretaría de Tránsito Municipal, Popayán, Cauca, Abril de 2013.
 - [25] A. Caicedo y J. Martínez, "Evaluación del Desempeño de Redes 802.11p/WAVE en la Transmisión de Datos, Voz y Video IP," Tesis de

Pregrado, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia, Diciembre 2011.

Oscar A. Orozco nació en Popayán, Cauca, Colombia en 1989. Recibió el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca. en 2013.



Ha trabajado como joven investigador de Colciencias en proyectos de investigación relacionados con redes vehiculares *ad hoc* (VANET) y su enfoque ambiental. Asociado al grupo de Investigación en Informática y Telecomunicaciones (i2T) de la Universidad Icesi, en Cali Colombia. Sus áreas de interés incluyen las redes inalámbricas, cableadas y demás, redes vehiculares *ad hoc*, comunicaciones móviles e ingeniería de tráfico y redes.

El Ing. Orozco ha presentado diversos artículos científicos relacionados con redes VANET en distintas revistas indexadas por Colciencias, además de una ponencia en el evento *IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)* en Junio de 2014.

Daniel F. Chavarro nació en Popayán, Cauca, Colombia en 1990. Recibió el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca en 2013.



Asociado al Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT) de la Universidad del Cauca. Sus áreas de interés incluyen redes VANET, redes de sensores inalámbricos, calidad de servicio en redes de telecomunicaciones y redes de 3ª y 4ª generación.

Oscar J. Calderón nació en Suaza, Huila, Colombia en 1969. Recibió el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca en 1996. Es Especialista en Redes y Servicios Telemáticos de la misma Universidad y recibió Diploma de Estudios Avanzados de la Universidad Politécnica de Cataluña, España en 2004.



Miembro activo del Grupo de Nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones (GNTT) de la Universidad del Cauca, actualmente se desempeña como Decano de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la misma Universidad. Ha presentado más de 20 asistencias a seminarios y eventos científicos, dirigido más de 30 trabajos de grado en la Universidad del Cauca y ha estado afiliado a diversos proyectos con Colciencias y su programa de jóvenes investigadores. Sus áreas de interés incluyen la Calidad de Servicio en Internet, Protocolos de Enrutamiento, Ingeniería de Tráfico, Redes Vehiculares y Redes Móviles.

El Ing. Calderón ha dictado varios cursos de pregrado y posgrado en la Universidad, se ha desempeñado como jefe del departamento de Telecomunicaciones, miembro del comité de Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones, del comité de investigaciones de la Facultad de Ingeniería Electrónica y miembro del comité de Acreditación de la misma facultad.