

# GeOpps-N: Opportunistic Routing for VANET in a Public Transit System

M. Rios, *Senior Member, IEEE*

**Abstract**— GeOpps-N, a new hybrid routing protocol for communications between buses and operation control centers in a Public Transportation System (PTS) is proposed. Bus location must be updated each 30 seconds. We model the system as a Vehicular Ad-Hoc Network (VANET), which includes buses and Road Side Units (RSU). The network has a low density and is usually clustered, thus requiring relaying of the data. Topology-based routing protocols have proven to be well suited for these low node density scenarios, as compared with other protocols such as geographic-based routing or flooding-based routing. In these protocols, instead of looking for the destination inside the source cluster, the best candidate to transport the message to its destination is found. GeOpps-N searches for relaying nodes which can efficiently transport or relay the data to the closest RSU. GeOpps-N brings together aspects from reactive network topology-based routing and geographic-based routing protocols for delay tolerant networks. In our simulations, it improves the packet delivery ratio by up to 159% over the results of reactive protocols, such as DYMO-UM and DYMO-FAU and up to 59% over GeOpps. GeOpps-N also improves the mean end-to-end delay by up to 36% as compared to GeOpps.

**Keywords**— geographic routing, delay tolerant network, VANET.

## I. INTRODUCCION

EL DESARROLLO de los Sistemas de Tránsito Inteligentes (STI) se tradujo en mejoras significativas en los sistemas de tránsito, al permitir la interacción inteligente entre la infraestructura fija y los vehículos, para el control eficiente del tráfico. Las aplicaciones de STI incluyen la seguridad y control de tráfico, la gestión de flotas de transporte público y privado, información al viajero, etc. Las comunicaciones en una STI se pueden organizar a través del uso de protocolos VANET. La satisfacción de las necesidades de comunicación para las aplicaciones de STI, ha sido un tema difícil, debido al alto dinamismo en la movilidad del tránsito vehicular. En general, las aplicaciones STI no toleran retardos altos en el acceso y requieren una alta confiabilidad. Las VANETs en un PTS, por lo general, tienen una densidad baja, en términos de vehículos por kilómetro cuadrado, y pueden consistir en grupos desconectados de nodos o vehículos. En estos casos, se recomienda el uso de unidades RSU. Se trata de unidades fijas que reciben o retransmiten las comunicaciones entre los autobuses y un nodo central de control.

El objetivo principal de este trabajo es desarrollar un protocolo de enrutamiento que mejore el rendimiento de la

monitorización en tiempo real de la ubicación de los autobuses en un PTS, suponiendo la existencia y la ubicación conocida de las unidades RSU. El protocolo utilizará comunicaciones inalámbricas Vehículo-a-Vehículo (V2V) y Vehículo-a-Infraestructura (V2I).

Se propone el protocolo GeOpps-N, una variación de un protocolo de enrutamiento geográfico oportunista que supera el desempeño de otros protocolos. Se probó el protocolo, utilizando simulaciones, en un área representativa de un sistema PTS real (el PTS Transantiago), con información operativa real de la misma. Se simuló el tráfico en el área seleccionada utilizando el software SUMO [1]; se simuló y evaluó el protocolo utilizando el software OMNeT ++ [2]; y se comparó el protocolo propuesto con otros protocolos de enrutamiento que están disponibles dentro del marco de INETMANET de OMNet++. Estas simulaciones y comparaciones muestran que el protocolo propuesto tiene un mejor desempeño que protocolos tales como DYMO-UM, DYMO-FAU and GeOpps.

El resto del trabajo se organiza de la siguiente manera: la sección 2 describe las distintas categorías de los protocolos de enrutamiento en VANET y su funcionamiento. En la Sección 3 se describe el funcionamiento del protocolo GeOpps-N. En la sección 4 se presenta la simulación realizada para el modelo de tráfico vehicular y el modelo de comunicación inalámbrica, y se comparan los resultados para diferentes entornos y protocolos de enrutamiento. Por último, en la Sección 5, se presentan las conclusiones del trabajo realizado.

## II. ESTADO DEL ARTE

Hay una amplia gama de protocolos de enrutamiento creados para VANETs, que se pueden clasificar según la Fig. 1 [10]. Hay dos categorías principales: a) protocolos de enrutamiento basados en la topología y b) protocolos de enrutamiento geográficos. En los protocolos de enrutamiento basado en la topología, cada nodo genera un mapa local de los enlaces activos conectados a él y actualiza una tabla de enrutamiento. Entonces, los datos se enrutan de acuerdo a estas tablas de enrutamiento (Fig. 2a). Debido a la naturaleza altamente dinámica de las redes móviles, los protocolos de enrutamiento basado en la topología a menudo sufren de fallas de enlace.

Los protocolos de enrutamiento geográfico utilizan información local sobre la ubicación geográfica de los nodos vecinos para tomar decisiones en cuanto a donde enviar los paquetes. Los protocolos de enrutamiento geográfico pueden ser no tolerantes al retardo (None-DTN) (Fig. 2b) o tolerantes al retardo (DTN) (Fig. 2c). En VANET que usan protocolos

---

M. Rios, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, mrios@ing.puc.cl

DTN, la fuente debe retransmitir los datos a través de otros vehículos que llevan la información al destino como muestra la Fig. 2c.

Los protocolos DTN son muy eficientes para las redes de baja densidad en las cuales, la mayoría del tiempo, no hay conectividad directa entre la fuente y el destino. Esto sucede a menudo en las redes PTS, en las que los vehículos con frecuencia se reúnen en grupos separados, debido a las colas en los semáforos. Desafortunadamente, el uso de este tipo de protocolos de enrutamiento genera grandes retrasos en la entrega de datos. Un ejemplo de este tipo de protocolos es GeOpps [4].

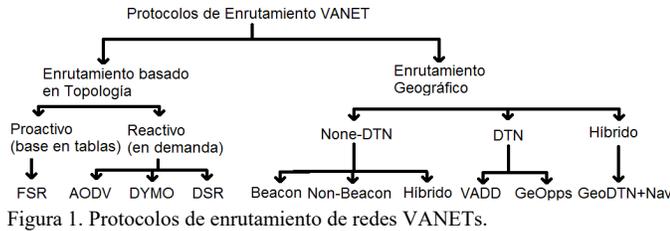


Figura 1. Protocolos de enrutamiento de redes VANETs.

Los protocolos None-DTN son los protocolos de enrutamiento más estudiados en las publicaciones recientes. Entre estos protocolos, el más conocido es GPSR (Greedy Perímetro Stateless Routing) [5], que utiliza como principio básico el envío de los datos hacia el nodo que está más cerca del destino (Fig. 2b). El objetivo de todos los protocolos es minimizar el retardo origen-destino. Desafortunadamente, GPSR tiende a caer fácilmente en mínimos locales para escenarios frecuentes.

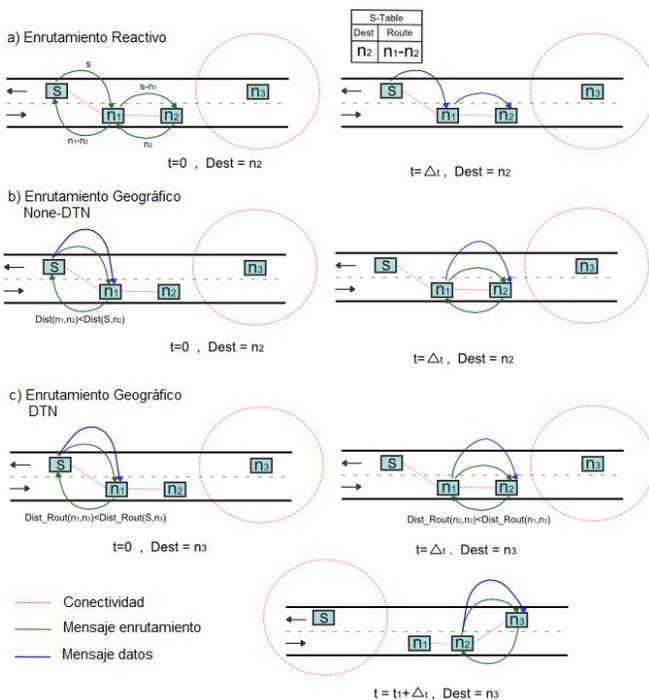


Figura 2. Operación de los protocolos de enrutamiento.

Otro protocolo none-DTN es GSR (Geographic Source Routing) que, en lugar de utilizar la distancia euclidiana para

elegir el siguiente nodo de reenvío, utiliza la distancia real a través de las calles, de acuerdo con un mapa tipo GPS en cada nodo.

Otros protocolos como A-STAR (Anchor-based Street and Traffic Aware Routing) [6], utilizan el hecho de que las calles con mayor tráfico de autobuses tienen una mejor conectividad que las calles con poco tráfico de autobuses. Otro protocolo que considera la información de tráfico es GyTAR (Greedy Traffic Aware Routing) [7], que utiliza la información actualizada acerca de la congestión entre intersecciones, para enrutar los paquetes de datos.

### III. PROTOCOLO GEOPPS-N

#### 3.1 Características de las VANET

Se supone que los únicos nodos equipados con dispositivos de comunicaciones del sistema son los autobuses y las RSU.

Según Li y Wang [8], las VANET en PTS difieren de otras redes ad-hoc (como WSN) en los siguientes aspectos:

- Las redes de comunicaciones V2V y V2I se limitan a las rutas de los autobuses.
- La topología de la red de comunicación es altamente dinámica, ya que los enlaces de comunicación V2V sólo duran unos pocos segundos.
- La red se desconecta con frecuencia, debido al patrón de movimiento de los vehículos y a la formación de grupos de autobuses.
- Los dispositivos inalámbricos tienen la energía y la capacidad suficiente de almacenamiento ya que, a diferencia de las redes comunes, los nodos VANET en los PTS son vehículos que tienen una fuente de energía altamente confiable (batería del vehículo y el motor).
- El modelado y predicción de la localización de los móviles es relativamente simple, debido a las características del PTS, en los que los autobuses se mueven por calles, con rutas, localización de semáforos, sentido del tráfico e información de tráfico conocidas.

- Hay dos tipos de escenarios de comunicación: a) carreteras, donde los vehículos solo se mueven en dos direcciones y no hay obstáculos importantes para la comunicación inalámbrica y b) zonas urbanas, donde los vehículos se mueven a través de las calles en diversas direcciones y hay obstáculos para la comunicación inalámbrica, tales como edificios, túneles, árboles, etc.

- Las restricciones de retardo máximo son exigentes. Hay casos, como por ejemplo en la comunicación de emergencia, donde se requiere un retardo limitado. En estos casos, el retardo máximo entre dos vehículos que se comunican es más relevante, como una medida de rendimiento, que el retardo medio de los paquetes.

- Hay interacciones con los sistemas de sensores a bordo de los vehículos. Por ejemplo, utilizando GPS y mapas virtuales del tráfico.

Se usarán estas características para el diseño del algoritmo de enrutamiento.

### 3.2 Algoritmo de enrutamiento propuesto

En el PTS elegido, cada bus debe entregar su ubicación actual a una de las RSU cada 30 segundos. En este escenario, el protocolo de enrutamiento depende del número de RSU distribuidas en la zona, la ruta del autobús, su ubicación (actualizado mediante el uso de GPS) y su velocidad.

A menudo, debido a la presencia de semáforos y otros vehículos, los autobuses tienden a moverse en grupos. Debido a este efecto, la conectividad a una RSU se pierde con frecuencia. Este es el caso para el bus  $n_1$  en la Fig. 3. El caso opuesto se produce cuando el nodo fuente es un bus, que está dentro del grupo que incluye a la RSU.

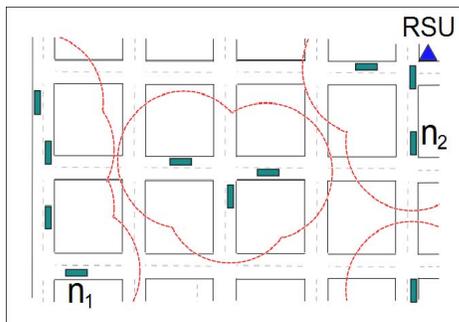


Figura 3. Grupos de conectividad en el tráfico vehicular.

Luego, para maximizar la proporción de tiempo durante el cual los autobuses pueden ser monitoreados, es necesario maximizar la relación de entrega de paquetes de los autobuses a la RSU. Para los autobuses que están dentro de un grupo con una RSU, esto es inmediato. Para los autobuses fuera del grupo con la RSU, la solución es retransmitir los paquetes a través de otros buses, lo que un protocolo DTN tal como GeOpps [4] realiza.

GeOpps es un protocolo de enrutamiento geográfico tolerante al retardo que utiliza la información GPS para enrutar los paquetes hacia el destino. Dado que cada vehículo conoce su propia ruta, el punto más cercano (NP) entre su ruta y el destino D puede ser pre-calculado. El mínimo tiempo estimado para entregar el paquete a D también puede ser calculado. Por último, el vehículo que puede entregar el paquete a D en el menor tiempo se convertirá en el próximo transportador de paquetes.

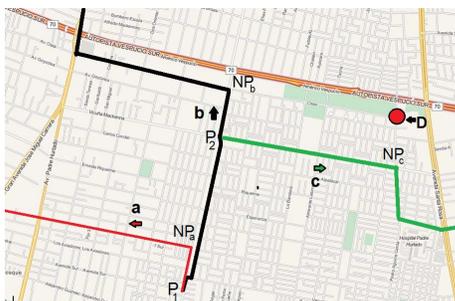


Figura 4. Ejemplo de cálculo del NP al destino.

GeOpps calcula una función llamada el Tiempo Mínimo

Estimado de Entrega para el paquete (METD), en que el vehículo de origen utiliza la hoja de ruta y su velocidad para estimar el tiempo de llegada al NP. El vehículo también puede estimar el tiempo que otro autobús, en la cercanía del NP, tomaría para entregar el paquete a D. Luego, el METD se calcula de la siguiente manera:

$$METD = ETA \text{ a NP} + ETA \text{ de NP a D} \quad (1)$$

En la Fig. 4, por ejemplo, un bus en  $p_1$  requiere enviar un paquete de datos a D. En la red hay tres rutas de buses,  $a$ ,  $b$  y  $c$ . En  $p_1$ , los buses  $a$  y  $b$  calculan sus respectivos METD. El bus  $b$  tiene el menor valor y comenzará a transportar el paquete. Cuando el bus  $b$  llega a  $p_2$ , se encuentra con el bus  $c$ , que tiene un menor valor de METD y seguirá transportando los datos, esperando encontrar a su vez un bus con un menor valor de METD en  $NP_c$  o estar dentro del rango de cobertura de D para entregar el paquete.

Este protocolo tiende a caer en mínimos locales, al no considerar la real conectividad de radio entre la fuente y el destino, pudiendo generar retardos elevados. Por ejemplo en la Fig. 5, el bus a necesita enviar un paquete de datos a D. Como el bus b tiene un mayor METD, porque  $NP_b$  está más lejos que  $NP_a$  de D, el bus a decide transportar el paquete a D por sí mismo, a su velocidad de movimiento. Naturalmente, como se observa en la figura, usar la ruta  $a-b-c-d-e$  y luego llevar el paquete al destino en el bus  $e$  resultaría en un retardo mucho menor.

El protocolo propuesto GeOpps-N está diseñado para mejorar la velocidad de comunicación en casos como el descrito. El bus de origen, en lugar de requerir el valor METD de sus buses vecinos, requiere también conocer el valor METD de los buses que están hasta N saltos alejados de su posición, permitiendo encontrar rutas más rápidas al costo de un aumento ligero de los cálculos.

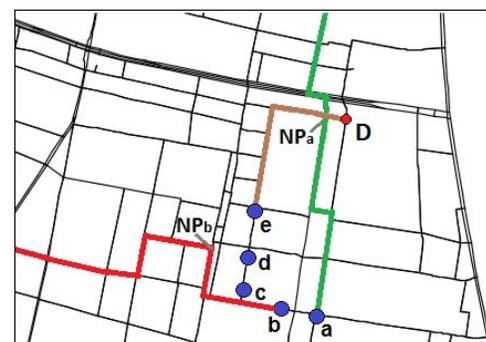


Figura 5. Mínimos locales en GeOpps.

Específicamente, con GeOpps-N, cuando un bus necesita enviar datos a una RSU:

- Genera una llamada a cada bus o RSU en su vecindad, mediante un paquete de solicitud de enrutamiento RREQ, incluyendo su propio valor METD y su dirección IP.
- Si un bus vecino tiene un valor menor de METD, generará un paquete de respuesta de enrutamiento RREP, que se envía usando la ruta guardada en el requerimiento original.

Si ningún otro bus vecino tiene un menor valor METD que el del bus origen, cada bus vecino retransmite el paquete RREQ a todos sus respectivos vecinos, usando una llamada de difusión que incluye la ruta hacia la dirección IP original.

- Una vez que el paquete RREP llega al bus de origen, este bus transmite el paquete de datos, con sus datos de localización, al bus que envió el paquete RREP.

Una vez que se envían los mensajes de enrutamiento, el bus esperará  $S$  segundos por el paquete RREP, antes de buscar otro bus con un menor valor de METD. En aquellos casos en que la conectividad es directa entre el bus de origen y la RSU, naturalmente el paquete de datos se enviará directamente a la RSU. El algoritmo de enrutamiento propuesto cubre muchas rutas posibles para llegar al destino.

### 3.3 Comparación de los protocolos

El desempeño de los protocolos de enrutamiento, generalmente considera tres medidas: Razón de Entrega de Paquetes PDR; Retardo de Extremo a Extremo E2E y la sobrecarga de la red. Un buen protocolo de enrutamiento debería maximizar el valor PDR, minimizar el valor del retardo E2E y minimizar el valor de la sobrecarga de la red. Se muestra estas medidas de desempeño en un diagrama en la Fig. 6.

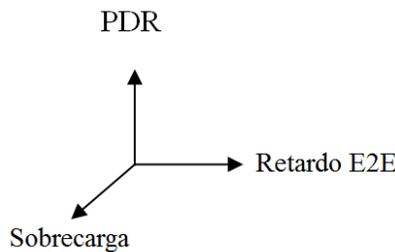


Figura 6. Medidas de desempeño.

La Fig. 7 muestra en forma cualitativa, el desempeño de diferentes protocolos con respecto a estas medidas, usando el diagrama anterior.

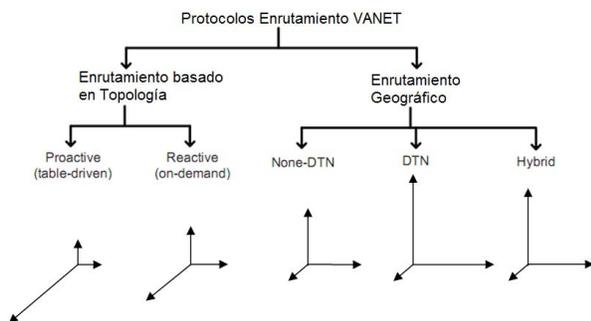


Figura 7. Medidas de desempeño de protocolos VANET.

El valor de sobrecarga de los protocolos de enrutamiento basados en la topología es elevado, debido al uso de tablas de enrutamiento que se obtienen mediante inundación de la red.

El valor de la sobrecarga es menor en los protocolos reactivos, porque ellos requieren la tabla de enrutamiento solo

cuando necesitan enviar un mensaje, es decir en demanda en lugar que una actualización continua. Los protocolos de enrutamiento geográfico tienen un mayor valor de retardos E2E, debido al uso de solo información local, que no garantiza la entrega de un paquete de datos. El mayor retardo se observa en los protocolos DTN, debido al uso de retransmisiones. Finalmente, los protocolos DTN muestran mayores valores de PDR, porque los nodos mantienen los datos más tiempo en la red, dando más oportunidades a la entrega de los datos. La idea general de GeOpps-N es combinar los altos valores de PDR de los protocolos DTN, tales como GeOpps, con el bajo valor de retardo E2E de los protocolos reactivos, tales como DYMO, para satisfacer los requerimientos del PTS.

### 3.4 Probabilidad de entrega de paquetes de GeOpps-N

En un escenario VANET típico, como el de la Fig. 8, existe un nodo fuente (S), un nodo de destino (D) y un conjunto  $R$  de posibles nodos repetidores [9]. Cuando el nodo S requiere seleccionar los nodos para enviar el paquete al nodo D, dado que la VANET considerada es dispersa, se supone que hay  $M$  nodos con conectividad directa a S en uno o más saltos, agrupados en el conjunto  $R^I = \{R_1^I, R_2^I, \dots, R_M^I\}$ . Se supone que D no está en el conjunto RI ni en comunicación con ninguno de los nodos de RI.

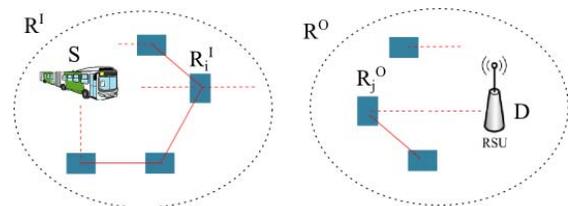


Figura 8. Escenario VANET.

Similarmente, hay  $N$  nodos que están fuera del rango de comunicaciones del nodo fuente, agrupados en el conjunto:

$$R^O = \{R_1^O, R_2^O, \dots, R_N^O\} \text{ donde } R = R^I \cup R^O \text{ y } R^I \cap R^O = \emptyset.$$

El evento de que dos nodos estén dentro del rango de comunicaciones común sigue una distribución Poisson [9]. Sea  $\lambda_{i,j}$  la tasa de ocurrencia del evento entre los nodos  $R_i$  y  $R_j$ ,  $i \neq j$ . Sea  $T$  el tiempo de vida del mensaje. Se define la probabilidad de entrega del mensaje a la probabilidad que el mensaje sea entregado al destino D dentro del tiempo de vida  $T$ .

Se considera primero el transporte de los datos a través de los nodos del conjunto RI. Cuando un nodo en RI se elige como repetidor (a través de uno o más saltos en RI), recibe el paquete de la Fuente sin retardo, y debe enviarlo al nodo de destino D. Como el tiempo entre eventos en una distribución Poisson sigue una distribución exponencial, la probabilidad que un nodo repetidor  $R_i^I$  contacte al nodo D dentro del intervalo  $T$  es:

$$p_i = 1 - e^{-\lambda_{i,D}^l T} \quad (2)$$

donde  $\lambda_{i,D}^l$  es la tasa de contacto entre el nodo  $R_i^l$  y D.

Si, por otro lado, la fuente escoge como repetidor un nodo  $R_j^o \in R^o$ , es decir localizado fuera del rango de comunicaciones de S, ese nodo necesita primero ingresar al rango de comunicaciones de S y luego ingresar al rango de comunicaciones de D. La función densidad de probabilidad de entrega del mensaje de S, por un nodo  $j \in R^o$ , al destino D, en un tiempo  $y$ , está dado por [9]:

$$f_j(y) = \frac{\lambda_{j,D}^o \lambda_{j,S}^o (e^{-\lambda_{j,S}^o y} - e^{-\lambda_{j,D}^o y})}{\lambda_{j,D}^o - \lambda_{j,S}^o} \quad (3)$$

donde  $\lambda_{j,S}^o$  es la tasa de contacto entre  $R_j^o$  y S, y  $\lambda_{j,D}^o$  es la tasa de contacto entre  $R_j^o$  y D. El tiempo  $y$  incluye la comunicación de la fuente al repetidor y de este al destino. Se define  $q_j = \text{Prob}(y \leq T)$  como la probabilidad que un paquete enviado por el nodo S llegue al destino D dentro del tiempo  $T$ , cuando un nodo  $R_j^o$  se usa como repetidor. Esta probabilidad es:

$$q_j = \int_0^T f_j(y) dy = 1 - \int_T^\infty f_j(y) dy = 1 - \frac{\lambda_{j,D}^o e^{-\lambda_{j,S}^o T} - \lambda_{j,S}^o e^{-\lambda_{j,D}^o T}}{\lambda_{j,D}^o - \lambda_{j,S}^o} \quad (4)$$

Muchos nodos repetidores podrían intervenir en la comunicación fuente destino. Se define la variable  $x_i \in \{0,1\}$  que toma el valor 1 si el nodo  $R_i^l$  se elige para retransmitir el mensaje y 0 si no. Se define la variable que toma el valor 1 si el nodo  $R_j^o$  se elige para retransmitir el mensaje y 0 si no.

Luego, la probabilidad de una transmisión correcta de un paquete, usando cualquier protocolo, es:

$$P = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - p_i)^{x_i} \prod_{j=1}^N (1 - q_j)^{y_j} \quad (5)$$

El objetivo de cada protocolo de enrutamiento es seleccionar los repetidores apropiados, desde el conjunto  $R$  para entregar el mensaje a D dentro del tiempo  $T$ . los protocolos None-DTN (basados en la topología) no usan repetidores fuera del rango del nodo fuente S, siendo para estos protocolos  $y_j = 0$ . Luego, la probabilidad de una transmisión correcta de un paquete para un protocolo None-DTN es:

$$P_{\text{None-DTN}} = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - p_i)^{x_i} \prod_{j=1}^N (1 - q_j)^0 = 1 - \prod_{i=1}^M (1 - p_i)^{x_i} \quad (6)$$

Los protocolos de enrutamiento DTN tales como GeOpps, solo consideran los nodos vecinos a un salto para repetir los paquetes. Por ello, puede existir un grupo de nodos en RI situados a dos o más saltos de la fuente S que no se consideran en la decisión de enrutamiento. Si se supone que existen  $K \leq M - 1$  nodos del conjunto RI que no se consideran en la decisión de enrutamiento, la probabilidad de una transmisión correcta de un paquete para estos protocolos es:

$$P_{\text{DTN}} = 1 - \prod_{i=1}^{M-K} (1 - p_i)^{x_i} \prod_{j=1}^N (1 - q_j)^{y_j} \quad (7)$$

La probabilidad de entrega de los paquetes de GeOpps-N está dada por P, porque usa tanto los nodos más alejados de la fuente S, como también usa los nodos que están fuera del alcance de la fuente S. Por ello, es fácil concluir que el protocolo GeOpps-N tiene un mejor desempeño que los protocolos DTN y None-DTN, dado que:

$$P \geq P_{\text{None-DTN}} \quad \wedge \quad P \geq P_{\text{DTN}} \quad (8)$$

Hay dos aproximaciones realizadas en el análisis. En primer lugar, se estimó la probabilidad de una transmisión correcta para solo un paquete. Cuando hay más paquetes que transmitir, podrían ocurrir colisiones que incrementan el tiempo de transmisión. En segundo lugar, cuando dos o más nodos del conjunto RI se usan como repetidores, la fórmula para  $q_i$  cambia. Sin embargo, el hecho que GeOpps-N tiene una mayor probabilidad de entrega de los paquetes permanece inalterado.

#### IV. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE GEOPPS-N

Para evaluar el desempeño de GeOpps-N, se utilizó un escenario de tráfico vehicular usando una zona geográfica del PTS Transantiago.

##### 4.1 Simulación del tráfico vehicular

Se usó el software SUMO [1] para modelar el movimiento físico de los buses en la red. SUMO requiere dos archivos de datos: uno con la descripción de la red y el otro con la descripción de la ruta de los buses. También se necesita el tiempo de partida, la aceleración y la velocidad máxima de cada bus para cada ruta. Toda esta información se extrajo de la base de datos OSM [10] y se editó con JOSM [11] para eliminar las calles que no intervenían en las rutas. Después de identificar las rutas, estas se ingresaron al generador de movilidad MOVE [13]. Se definieron dos tipos de buses, grandes y pequeños para representar los buses troncales y los de acercamiento.

##### 4.2 Simulación de la comunicación inalámbrica

La interacción entre la movilidad del tráfico vehicular y la red de comunicaciones inalámbrica se basó en VEINS [14], que tiene la opción de importar el ambiente INETMANET al software OMNET++. INETMANET tiene todas las librerías, ejemplos y módulos para realizar la simulación.

Finalmente, se calculó la potencia de transmisión  $P_t$  de manera de obtener un radio de cobertura  $d$  de 500 metros, usando el modelo de Friis:

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2 \cdot d^\alpha} \quad (9)$$

Donde  $\alpha$  es la pérdida de transmisión y  $G_t$  y  $G_r$  son las ganancias de las antenas.

##### 4.3 Resultados de la simulación

La simulación se realizó en un terreno de 8350m x 12180m, y los resultados de los protocolos de enrutamiento DYMO-

UM, DYMO-FAU y GeOpps se compararon con los resultados de GeOpps-N.

Los escenarios de tráfico vehicular (Tabla 1) se tomaron de las rutas y horarios reales de los buses del PTS, en un horario nocturno (escenario A entre las 01:00 horas y 05:30 horas) y la hora de punta (escenario D entre las 06:30 horas y 08:30 horas). Los escenarios B, C y E, corresponden a horarios de transición, basados en el escenario D, cuyas densidades son 1/3, 2/3 y 4/3 del escenario D, respectivamente. El tiempo de simulación fue de 1800 segundos, ubicados entre los segundos 2000 y 3800 como se ve en la Fig. 9, donde la densidad se estabiliza. GeOpps-N consigue, en promedio, un retardo E2E promedio inferior en un 36% al del protocolo GeOpps y alcanza, en el escenario C, una reducción de 38 segundos, como se ve en la Fig. 10. Las mayores diferencias se dan en los escenarios con un número bajo de RSU, lo que causa el uso frecuente de repetición y, como GeOpps-N considera la conectividad, frecuentemente usa los mejores candidatos para repetidores de los datos, a diferencia de GeOpps, que solo considera los nodos vecinos a un salto para la repetición. El retardo E2E de las versiones DYMO es claramente mejor que aquel de GeOpps y GeOpps-N, como se espera de un protocolo de enrutamiento basado en la topología.

TABLA I  
Escenarios de Simulación.

Escenario	Número medio de buses
A	40
B	104
C	216
D	303
E	405

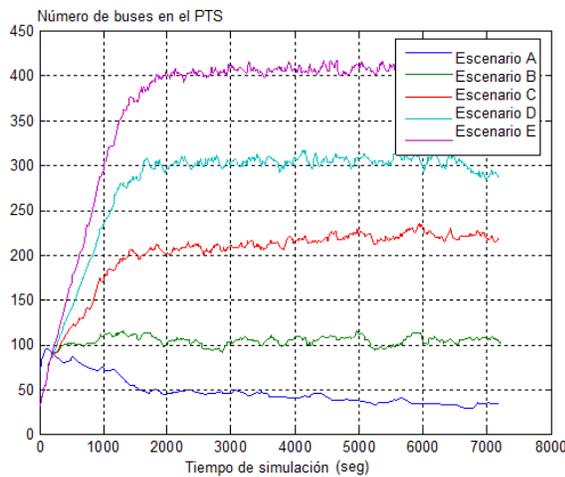


Figura 9. Número de buses en cada escenario.

En casos con pocas RSU, la razón PDR del protocolo GeOpps-N sobrepasa a todas las de los otros protocolos, siendo un 59% mejor que GeOpps, 128% mejor que DYMO-UM y 159% mejor que DYMO-FAU, como se observa en el escenario E de la Fig. 14.

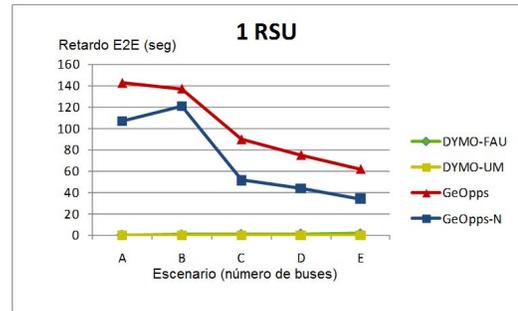


Figura 10. Retardo promedio E2E con 1 RSU.

A medida que el número de RSU aumenta (Figs. 15, 16), GeOpps-N tiende a alcanzar un PDR similar al de GeOpps, porque el transporte por repetición es menos frecuente, y los datos se enrutan directamente a la RSU de destino. La diferencia principal entre los protocolos DTN y los protocolos reactivos se observa en la Fig. 13, en que el PDR de GeOpps-N y GeOpps permanece por sobre el 50%, para más de una 1 RSU, a cualquier densidad de buses. Por el contrario, los protocolos reactivos requieren de al menos 30 RSU para alcanzar un PDR de 50%.

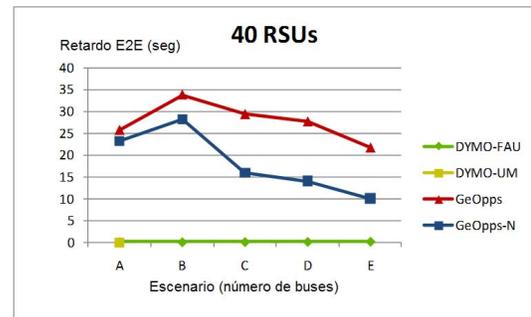


Figura 11. Retardo promedio E2E con 40 RSU.

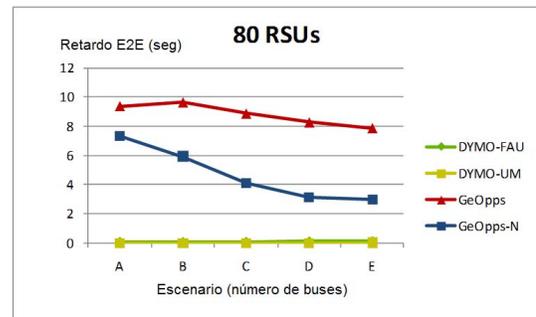


Figura 12. Retardo promedio E2E con 80 RSU.

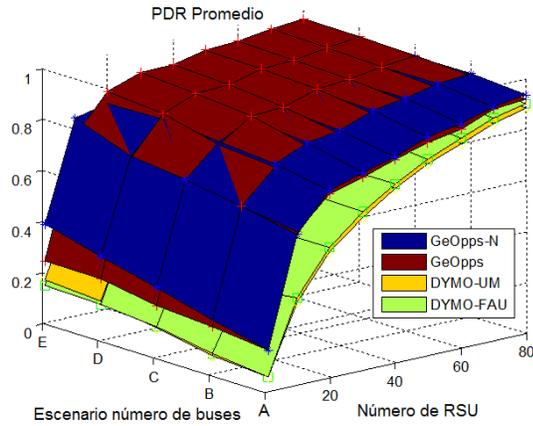


Figura 13. Valor promedio de PDR en cada escenario.

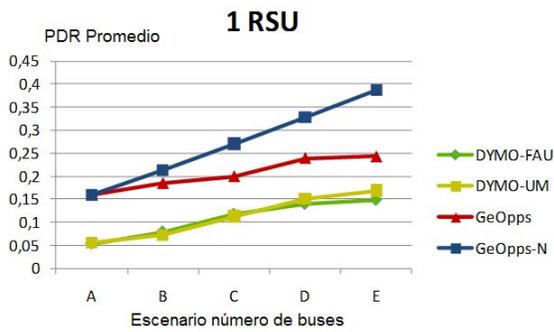


Figura 14. Valor promedio de PDR con 1 RSU.

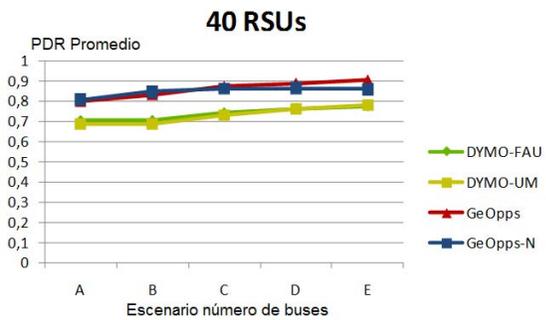


Figura 15. Valor promedio de PDR con 40 RSU.

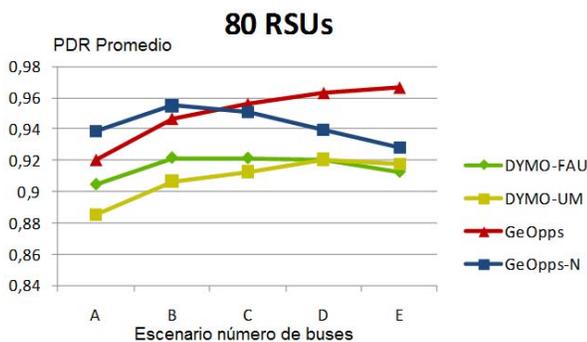


Figura 16. Valor promedio de PDR con 80 RSU.

promedio del retardo E2E y el PDR, es un aumento de la sobrecarga de la red, que representa el número total de paquetes que deben ser transmitidos para entregar cada paquete a su destino. Las Figs. 17, 18 y 19 muestran que la sobrecarga de GeOpps-N disminuye con el aumento en el número de RSU, y se acerca al valor de sobre carga de GeOpps y DYMO-FAU. La sobrecarga de GeOpps-N es siempre mayor que la de GeOpps, ya que GeOpps-N busca en forma continua a los mejores candidatos para la repetición, lo que incrementa el tráfico en la red de los paquetes RREQ.

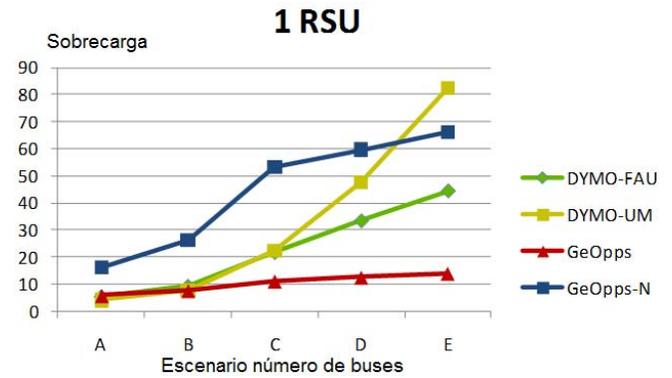


Figura 17. Sobrecarga de la red en escenarios con 1 RSU.

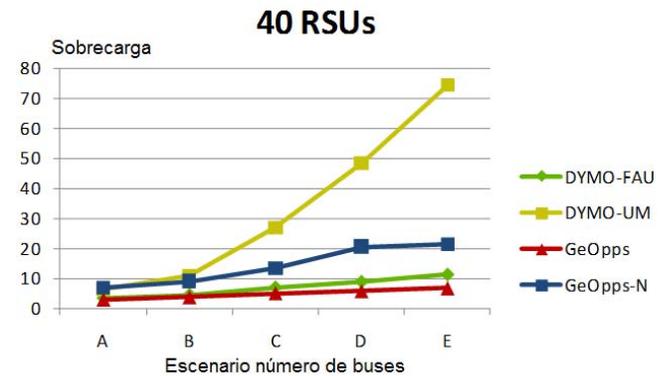


Figura 18. Sobrecarga de la red en escenarios con 40 RSU.

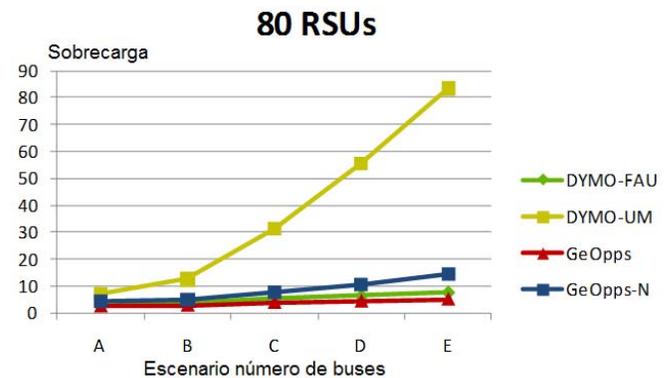


Figura 19. Sobrecarga de la red en escenarios con 80 RSU.

El costo asociado con las mejoras en el desempeño

## V. CONCLUSIONES

Se ha propuesto un nuevo protocolo de enrutamiento VANET, el que puede usarse en aplicaciones PTS. Usando como caso de estudio el PTS de Santiago, se modela un Sistema de localización de buses con la ayuda de unidades RSU distribuidas a lo largo de la ruta.

El protocolo GeOpps-N, permite el transporte de paquetes de datos en redes Ad-Hoc dinámicas con alta movilidad e interconexiones intermitentes, como es el caso de VANET en PTS. El protocolo de enrutamiento GeOpps-N tiene la ventaja inherente de transportar un paquete de datos en la forma más rápida y a mayor distancia del destino, a través del uso de repeticiones múltiples. Si el nodo de destino tiene conectividad directa con el nodo fuente, el paquete de datos se envía de inmediato. En caso contrario, el paquete es transportado por el nodo que tiene conectividad con el nodo fuente y una mayor probabilidad de entregar el mensaje al nodo de destino. De esta manera, el protocolo cubre todos los escenarios posibles maximizando la razón de entrega de paquetes.

Dentro de los escenarios evaluados, mejoras se obtuvieron sobre todos los protocolos evaluados en las medidas de desempeño relevantes tales como la PDR y el retardo E2E, cuando el número de RSU y el número de buses aumentaba.

El protocolo propuesto GeOpps-N mejora en hasta un 159% los resultados del PDR de los protocolos de enrutamiento reactivos tales como DYMO-UM y DYMO-FAU. GeOpps-N también mejora el resultado del PDR en hasta un 59% con respecto al protocolo DTN GeOpps. Los mejores resultados del PDR de GeOpps-N, comparado con el resto de los protocolos, se dan en escenarios con una densidad alta de buses y un número bajo de RSU, en donde GeOpps-N mejora el uso de repetición de datos a través del uso de los mejores candidatos para el proceso de repetición.

Finalmente, GeOpps-N mejora el desempeño del retardo E2E de GeOpps, hasta en un 36%. La disminución de esta medida de desempeño es uno de objetivos principales del diseño del protocolo GeOpps-N.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado, en parte, por los proyectos CEDEUS (Conicyt/Fondap/15110020) y CIGIDEN (Conicyt/Fondap/15110017).

## REFERENCIAS

- [1] Behrisch M, Bieker L, Erdmann J, Krajzewicz, D. SUMO - Simulation of Urban MObility: An Overview. SIMUL 2011. In: The Third International Conference on Advances in System Simulation, pp 63-68. SUMO (Version 0.12.3) [Software]. Available in: <http://sumo.sourceforge.net/>, 2011.
- [2] Varga A. OMNET++ (Version 4.2b2) [Software] Available in: <http://www.omnetpp.org/>
- [3] Lee KC, Gerla M. Opportunistic Vehicular Routing. In: European Wireless Conference (EW), pp 873-880, 2010.
- [4] Leontiadis I, Mascolo C. GeOpps: Geographical Opportunistic Routing for Vehicular Networks. In: IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), pp 1-6, 2007.

- [5] Karp B, Kung HT. GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks. In: Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking, pp 243-258, 2000.
- [6] Seet B, Liu G, Lee B, Foh C, Wong K, Lee K. A-STAR: A Mobile Ad Hoc Routing Strategy for Metropolis Vehicular Communications. In: Networking 2004. Networking Technologies, services, and protocols; Performance of Computer and communications networks; Mobile and Wireless Communications, VOL. 3042, pp 989-999, 2004.
- [7] Jerbi M, Senouci S, Meraihi R, Ghamri-Doudane, Y. An Improved Vehicular Ad Hoc Routing Protocol for City Environments. In: IEEE International Conference on Communications, pp 3972-3979, 2007.
- [8] Li F, Wang Y. Routing in vehicular ad hoc networks: A survey. In: Vehicular Technology Magazine, IEEE, VOL. 2, No. 2, pp 12-22, 2007.
- [9] Li Y, Wang Z, Jin D, Su L, Zeng L, Chen S. Optimal Relaying in Heterogeneous Delay Tolerant Networks. In: IEEE International Conference on Communications (ICC), 2011, pp 1-5, 2011.
- [10] Collaborators of OpenStreetMap, CC-BY-SA. Virtual map from Santiago. Available in: <http://www.openstreetmap.org/>
- [11] Edgewall Software. JOSM (Version 4550) [Software] Available in: <http://josm.openstreetmap.de/>
- [12] Meinel C, Schönemann B. eWorld (Version 0.9.2) [Software] Available in the Hasso Plattner Institute in Potsdam, Germany: <http://eworld.sourceforge.net/>, 2011.
- [13] Karnadi FK, Mo ZH, Lan K. Rapid Generation of Realistic Mobility Models for VANET. In: Wireless Communications and Networking Conference, 2007.WCNC 2007. IEEE, pp 2506 -2511, 2007.
- [14] Sommer C. VEINS (VEHicles In Network Simulations) Simulation Framework. Available in: the Computer Networks and Communication Systems, University of Erlangen: <http://veins.car2x.org/tutorial/>, 2011.
- [14] Kuprian H. A VANET for Santiago: Evaluation of Information Dissemination Characteristics on the Basis of different Traffic Situations and Infrastructures. Diplomarbeit KOM-D-0423, Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität Darmstadt, Germany, 2010.
- [16] Sommer C, Dressler F. The DYMO Routing Protocol in VANET Scenarios. In: Vehicular Technology Conference, 2007, VTC-2007 fall. 2007 IEEE 66th, pp 16-20, 2007.
- [17] Miucic R, Popovic Z, Mahmud SM. Experimental characterization of DSRC signal strength drops. In: 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation System (ITSC), pp 1-5, 2009.
- [18] Cheng PC, Lee KC, Gerla M, Härri J. GeoDTN+Nav: Geographic DTN Routing with Navigator Prediction for Urban Vehicular Environments. In: Mobile Networks and Applications Journal from Springer, VOL. 15, pp 61-82, 2010.



**Miguel Ríos** was born in Santiago, Chile. He is Electrical Engineer from the Universidad de Chile, Master of Applied Science in Electrical Engineering and Doctor of Philosophy in Electrical Engineering from the University of Ottawa, Canada. Professor Ríos has been with the Department of Electrical Engineering of the Pontificia Universidad Católica de Chile since 1977. During this period of time he has lectured, performed research and consulting in Telecommunications. He has been Chairman of the Department in five periods (1988-1990, 1990-1992, 2000-2002, 2002-2003 and 2012-2014). In 2003, he was Senior Visiting Research Scientist at the School of Information Technology and Engineering (SITE) from the University of Ottawa, Canada.