

# Análisis del Rendimiento y Operación de Protocolos de Enrutamiento para Comunicaciones Móviles Vehiculares en Entornos Realistas

Ramón Bauzá, Miguel Sepulcre y Javier Gozávez

Uwicare - Ubiquitous Wireless Communications Research Laboratory

Universidad Miguel Hernández

Avda. de la Universidad s/n, 03202, Elche

[j.gozalvez@umh.es](mailto:j.gozalvez@umh.es), [www.uwicore.umh.es](http://www.uwicore.umh.es)

**Abstract** – Los sistemas de comunicaciones móviles vehiculares se encuentran en pleno desarrollo para la mejora de la seguridad vial y la eficiencia del tráfico. Los requisitos de baja latencia de las aplicaciones vehiculares imponen la necesidad de dimensionar de forma precisa el modo de operación y rendimiento de estos sistemas. Dado el elevado impacto que el modelado de la propagación radio presenta sobre los sistemas de comunicaciones móviles e inalámbricos tradicionales, el presente trabajo investiga su influencia sobre protocolos de enrutamiento *multihop* en entornos vehiculares realistas, analizando la contribución de distintos efectos.

## I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de comunicaciones móviles vehiculares constituyen una prometedora tecnología para la reducción de accidentes y la mejora de la movilidad vial gracias al intercambio en tiempo real de información entre vehículos y entre vehículos y elementos de infraestructura. Con estos sistemas, cada vehículo intercambiará periódicamente información sobre su posición y velocidad con vehículos cercanos, y podrá detectar a tiempo situaciones adversas incluso fuera del campo visual del conductor. Además, la transmisión de información podrá realizarse no solo directamente entre vehículos próximos, sino también entre nodos lejanos empleando mecanismos de enrutamiento *multihop*, que utilizan vehículos intermedios como nodos retransmisores de información. Mediante estos mecanismos, cualquier vehículo podrá ser avisado a varios kilómetros de distancia de una situación adversa que pueda afectar a su seguridad o a la ruta que pretendía utilizar para alcanzar su destino.

Los estudios basados en simulación son extremadamente importantes en el campo de la I+D y en particular, en el estudio de las comunicaciones móviles, pues permiten primeras estimaciones y procesos de optimización de la problemática bajo estudio. Además, el carácter crítico y la dificultad de llevar a cabo pruebas a gran escala confieren más importancia si cabe a este tipo de estudios. Sin embargo, para obtener mediante simulación resultados que se ajusten fielmente a la realidad, deben emplearse modelos de tanta precisión como sea posible, puesto que el uso de modelos simplificados podría no reproducir en el estudio el comportamiento que tendría el sistema en entornos reales, como demuestran diversos trabajos relacionados con las comunicaciones móviles tradicionales y redes *ad hoc* [1][2]. En este contexto, el presente trabajo analiza y cuantifica la influencia que ejerce un modelado del canal radio realista sobre el comportamiento y el rendimiento global de protocolos de enrutamiento en redes de comunicaciones móviles vehiculares. La investigación llevada a cabo no sólo destaca dicho impacto sino también pone en evidencia la importancia de un adecuado modelado del canal radio para una correcta comprensión del rendimiento y funcionamiento de protocolos de enrutamiento *multihop* vehiculares.

## II. MODELADO DEL CANAL RADIO

Un adecuado modelado de la propagación radio ha de considerar principalmente tres efectos: las pérdidas básicas de propagación (*pathloss*), el desvanecimiento (*shadowing*) y la propagación multitrayecto (*multipath fading*). Sin embargo, la mayoría de los trabajos realizados sobre protocolos de enrutamiento en redes vehiculares han sido llevados a cabo considerando modelos de propagación relativamente simplificados [3]. Mientras las pérdidas básicas de propagación representan la relación promedio entre la potencia de la señal recibida y la transmitida en función de la distancia entre el transmisor y el receptor, y se modelan de forma determinista, las pérdidas por desvanecimiento modelan el efecto que introducen los obstáculos en la atenuación media de la señal y son aleatorias. Además se ha demostrado que la propagación multitrayecto (*multipath fading*), resultante de la recepción de múltiples réplicas de la señal transmitida, presenta un impacto significativo en el rendimiento de los sistemas de comunicaciones móviles inalámbricas.

Con el fin de modelar adecuadamente los efectos del canal radio, este trabajo ha considerado el modelo detallado de canal radio para entornos micro-celulares desarrollado en el proyecto WINNER [4]. Aunque este modelo no representa fielmente el entorno vehicular al no contemplar antenas transmisora y receptora reducidas e idénticas, este modelo micro-celular es el que mejor se aproxima actualmente al entorno bajo estudio. Es importante destacar que hasta la fecha no han sido desarrollados o publicados modelos de propagación radio exclusivos para el entorno vehicular. Este modelo considera tanto las pérdidas básicas de propagación, como los efectos de desvanecimiento y multitrayecto, diferenciando las situaciones en las que transmisor y receptor presentan visión directa (LOS, *Line of Sight*) de las que no (NLOS, *Non-Line of Sight*).

Para analizar la influencia de cada uno de los efectos de la propagación sobre el rendimiento de los protocolos de enrutamiento *multihop*, los resultados obtenidos empleando el modelo detallado de canal descrito anteriormente serán

comparados con los obtenidos con dos modelos deterministas, que únicamente consideran las pérdidas por *pathloss*. Por un lado, el modelo de Dos Rayos, empleado por muchos autores como aproximación para el análisis de protocolos de enrutamiento *ad hoc* y por otro, un modelo denominado LOS/NLOS que diferencia las condiciones de visibilidad entre transmisor y receptor para el cálculo de las pérdidas por *pathloss*.

### III. ESCENARIO DE EVALUACIÓN

#### A. Protocolos de comunicación en redes vehiculares

Los sistemas de comunicaciones vehiculares estarán basados en el estándar IEEE802.11p, también denominado WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environments*) [5], para las capas MAC (*Medium Access Control*) y física. WAVE adapta el estándar IEEE802.11a al entorno vehicular haciendo uso de siete canales no solapados de 10MHz en la banda de 5.9GHz. Mientras seis de ellos son canales de servicio empleados para aplicaciones de seguridad vial y privadas, el canal central denominado canal de control es utilizado en modo *ad hoc* como canal de referencia para la detección inicial de vehículos y el establecimiento de todas las comunicaciones.

Para ilustrar la influencia que presenta el modelado del canal radio sobre los protocolos de enrutamiento *multihop* en entornos vehiculares se ha empleado el protocolo de enrutamiento GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*) [6], por ser ampliamente utilizado como referencia en el estudio de sistemas de comunicaciones vehiculares, dentro de los protocolos de enrutamiento basados en la posición. GPSR es un protocolo que emplea la posición geográfica de los nodos para llevar a cabo el enrutamiento de los paquetes de datos desde un nodo origen hacia un determinado destino y establece las rutas de forma dinámica, a medida que el paquete de datos avanza hacia el destino a través de los nodos intermedios. Cada nodo intermedio basa su decisión de enrutamiento en la posición de sus nodos vecinos (nodos con los que puede comunicarse directamente y de los que obtiene la posición a través de la transmisión periódica de *beacons*) y la localización del destino. Así, para enrutar un paquete de datos empleando GPSR, el nodo origen introduce la posición del destino en la cabecera del paquete y lo transmite hacia uno de sus vecinos empleando uno de los dos modos de enrutamiento que distingue GPSR: *greedy forwarding* y *perimeter forwarding*. En el primer modo, el nodo transmite el paquete de datos al nodo vecino que presente mayor progreso en cuanto a distancia hacia el destino. Sin embargo, cuando un nodo no tenga ningún vecino que presente progreso hacia el destino, cambiará el modo de enrutamiento a *perimeter forwarding* e intentará encaminar el paquete de datos de manera que bordeé la zona en la que no había ningún nodo disponible.

#### B. Entorno de simulación

El análisis del rendimiento de los protocolos de enrutamiento ha sido llevado a cabo en un escenario urbano, dado que la mayor presencia de obstáculos en estos entornos provoca que las condiciones de propagación de la señal radio sean más desfavorables que en otro tipo de entornos como autopistas o carreteras convencionales. El escenario urbano empleado en el presente trabajo es ilustrado en la Fig. 1. Todas las calles presentan dos carriles, uno en cada sentido, excepto las calles horizontales del centro del escenario que presentan 4 carriles, dos en cada sentido. Todas las intersecciones están reguladas por prioridad (cesión del paso a los vehículos de la derecha) excepto las intersecciones de las calles de 4 carriles que están reguladas por semáforos. La densidad de tráfico en el escenario simulado es de 12 veh/km.

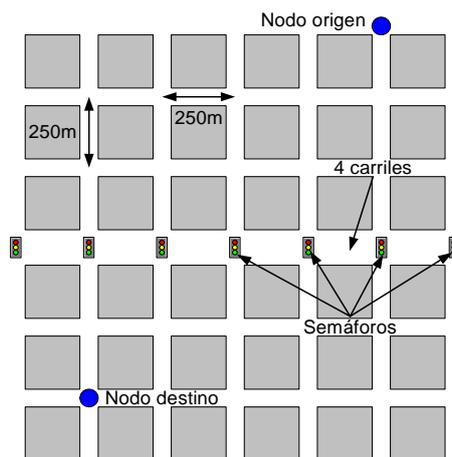


Fig. 1. Escenario urbano considerado.

Para llevar a cabo la presente investigación, se ha implementado una plataforma de simulación de comunicaciones móviles vehiculares basada en el simulador de redes de código abierto ns2 (<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>), que considera el escenario urbano ilustrado en la Fig. 1. En dicho escenario, todos los vehículos en circulación transmiten periódicamente *beacons* para informar a sus nodos vecinos de su posición cada 0.1s sobre el canal de control WAVE utilizando el modo de transmisión de

6Mbps definido para dicho canal y una potencia de transmisión de 0.5W. En dos puntos del escenario han sido fijadas las posiciones de los nodos origen y destino para la transmisión *multihop*, en la que el nodo origen genera un paquete de datos cada 3s. Dada la importancia que el modelado de la movilidad de los vehículos puede ejercer sobre el rendimiento del sistema, el presente trabajo también utiliza la herramienta de simulación de tráfico SUMO (*Simulation of Urban Mobility*, <http://sumo.sourceforge.net/>) para obtener patrones de movimiento de los vehículos y poder, de este modo, analizar el rendimiento de los protocolos de enrutamiento en entornos realistas. Con tal de reducir la complejidad de las simulaciones a nivel de sistema, la emulación del nivel físico del canal de control WAVE ha sido implementado mediante curvas de PER (*Packet Error Rate*) en función de la relación señal a ruido e interferencia, según los datos publicados en [7].

#### IV. RESULTADOS

La Fig. 2 ilustra el rendimiento del protocolo GPSR en función del modelo de propagación considerado. La figura clasifica en tres categorías los paquetes de datos que han intentado encaminarse hacia el destino en función de si han sido correctamente recibidos por el nodo destino, han sido perdidos en algún punto del recorrido a nivel de ruteo (descartados por algún nodo intermedio al no encontrar ningún nodo vecino al que poder transmitir el paquete de datos) o a nivel MAC (descartados por haberse alcanzado el límite máximo de retransmisiones a nivel MAC). En dicha figura puede observarse que el porcentaje de paquetes perdidos a nivel de ruteo aumenta para los modelos LOS/NLOS y Detallado respecto al modelo Dos Rayos, repercutiendo en el rendimiento final del protocolo. El modelado del efecto de los edificios sobre la propagación radio que realizan los modelos LOS/NLOS y Detallado provoca una disminución de la estimación del número de vecinos que presenta cada nodo retransmisor (ver Fig. 3). Esto es debido a que dichos modelos reproducen una atenuación de la señal en condiciones sin visión directa que reduce las posibilidades de comunicación entre vehículos separados por un edificio. Todo ello resulta en una disminución de las oportunidades de enrutamiento de cada nodo, provocando un aumento de la tasa de paquetes perdidos a nivel de ruteo.

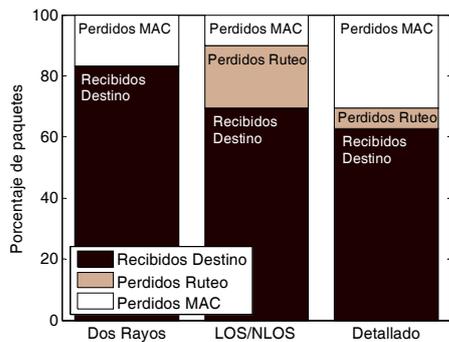


Fig. 2. Rendimiento del protocolo GPSR para los modelos analizados.

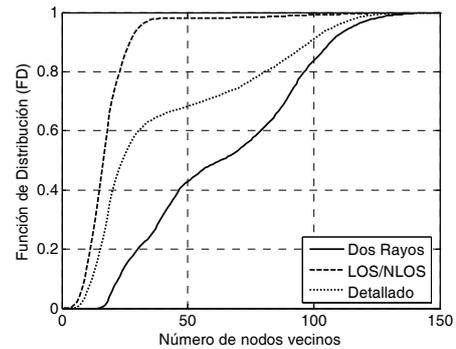


Fig.3. Función de distribución (FD) del número de vecinos.

Como ilustra la Fig. 2, en el modelo de propagación Detallado, que representa fielmente la variabilidad del canal radio, el porcentaje de paquetes correctamente recibidos en el nodo destino es similar al obtenido con el modelo LOS/NLOS. Sin embargo, la diferencia más notable entre ambos modelos es la causa de pérdida de los paquetes. En el modelo Detallado, el número de paquetes perdidos a nivel de ruteo es menor que en el caso del modelo LOS/NLOS, debido a que la estimación del nivel de señal recibido realizada por el modelo Detallado permite comunicaciones entre nodos más lejanos y posibilita, por tanto, a cada nodo, considerar un mayor número de nodos vecinos (ver Fig. 3). Sin embargo, la variabilidad introducida con el modelo Detallado reduce la fiabilidad de los enlaces y produce un incremento de los mensajes perdidos a nivel MAC. La consideración de un modelado detallado del canal radio permite determinar que para una densidad de tráfico media el factor preponderante en la pérdida de paquetes de datos es la pérdida a nivel MAC y no la pérdida a nivel de ruteo como se estima cuando es empleado el modelo LOS/NLOS. Es necesaria la consideración de un modelado realista del canal radio para la adecuada identificación de la problemática que debe valorarse en el diseño y optimización de protocolos de enrutamiento.

La consideración de un modelado del canal radio simplificado no solo afecta al rendimiento observado de los protocolos de enrutamiento *multihop*, sino que también puede condicionar su modo de operación y comportamiento. La diferencia de comportamiento del protocolo de enrutamiento cuando se considera la presencia de edificios en la estimación del nivel de señal recibido puede observarse en la Fig. 4, donde se muestra el camino que trazan los paquetes en su trayecto al nodo destino. Con el modelo de Dos Rayos, los paquetes intentan seguir prácticamente una línea recta entre origen y destino, debido al inapropiado modelado de los efectos que causan los obstáculos sobre la propagación de la señal. Sin embargo, con el modelo Detallado la transmisión de los paquetes queda confinada a la topología de la red viaria subyacente, y los paquetes siguen el trazado que definen las calles del escenario.

En este contexto, tal y como puede apreciarse en la Tabla I y de acuerdo a los trayectos mostrados en la Fig. 4, cuando es considerada la presencia de edificios en el cálculo del nivel de señal recibido (modelos LOS/NLOS y detallado) aumenta la distancia total recorrida por los paquetes entre origen y destino. Bajo el modelo de propagación LOS/NLOS, el protocolo de enrutamiento presenta una distancia media entre nodos retransmisores mayor que la mostrada en el modelo de Dos Rayos.

Dicha diferencia es debida a que los problemas de propagación en condiciones NLOS inducen al protocolo a buscar nodos retransmisores en su misma calle (condiciones LOS). En condiciones LOS, el modelo LOS/NLOS tiene mayor rango de cobertura que el modelo de Dos Rayos, lo cual explica su mayor distancia entre nodos retransmisores. Cuando es empleado el modelo Detallado de la propagación radio la distancia media entre nodos retransmisores aumenta respecto a los modelos de propagación deterministas. Esto es debido a que la consideración de los efectos *shadowing* y *multipath fading* incrementan la variabilidad del canal y por tanto, el rango de cobertura instantáneo, permitiendo que puedan establecerse comunicaciones entre nodos más lejanos. Tanto la distancia media entre nodos retransmisores como la distancia total recorrida entre origen y destino repercuten en el número medio de nodos retransmisores necesarios para hacer llegar el paquete al nodo destino. La distancia media y el número medio de nodos retransmisores intermedios son factores importantes en el diseño de protocolos porque influyen en el retardo medio de propagación que experimenta un paquete en su camino hacia el destino, en la probabilidad de rotura de enlace y en la congestión del canal radio, por lo que la consideración de un modelo de propagación simplificado puede inducir a interpretaciones erróneas del comportamiento real del protocolo.

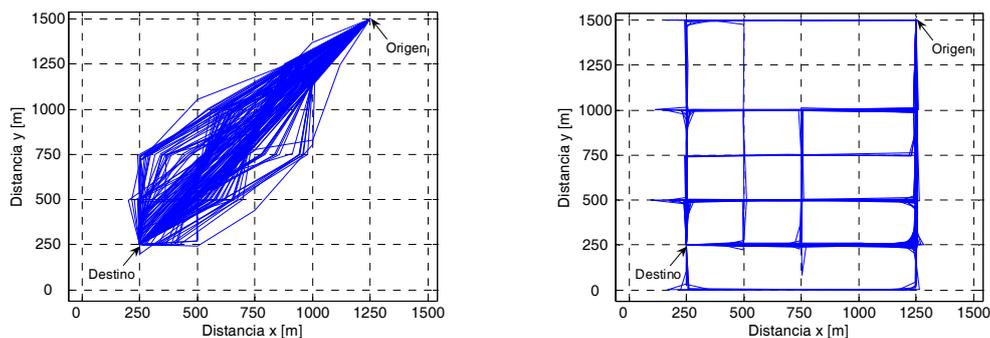


Fig. 4. Camino que trazan los paquetes de datos hacia el destino.  
(a) Modelo Dos Rayos. (b) Modelo Detallado.

Parámetro	Dos Rayos	LOS/NLOS	Detallado
Distancia media recorrida origen-destino	1665m	2281m	2273m
Distancia media entre nodos retransmisores	368.09m	399.00m	506.72m
Número medio de nodos retransmisores	4.55 nodos	5.63 nodos	4.54 nodos

Tabla I. Parámetros de enrutamiento.

Puesto que al considerar un modelo de propagación Detallado el factor más influyente en la pérdida paquetes de datos es la pérdida de paquetes a nivel MAC, conviene llevar a cabo un estudio más detallado que permita determinar las posibles causas. La Fig. 5 clasifica todos los paquetes que han sido transmitidos a nivel MAC, tanto paquetes de datos como ACKs (acuses de recibo), en función de si han sido correctamente recibidos o si por el contrario han sido descartados, en este último caso, diferenciando las causas de su pérdida: error en el canal, colisión, error y colisión, o no detección. Los paquetes perdidos por error y colisión son aquellos que no han podido recibirse correctamente debido a que presentan error en el canal, además de colisión. Los paquetes no detectados son los descartados al no poseer suficiente potencia para poder ser detectados en el receptor. Como puede observarse, los porcentajes de paquetes perdidos por error en el canal y perdidos por colisión disminuyen cuando es utilizado el modelo LOS/NLOS respecto a cuando es considerado el modelo de Dos Rayos. Esta disminución se produce cuando se considera la presencia de obstáculos en la estimación del nivel de señal recibido, ya que cada nodo tiene un menor número de vecinos a su alrededor y por tanto, una menor probabilidad de que sus transmisiones colisionen con las de otros nodos. La justificación de la reducción observada en la tasa de paquetes perdidos por error en el canal está relacionada también con el número de vecinos que mantiene cada nodo. En el modelo de Dos Rayos, el hecho de que cada nodo detecte un mayor número de vecinos aumenta la probabilidad de seleccionar como próximo retransmisor a un nodo lejano y por tanto, la probabilidad de establecer enlaces problemáticos.

Por otro lado, cuando es considerado un modelo de propagación que reproduce fielmente la variabilidad del canal como el modelo Detallado, los porcentajes de paquetes perdidos por error en el canal y perdidos por colisión aumentan respecto al modelo determinista LOS/NLOS. Básicamente, el aumento de los paquetes perdidos por colisión en el modelo Detallado viene determinado por la estimación de un mayor número de vecinos potencialmente interferentes al poseer un rango de cobertura mayor que el de los modelos deterministas. Asimismo, la consideración de los efectos de *shadowing* y *multipath fading* introduce cierta componente de aleatoriedad en el cálculo del nivel de señal recibido que provoca una reducción de la fiabilidad de los enlaces de comunicación entre los nodos y consecuentemente, un aumento del número de paquetes perdidos por error en el canal. Los resultados demuestran que el adecuado modelado del canal radio también es importante para determinar las problemáticas que deberán abordarse en posteriores procesos de diseño y optimización.

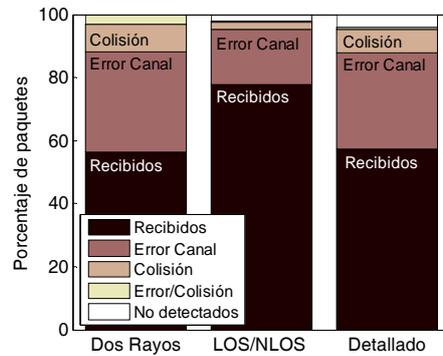


Fig. 5. Paquetes recibidos y perdidos a nivel MAC para el protocolo GPSR.

## V. CONCLUSIONES

El presente artículo ha puesto de manifiesto la influencia del modelado de la propagación radio en el rendimiento y el comportamiento de los protocolos de enrutamiento en redes de comunicaciones vehiculares *multihop*. La importancia de emplear un modelado realista radica en que el uso de modelos simplificados no sólo no cuantifica adecuadamente el rendimiento de los protocolos, sino que además puede dar indicaciones erróneas sobre su propio funcionamiento, lo cual condiciona de forma notable su aplicabilidad en entornos realistas. Asimismo, la utilización de un modelo realista en el análisis del enrutamiento, permite identificar la problemática a la que deben enfrentarse los protocolos de enrutamiento, pudiendo así establecer las bases sobre las que desarrollar futuros procesos de mejora y optimización de protocolos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Fomento de España a través del proyecto T39/2006 y por la Consellería de Empresa, Universidad y Ciencia de la Generalitat Valenciana (beca BFPI06/126).

## REFERENCIAS

- [1] M. Sepulcre y J. Gozávez, "On the importance of Radio Channel Modeling for the Dimensioning of Wireless Vehicular Communications Systems", *7th Int. Conference on ITS Telecommunications (ITST)*, 2007.
- [2] J. Monserrat, J. Gozalvez, R. Fraile y N. Cardona, "Effect of Shadowing Correlation Modeling on the System Level Performance of Adaptive Radio Resource Management Techniques", *2nd Int. Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, 2005.
- [3] V. Naumov, R. Baumann y T. Gross, "An Evaluation of Inter-Vehicle Ad Hoc Networks Based on Realistic Vehicular Traces", *7th ACM Int. Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, 2006.
- [4] WINNER, "D1.1.1. WINNER II interim channel models", Documento público: <http://www.ist-winner.org/index.html>
- [5] IEEE P802.11p/D0.21, "WLAN MAC and PHY Specifications: Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)", *IEEE Standards Association*, 2005.
- [6] B. Karp y H. Kung, "Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks", *6th ACM/IEEE Int. Conference on Mobile Computing and Networking (Mobi-Com)*, 2000.
- [7] Y. Zang, L. Stibor, G. Orfanos, S. Guo y H.J. Reurman, "An error model for inter-vehicle communications in high-way scenarios at 5.9GHz", *2nd Int. Workshop on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks (PE-WASUN)*, 2005.