



Evaluación del desempeño de una HetNet de caravanas, caso de estudio: centro histórico de Quito

Performance evaluation of a platooning HetNet, case study: historical center of Quito

Jefferson Eduardo Robles Casa

Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito, Ecuador
jefferson.robles@epn.edu.ec

Martha Cecilia Paredes Paredes

Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de Información, Escuela Politécnica Nacional (EPN), Quito, Ecuador
cecilia.paredes@epn.edu.ec
ORCID: 0000-0001-5789-4568

doi: <https://doi.org/10.36825/RITI.10.21.005>

Recibido: Junio 06, 2022

Aceptado: Agosto 10, 2022

Resumen: En el centro histórico de Quito por sus calles estrechas la congestión vehicular es algo muy frecuente, para mitigar este efecto se pueden usar vehículos inteligentes, con una conducción totalmente automática. La forma en que los vehículos inteligentes interactúan es mediante redes vehiculares, las cuales necesitan la instalación de una infraestructura denominada RSU (*Road Side Unit*) que utilizan el estándar IEEE 802.11p y que permiten enviar información de los vehículos, a lugares más alejados. Sin embargo, instalar RSUs requiere de una inversión económica, por lo que, como alternativa, se puede utilizar combinar con una infraestructura ya desplegada como la red celular LTE (*Long Term Evolution*) formando una red heterogénea (*HetNet*). Este artículo busca analizar el comportamiento de la HetNet de caravanas de vehículos (*Platooning*) a través del análisis de parámetros físicos y técnicos de la red de dos diferentes escenarios dentro de un sector del centro histórico de la ciudad de Quito.

Palabras clave: *HetNet, Platooning, IEEE 802.11p, LTE, Centro Histórico de Quito.*

Abstract: In the Quito historical center, due to its narrow streets, vehicular congestion is very frequent. Intelligent vehicles can be used, which have fully automatic driving, but need to interact with each other. The manner in which smart vehicles interact is through vehicle networks, which require the installation of an infrastructure called RSU (Road Side Unit) that uses the IEEE 802.11p standard and the RSU allows sending vehicle information to more distant places. However, installing RSUs requires an economic investment, so, as an alternative, it can be combined with an already deployed infrastructure such as the LTE (Long Term Evolution) cellular network, forming a heterogeneous network (HetNet). This paper seeks to analyze the behavior of the platooning HetNet through the analysis of physical and technical parameters of two network scenarios within of the Quito historical center.

Keywords: *HetNet, Platooning, IEEE 802.11p, LTE, Quito Historical Center.*

1. Introducción

La movilidad en el centro histórico de Quito se ha visto mermada cada vez más con el paso de los años, producto del incremento del parque automotor de la ciudad [1], además de la estrechez de las calles de la zona céntrica. Para mitigar este efecto, se puede considerar como alternativa, utilizar automóviles inteligentes que puedan mantener una conducción controlada y segura para transeúntes y conductores. Generalmente este tipo de automóviles utilizan redes vehiculares, en donde los vehículos usualmente se comunican entre ellos por medio del estándar IEEE 802.11p, pero en estos casos es necesario desplegar un tipo de infraestructura denominada RSU (*Road-Side Unit*) para interactuar con los vehículos circundantes [2], [3].

Los RSUs básicamente sirven para enviar información de los vehículos que se encuentren cerca de la infraestructura hacia otros RSUs que se encuentren distantes [2] y, con ello también, establecer una comunicación con otros vehículos que se encuentren lejos para que estos, a su vez, por ejemplo, puedan determinar el mejor camino que deberían seguir para evitar aglomeraciones de tráfico.

Desplegar RSUs conlleva un costo extra para aquellas entidades que deseen brindar el servicio con vehículos inteligentes por lo que se propone utilizar, como alternativa, una infraestructura que ya se encuentre instalada como la red celular LTE (*Long Term Evolution*); así para la comunicación entre vehículos de larga distancia se podría usar la red LTE y para corta distancia el estándar IEEE 802.11p. La combinación de los estándares IEEE 802.11p y LTE forma una red heterogénea HetNet (*Heterogeneous Network*), dicha red debe cumplir ciertas condiciones para no saturar la red LTE [4], [5], ya que si todos los vehículos envían paquetes hacia los eNodeBs, pueden saturar la red causando problemas a los UEs (*User Equipment*) de los usuarios que se encuentren dentro del rango de cobertura en la que operan junto con la red vehicular. En la literatura, para mitigar este efecto se propone que exista un vehículo cabecera, llamada CH (*Car Header*), que se encargue de recolectar la información de los vehículos circundantes y reenvíe esos datos al eNodeB [4], [5], [6].

Por otro lado, se puede considerar que, también existe un tipo de tecnología para automóviles inteligentes que se denomina tren de carga o caravanas de vehículos (*Platooning*), en donde la velocidad y el frenado de cada automóvil se encuentra sincronizado dado que comparten datos a través de redes vehiculares [7], [8].

Este artículo presenta la simulación de red HetNet para una caravana de vehículos (*Platooning*) y se evalúa su desempeño definiendo dos escenarios dentro de un sector del centro histórico de Quito. Los resultados para dichas evaluaciones se presentan en términos de paquetes IEEE 802.11p transmitidos, paquetes IEEE 802.11p recibidos, eficiencia o PDR (*Packet Delivery Ratio*) IEEE 802.11p, el retardo o *Delay* IEEE 802.11p, paquetes LTE transmitidos, paquetes LTE recibidos, eficiencia o PDR LTE y el retardo o *Delay* LTE. El primer escenario considerará dos parámetros variables que serán la potencia de transmisión de los vehículos y la posición del CH dentro de la caravana de vehículos. Mientras que, el segundo escenario se analiza el intervalo de envío de mensajes IEEE 802.11p y a la cantidad de vehículos que pertenecen a cada caravana de vehículos.

2. Marco Teórico

2.1. Redes Vehiculares (VANETs)

Las redes vehiculares, conocidas como VANET (*Vehicular Ad-hoc Network*), son redes inalámbricas orientadas a la comunicación entre vehículos. Los automóviles pasan a ser los nodos que se comunican entre sí, sin que exista ninguna infraestructura existente [9]. Una VANET se utiliza para informar de cualquier evento que se encuentre en la carretera, entre las aplicaciones más recientes se incluye la transmisión de mensajes sobre la posición, la velocidad, etc. de tal manera que la conducción sea más sustentable gracias a un manejo asistido, o de plano que el vehículo se maneje por su cuenta sin la ayuda del ser humano [6].

Las VANETs tienen algunas configuraciones las cuales se denominan generalmente como V2X (*Vehicule to Everything*) donde la X puede ser otro tipo de objeto; así con otro vehículo se denomina V2V (*Vehicule to Vehicule*), con alguna infraestructura, se conoce como V2I (*Vehicule to Infrastructure*), donde se puede considerar a LTE o a un RSU [10], con peatones para crear una comunicación V2P (*Vehicule to Pedestrian*), por ejemplo en el intercambio de información de los teléfonos móviles de los transeúntes con los vehículos que se encuentren cerca. En la Fig. 1 se visualizan algunos de estas distintas configuraciones, entre ellas V2V y V2I [11].

2.2. LTE (Long Term Evolution)

En el año 2009, el 3GPP (*The 3rd Generation Partnership Project*), grupo encargado de lanzar las especificaciones para comunicaciones móviles, publicó el *Release 8* en el cual dio a conocer las características de la red LTE. Posteriormente, en el 2011 se publicó el *Release 10* conocido como *LTE-Advanced* y en el 2016 le *Release 13* conocido como *LTE-Advanced Pro* [12]. El último *Release* publicado acerca de LTE es el número 14, lanzado en el 2017, en el cual se incluye un cimiento para la nueva tecnología de comunicaciones móviles de quinta generación y también describe el soporte de LTE con los servicios V2X utilizados en VANETs [12].

Las especificaciones de LTE detallan que, la red está formada de la parte de Core, llamada EPC (*Evolved Packet Core*), y de la parte de Radio, llamada E-UTRAN (*Evolved-UTRAN*). Entre las características de LTE se incluyen que, es una tecnología totalmente IP (*Internet Protocol*), con una mejor cobertura, altas velocidades de transmisión de datos, latencia reducida, soporte MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), técnica de transmisión OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) y con ancho de banda variables de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz.

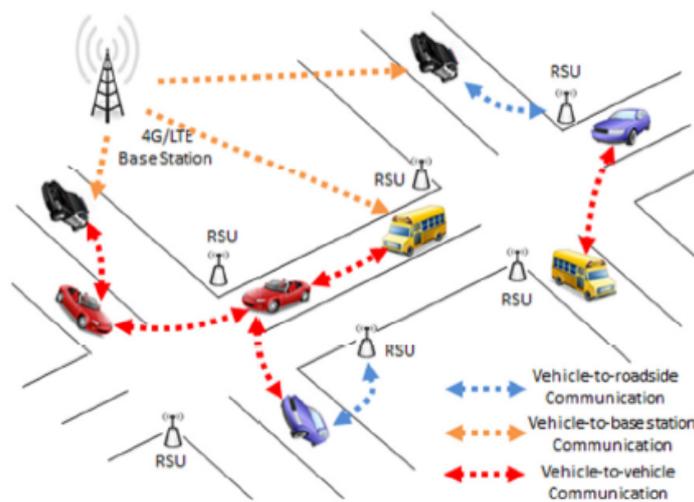


Figura 1. Configuraciones de VANET en interacción con LTE [10].

2.3. Interacción IEEE 802.11p con LTE

Una red heterogénea, HetNet se define como un tipo de red en donde convergen o funcionan distintos sistemas operativos y/o protocolos de comunicación [13], por ejemplo, una HetNet se conforma por dos redes, una red celular (LTE-A) y una red inalámbrica IEEE 802.11p, teniendo una comunicación V2I. Una forma común de aplicación, en las redes vehiculares, es la caravana de vehículos, también conocida como *Platooning*, en donde la velocidad y el frenado de cada automóvil se encuentra sincronizado dado que comparten datos a través de redes vehiculares, sin embargo, para que sea una comunicación eficiente se usa un vehículo cabecera CH (*Car Header*) para disminuir la sobrecarga de la red.

- Acceso a la red LTE-A para IEEE 802.11p

Un punto para considerar en las redes *Platooning* es la reducción o limitación del número de *Gateways* o CH (*Car Header*) para bajar la sobrecarga de señalización de movilidad a pesar de que cada auto pueda por sí mismo conectarse a la radio base LTE-A. Esto se logra mediante un nuevo esquema que elige de manera eficiente los CHs móviles para transmitir el tráfico de los automóviles vecinos hacia las SC (*Small Cells*). SC básicamente son nodos intermedios para acceso a la red LTE, los cuales son de tamaño reducido y además en potencia de transmisión [14].

- *Backhaul* de SC LTE-A

Al utilizar SCs, el rango de alcance de la señal se ve mermada lo que genera frecuentes traspasos o *handovers* entre celdas y aumenta la señalización hacia el EPC. Una alternativa para sobrellevar el problema que se

especifica anteriormente es utilizar un esquema de movilidad local basado en anclajes de k-saltos que consta de tres procedimientos los cuales son intradominio, interdominio de k-saltos e interdominio [6]. Los saltos los realiza el o los paquetes que se dirigen hacia el *Car Header*.

- Selección de *Car Header* móvil para comunicaciones V2I.

Cuando se necesita precautelar la estabilidad y fiabilidad de una conexión, se define y aplica un algoritmo de agrupación de clústeres. En este caso el término clúster se acuña a un grupo de vehículos que se encuentran cerca. Existen varios algoritmos para la selección del *Car Header* y al escoger alguno se toma en cuenta que se garantice la estabilidad de la comunicación y la vida útil del enlace que se crea entre los vehículos pertenecientes a un clúster. También se trata de disminuir la sobrecarga de control de enrutamiento para los automóviles que están dentro de distintos clústeres.

Se define un primer algoritmo, que actualmente es el más simple y utilizado, que trabaja con LET (*Link Expiration Time*) y RET (*Route Expiration Time*) estableciendo un enfoque descentralizado. LET viene a ser un algoritmo en donde un nodo envía un paquete si y solo si se sabe que es el destino correcto, luego recibe un ACK indicando que el paquete llega correctamente, para este tipo de algoritmo se tiene un tiempo de vencimiento del paquete. RET viene a ser parecido a LET con la diferencia que el paquete tiene un determinado número de saltos definido por lo que, si no llega hacia su destino al saltar entre los nodos, el paquete desaparecerá [15].

Con este enfoque a un automóvil se añade una interfaz 802.11p junto a una con soporte a comunicaciones celulares ya sea UMTS o LTE. Se forman clústeres agrupándose dinámicamente los automóviles según métricas como RSS (*Receive Signal Strength*), el LET o el RET. Una vez formado el clúster se escoge un número mínimo de automóviles que actuarán como *Car Header* entre la VANET y la tecnología celular que en este caso será LTE. Las métricas tomadas en el primer algoritmo son en teoría fáciles de implementar, sin embargo, en cuestión a sobrecargas dan demasiados problemas. Es necesario tener una cantidad de paquetes de señalización muy grande para mantener los clústeres por lo que la red LTE podría llegar a saturarse [5], [6].

Zhioua propone un algoritmo basado en la selección de *Car Header* mediante lógica difusa para generar una red híbrida entre VANET y LTE-A. Este algoritmo también utiliza LET y RSS al igual que el algoritmo que se explica en tercer párrafo de este capítulo, pero añade clases de tráfico QoS (*Quality of Service*) y la carga que genera el *Car Header* para encontrar una puerta de enlace. Se esperaba que la sobrecarga de paquetes de señalización hacia la red sea menor, sin embargo, sucede todo lo contrario al tratar de obtener más información de datos para decidir qué vehículo será el *Car Header*.

El segundo algoritmo que se utiliza para escoger un *Car Header*, plantea tomar a los autobuses u otro vehículo que tenga una ruta fija cómo las puertas de enlace, sin embargo, se tiene el inconveniente de que ya que no siempre están disponibles en las carreteras además que la calidad del canal no es de muy buena calidad.

El último enfoque conocido cómo centralizado tiene muy buenos resultados si se lo utiliza en situaciones de V2I (*Vehicle to Infrastructure*). Para tener menor sobrecarga, este enfoque aprovecha la macro celda de LTE con lo que se logra gestionar de mejor manera los clústeres. Uno de los investigadores de este algoritmo, llamado X. Duan, muestra un algoritmo capaz de escoger un auto principal que se conoce como cabeza de grupo el cual toma el tráfico de vehículos vecinos para luego comunicarse con la estación base por medio del SDN (*Software-Defined Networking*). Se agrega redundancia en este enfoque ya que se tiene un nodo dual para ser cabezal del clúster, ya que con ello se tendría un respaldo en caso de fallas. El algoritmo que se tiene en el enfoque centralizado tiene dos pasos que son los siguientes:

- Primero, se inicializa los clústeres donde los vehículos son asignados a cada clúster.
- Luego la cabeza del clúster es seleccionada usando programación lineal de acuerdo con la SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) y a la proximidad de la velocidad del vehículo a la velocidad promedio del clúster.

En la Fig. 2 se muestra un esquema de una HetNet en donde se forman grupos de vehículos los cuales tienen un *Car Header* que es de color rojo. Los demás vehículos de la caravana de color amarillo forman comunicaciones V2V con el *Car Header* y este a su vez forma comunicaciones V2I con el e-NodeB. Los e-NodeBs se comunican entre sí mediante la interfaz X2.

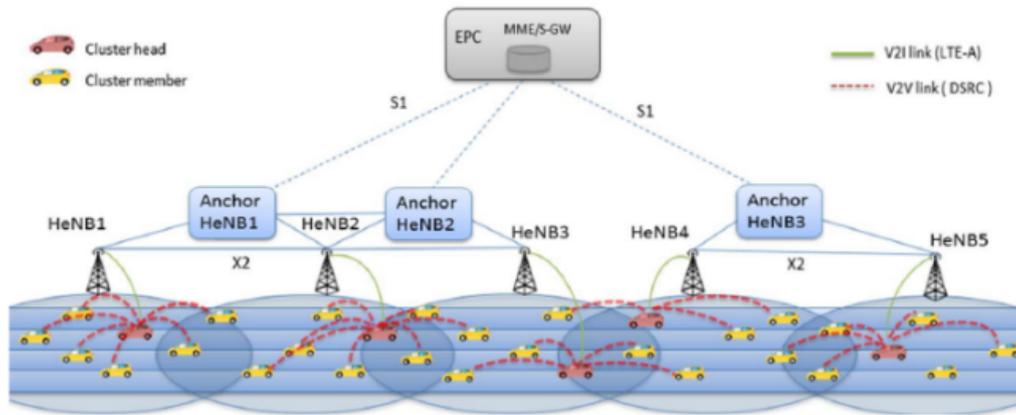


Figura 2. Conformación de HetNet [6].

3. Diseño e implementación de las simulaciones

3.1. Sistema operativo y simuladores

Se utiliza OSM (*Open Street Maps*) [16] para generar los mapas del sector que se desea, sin embargo, en algunas ocasiones el mapa obtenido tiene ciertos objetos o calles que no son de interés para la simulación del tráfico vehicular por lo que se necesita un software adicional que permita corregir estos problemas. El software encargado de corregir a los mapas obtenidos se denomina como JOSM (*Java Open Street Map Editor*), en donde se pueden eliminar calles u objetos con el fin de optimizar el mapa donde se desea tener el tráfico vehicular.

Los simuladores que se utilizan son de código abierto por lo que su rendimiento es superlativo si se los ejecutan en un sistema operativo de las mismas características. En este caso se escoge utilizar una distribución de Linux como lo es Ubuntu en su versión 16.04.

Para la simulación del tráfico vehicular se utiliza SUMO (*Simulation of Urban Mobility*). Este software crea escenarios de movilidad en donde circulan automóviles, buses, motocicletas e incluso peatones [17].

Las redes de comunicación inalámbricas se simulan en OMNET++ el cual es un simulador de eventos discretos el cual se encuentra basado en C++ [18]. Este simulador ayudará a implementar las redes de comunicaciones inalámbricas de corto alcance del estándar IEEE 802.11p y la red celular LTE.

Es necesario vincular SUMO y OMNET++ para tener la simulación de la HetNet vehicular completa por lo que se utiliza la librería VEINS para realizar la unión de los simuladores. La forma en que trabaja VEINS se resume en que la simulación de tráfico se la ejecuta mediante SUMO y la simulación de redes se la ejecuta en OMNET++, pero para unir las dos ejecuciones se utiliza una sub-herramienta de VEINS, denominada MiXiM que se encarga de la parte de capa física y permite modelar distintos tipos de interferencia de radio y desvanecimiento a pequeña y a gran escala [19].

3.2. Generación de Mapa

Para realizar el diseño de la HetNet se debe tomar en cuenta en primer lugar el área donde se desea que los vehículos circulen. Se considera el centro histórico de la ciudad de Quito con un perímetro de aproximadamente 3.6 Km que tiene como límites las calles Galápagos al norte, Rocafuerte al sur, Imbabura al este y Venezuela al oeste. En la Fig. 3 se muestra el área en donde se implementará la HetNet vehicular en el centro histórico de Quito.

Para la ubicación de las estaciones base (eNBs) LTE se toma como referencia la ubicación de uno de los operadores de telefonía celular de Ecuador. En este caso, se escoge a CONECEL S.A, en Fig. 4 se muestra el mapa de cobertura de la red celular, en donde se observa el nivel de la señal de la red [20], el color verde indica que en la zona se cuenta con una intensidad alta de la señal de la red celular mayor a los -100 dBm, de color azul, se tiene una intensidad media de la señal de la red celular entre -100 dBm y -120 dBm y de color rojo se tiene la señal baja ya que la intensidad de señal es menor a -120 dBm. Además, en el mapa se encuentran unos iconos de antenas que indican la posición real de donde se encuentran aproximadamente los eNBs de la red en ese sector [21].

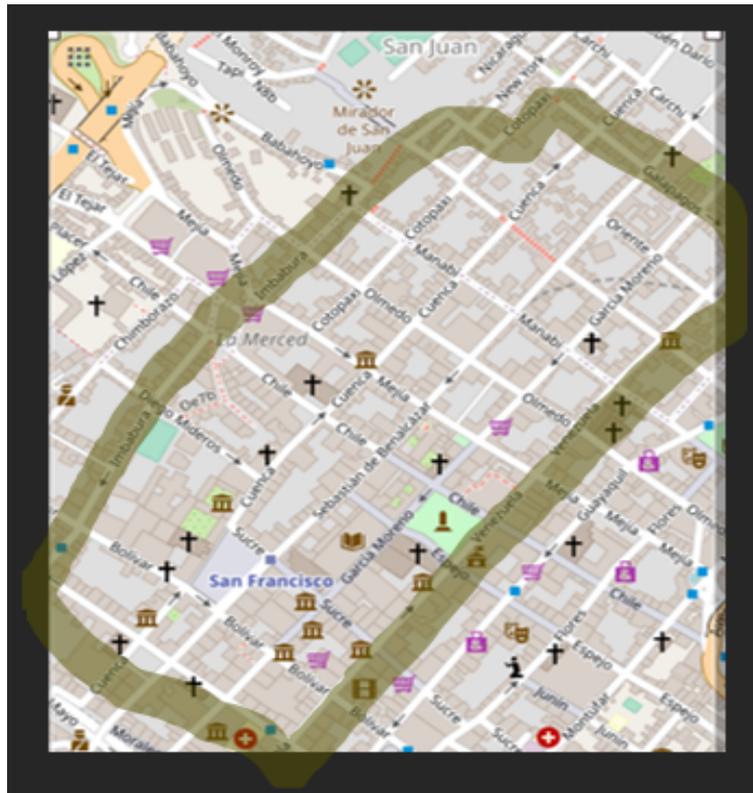


Figura 3. Área donde se implementa la HetNet vehicular.

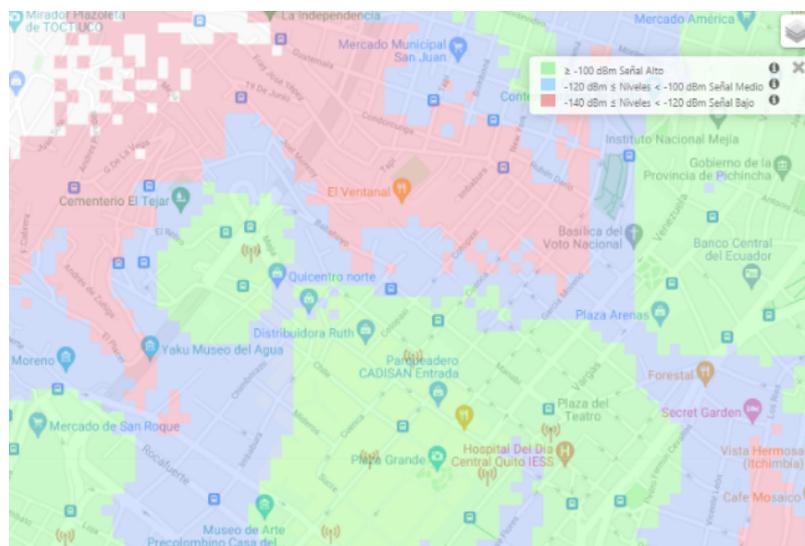


Figura 4. Cobertura LTE CONECEL S. A. [20].

Una vez que se ha determinado el sector en donde se implementa la HetNet vehicular, se genera un mapa con la ayuda de la herramienta online OSM. En la Fig. 5 se muestra el área seleccionada, en (a) el área seleccionada con OSM y en (b) el mapa que se obtiene con OSM. En el mapa generado con OSM de la Fig. 5(b) se observa la vía del Metro de Quito, marcado de color rojo; este carril no es relevante para este trabajo por lo que se elimina con la ayuda del software JOSM. En la Fig. 5(c) se tiene el mapa final corregido.

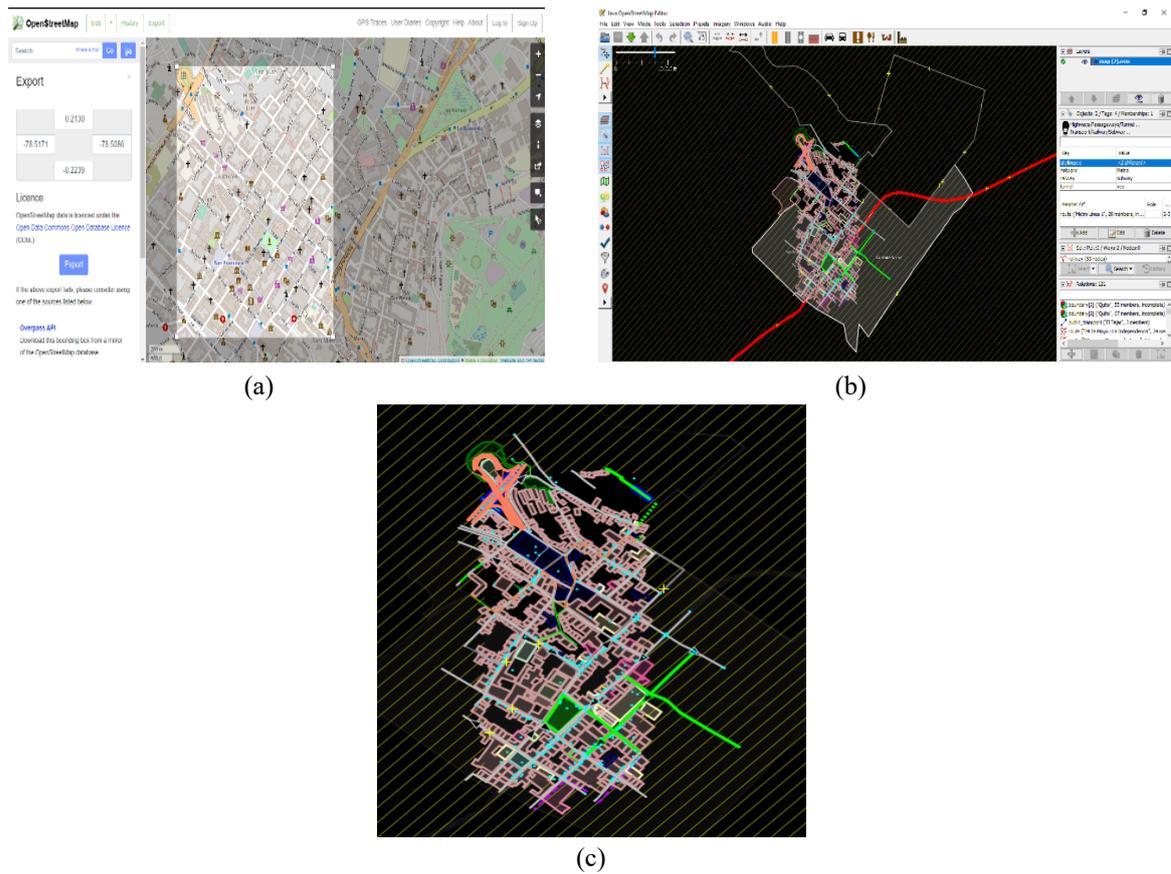


Figura 5. Área seleccionada (a) sector del centro histórico seleccionado con OSM, (b) mapa generado con OSM y (c) mapa editado con JSON sin línea del metro.

3.3. Inserción de tráfico vehicular

Cuando ya se tiene el mapa final, el tráfico vehicular se añade dentro del mapa usando SUMO en donde se debe colocar ciertas líneas de comando en un terminal de Linux. En este caso se ejecuta un comando el cual genera cien (100) vehículos con posiciones y rutas distintas dentro del mapa como se observa en la Fig. 6(a) y Fig. 6(b).

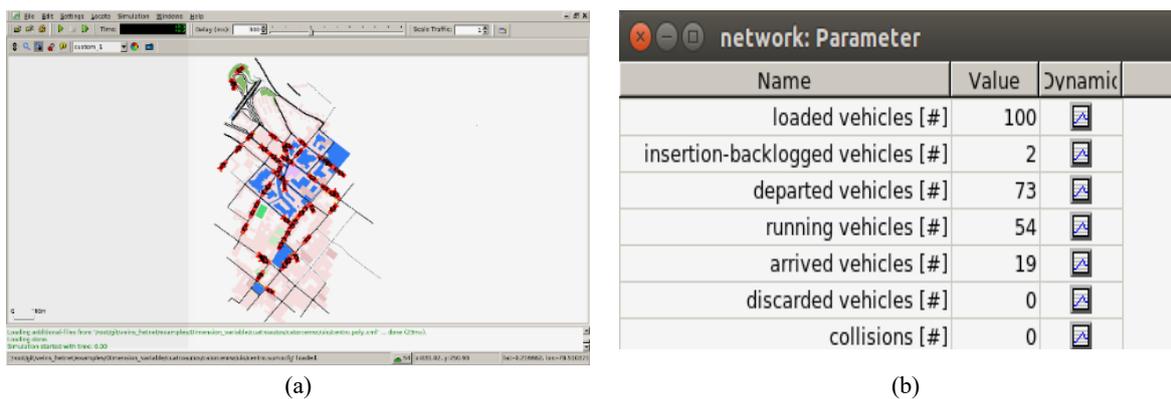


Figura 6. Tráfico vehicular (a) Simulación vehicular en SUMO, (b) Cantidad de vehículos generados.

De los cien (100) vehículos insertados, se consideran solo cinco (5) para generar las rutas que deben tomar las caravanas de vehículos. Para esto, se modifican los archivos que se obtienen de SUMO, donde se encuentran las coordenadas de aparición de los vehículos, el tiempo en que ingresan a la simulación y la ruta que seguirán.

Posteriormente, se modifican nuevamente los archivos que se obtienen de SUMO para incorporar más vehículos que sigan una misma trayectoria generando caravanas de vehículos como se lo observa en la Fig. 7.

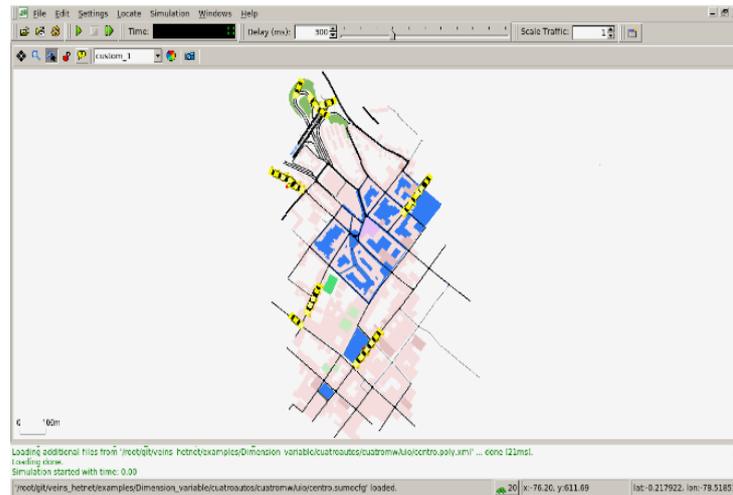


Figura 7. Creación de caravanas de automóviles.

3.4. Creación de HetNet

Al código de OMNeT++, en *Github* [22], donde una red HetNet envía y recibe paquetes de alerta en los vehículos por medio de las interfaces IEEE 802.11p y LTE, se añaden características propias de este trabajo. En la HetNet vehicular uno solo de los vehículos del grupo recoge información de los automóviles de las caravanas por medio de IEEE 802.11p y envía esa información a través de LTE hacia otras caravanas de vehículos. Mediante OMNeT++ se configura la posición de las estaciones bases en el mapa como se observa en la Fig. 8.

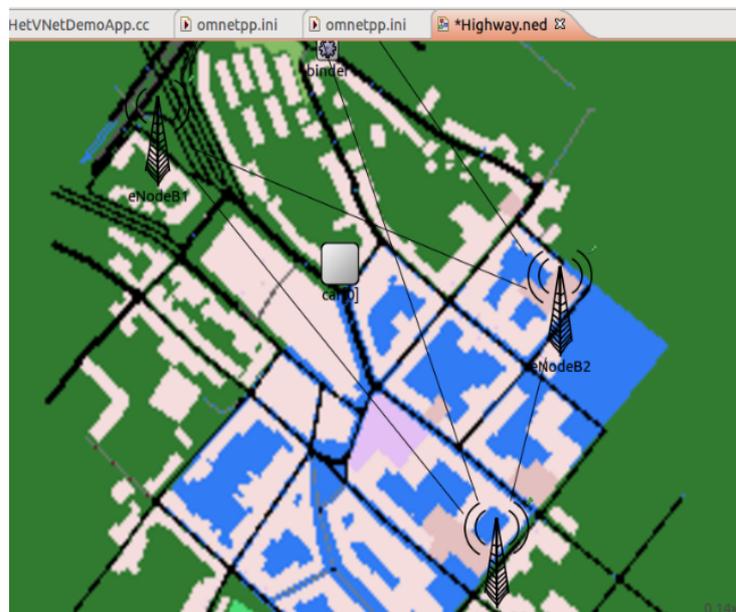


Figura 8. Configuración de estaciones base.

4. Resultados de las simulaciones

Para evaluar el comportamiento de la HetNet de caravanas de vehículos en un determinado sector del centro histórico de Quito, donde se han colocado tres (3) eNBs repartidos en el mapa según la información que la página web de Claro Ecuador suministra. Se considera que la potencia de los eNBs es de 20 mW. Se crean dos escenarios, donde se consideran diferentes parámetros de evaluación, los cuales se detalla a continuación.

- Primer escenario.

Se analiza el número de paquetes transmitidos y recibidos tanto IEEE 802.11p como LTE para diferentes posiciones del CH dentro de la caravana de vehículos, en función de la potencia de transmisión de la OBU del vehículo, el cual trabaja bajo el estándar IEEE 802.11p para una comunicación a corto alcance. Se consideran 5 caravanas de diez (10) vehículos cada una. La potencia de transmisión varía de 0 a 20 mW.

- Segundo escenario.

Se analiza el número de paquetes transmitidos y recibidos tanto IEEE 802.11p como LTE cuando se tienen diferente número vehículos dentro de cada caravana, en función del intervalo tiempo para el envío de mensajes IEEE 802.11p dentro de la red. Se consideran 5 caravanas con un número variable de vehículos (2, 4, 6, 8 y 10 vehículos). Se considera que el intervalo de tiempo de envío de los mensajes varía de 100 a 1000 ms en pasos de 100.

4.1. Primer escenario

En la Fig. 9 se observa el número de paquetes IEEE 802.11p transmitidos por el CH vs la potencia de transmisión (en mW) de la OBU (*On Board Unit*) del vehículo. De esta figura, se concluye que, la cantidad de paquetes transmitidos, está ligado al tiempo en que el CH permanece en la simulación. Siguiendo esa premisa, se observa que cuando el CH se encuentra al inicio de la caravana, este aparecerá al inicio de la simulación, por lo que la cantidad de paquetes transmitidos por los otros automóviles que tratan de alcanzar al CH será mayor porque la permanencia del CH en la simulación será superior a las demás. Todo lo contrario, sucede cuando el CH se encuentra ubicado al final de la caravana, ya que tendrá menos tiempo en la simulación, además, existirán menos vehículos en cierto instante ya que estos empezarán a salir de la simulación y ya no transmitirán paquetes destinados al CH. Con el CH en una posición intermedia se observa que a pesar de que el CH no aparece al inicio de la simulación, los demás vehículos si permanecen enviando paquetes constantemente hasta que estos salen de la simulación, sin embargo, en este escenario, cuando el CH sale de la simulación esta termina por lo que ya no se emitirán más paquetes.

En la Fig. 10 se presenta el número de paquetes IEEE 802.11p recibidos por el CH versus la potencia de transmisión (en mW) de la OBU del vehículo para el estándar IEEE 802.11p para tres posiciones del CH. De los resultados expuestos se observa que, a medida que aumenta la potencia de transmisión, los paquetes llegan a su destino hasta un punto en que parece que la cantidad de paquetes recibidos es constante. Además, la cantidad de paquetes que recibe el CH, también depende de su posición dentro de la caravana, ya que el CH recibe más paquetes cuando se encuentra en la mitad de la caravana porque su distancia a los demás automóviles es menor a que si se encontrará al inicio o al final de la caravana de vehículos.

La Fig. 11 muestra el *Packet Delivery Ratio (PDR)* en función de la potencia de transmisión del estándar IEEE 802.11p de la OBU del vehículo (en mW) para tres posiciones del CH. El PDR se define como la relación entre el número total de paquetes entregados con respecto al número total de paquetes enviados. Como se observa, existe un rendimiento mayor cuando el CH esta al final de la caravana ya que tiene aproximadamente el 90% de eficiencia debido a que el tiempo de simulación es menor comparado con las otras posiciones del CH. Cuando el CH está en la mitad de la caravana, la eficiencia es del 80% aproximadamente, en esta situación la posición del CH permitirá que se capte de mejor manera los paquetes IEEE 802.11p que los demás vehículos envían. Cuando el CH se encuentra al inicio de la caravana se tiene una eficiencia del 60% aproximadamente, esto se debe al tiempo de simulación, además de que se tiene una distancia considerable entre el CH y el primer vehículo de la caravana.

Se necesita que llegue cierta cantidad de paquetes IEEE 802.11p al CH para que estos puedan reenviarse a través de la interfaz LTE. El número de paquetes que el CH renvía hacia la red LTE en función de la potencia de transmisión de la OBU se presenta en la Fig. 12. En los resultados se observa que existe mayor cantidad de reenvíos hacia la red LTE cuando el CH se encuentra en la mitad de la caravana.

La cantidad de paquetes LTE que recibe el CH para diferentes posiciones del CH para diferentes valores de la potencia de transmisión de la OBU del vehículo se presenta en la Fig. 13. Los resultados dependen de la posición del CH ya que esto determina a que distancia se encuentra de los eNBs. En esta se observa que, hasta cierto punto, cuando el CH se encuentra en la mitad de la caravana de vehículos, tiene una cantidad de paquetes recibidos

superior a las demás simulaciones, pero llega a tomar un valor constante similar al de la simulación cuando el CH se encuentra al inicio de la caravana de vehículos.

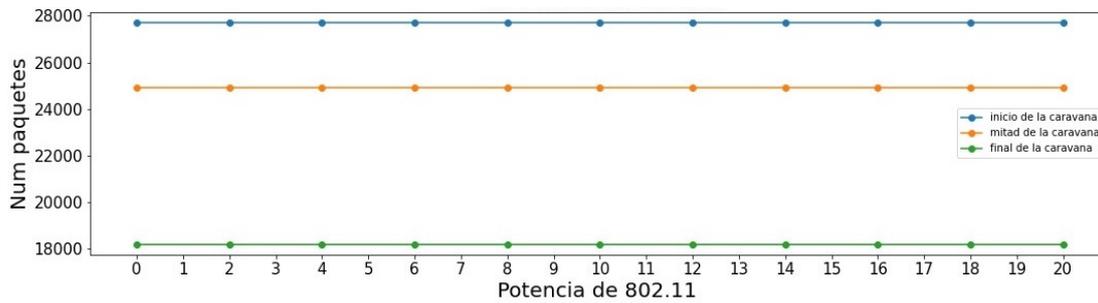


Figura 9. Número de paquetes IEEE 802.11p transmitidos por el CH vs potencia de transmisión de la OBU del vehículo.

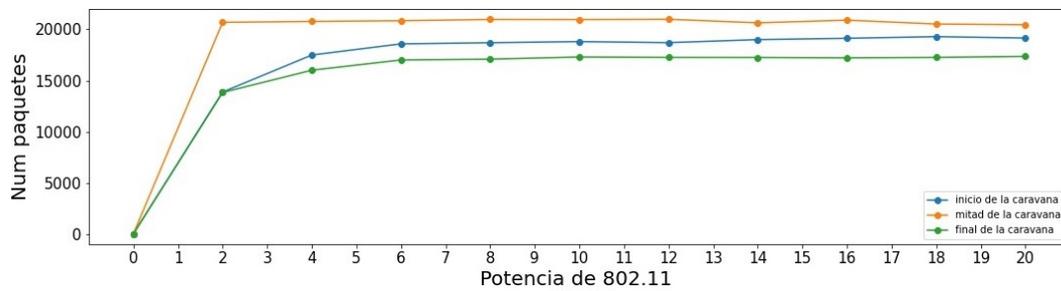


Figura 10. Paquetes IEEE 802.11p recibido por el CH vs potencia de transmisión de la OBU del vehículo.

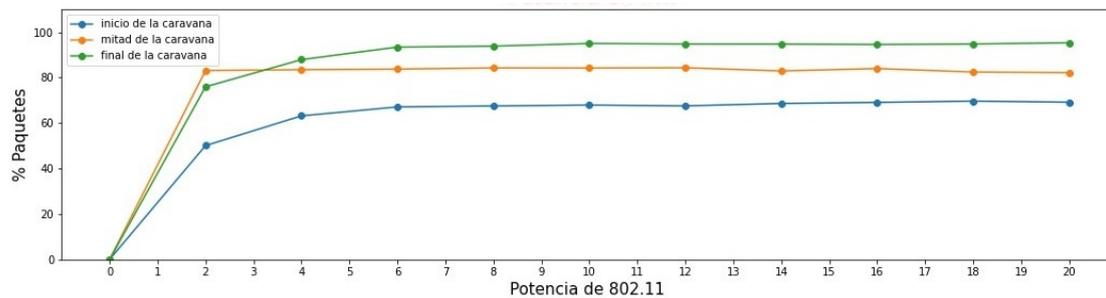


Figura 11. Packet Delivery Ratio vs potencia de transmisión de la OBU del vehículo.

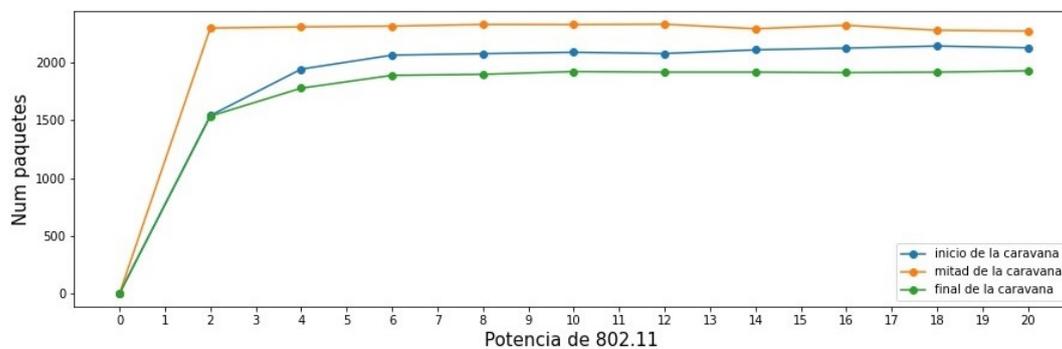


Figura 12. Número de paquetes que el CH transmite sobre la red LTE vs potencia de transmisión de la OBU del vehículo.

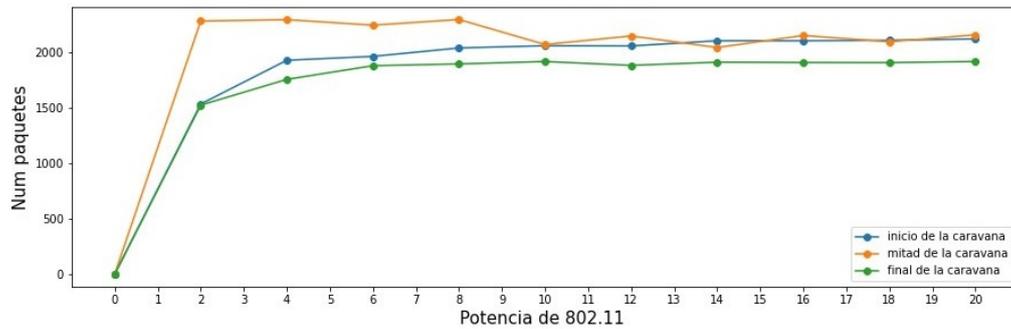


Figura 13. Número de paquetes LTE recibidos en tres posiciones del CH vs potencia de transmisión de la OBU del vehículo.

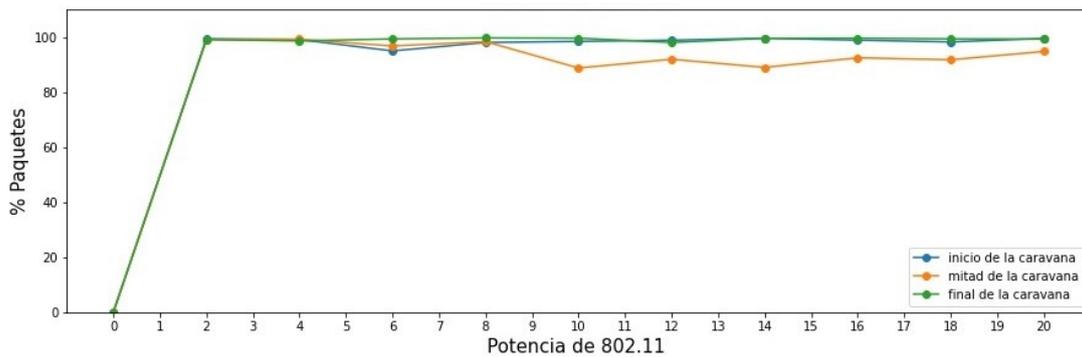


Figura 14. Packet Delivery Ratio LTE vs potencia de transmisión de la OBU del vehículo.

En la Fig. 14 se observa el *Packet Delivery Ratio* (PDR) de los paquetes LTE cuando la potencia de transmisión del estándar IEEE 802.11p es variable. Se observa que, para las tres posiciones del CH, el rendimiento de la red celular para esta HetNet es superior al 80% ya que el rango de cobertura para LTE es mayor que el del estándar IEEE 802.11p.

4.2. Segundo escenario

La Fig. 15 muestra el número de paquetes IEEE 802.11p transmitidos cuando se consideran diferentes valores del intervalo de tiempo para el envío de mensajes IEEE 802.11p dentro de la red, se analiza dicho comportamiento para diferente número de vehículos dentro de la caravana o grupo de vehículos. Se puede apreciar que mientras más vehículos existen dentro de la simulación, la cantidad de paquetes IEEE 802.11p que se transmiten hacia el CH es mayor. Además, se observa que este comportamiento se mantiene si se varía el intervalo de tiempo para dicho envío.

De forma similar, el número de paquetes IEEE 802.11p recibidos para diferentes valores del intervalo de envío de mensajes IEEE 802.11p se presenta en la Fig. 16. Se observa que los resultados son similares a los presentados en la Fig. 15 (paquetes enviados), ya que cuando existe mayor cantidad de vehículos en la caravana se envían más paquetes IEEE 802.11p hacia el CH.

Asimismo, en la Fig. 17 se presenta el *Packet Delivery Ratio* de los paquetes IEEE 802.11p en función del intervalo de envío de mensajes IEEE 802.11p para diferente número de vehículos que conforman una caravana de vehículos. Se concluye que, cuando existe menor cantidad de vehículos, la eficiencia es mayor y esto se debe a que no se generan tantos paquetes en cola y la mayoría puede llegar a su destino que es el CH.

La Fig. 18 muestra el número de paquetes LTE que el CH transmiten sobre la red cuando se varía el intervalo de envío de los mensajes IEEE 802.11p cuando se consideran diferente número de vehículos dentro de las caravanas. El comportamiento es similar a las comunicaciones de corto alcance (IEEE 802.11p) entre los vehículos y el CH, en número de paquetes transmitidos sobre la red LTE decrece con el número de vehículos dentro de la caravana es menor ya que el envío de paquetes LTE depende de que cierta cantidad de paquetes que lleguen correctamente al CH para generar el reenvío de la información hacia el eNB.

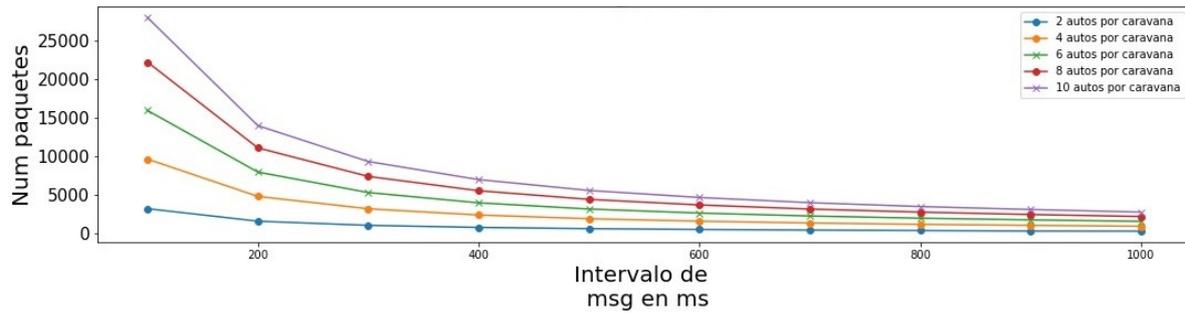


Figura 15. Número de paquetes IEEE 802.11p vs Intervalo de mensajes IEEE 802.11p.

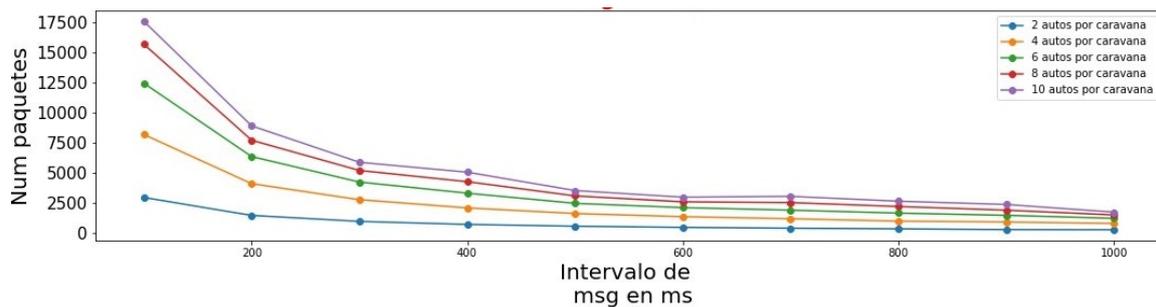


Figura 16. Número de paquetes IEEE 802.11p recibidos vs Intervalo de mensajes IEEE 802.11p.

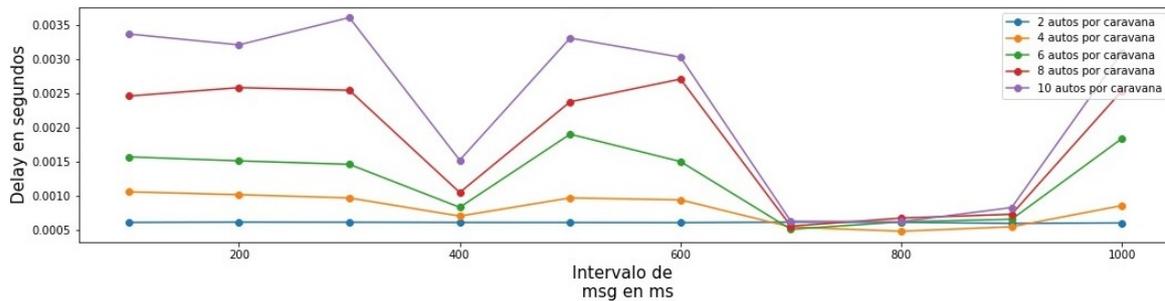


Figura 17. Packet Delivery Ratio de mensajes IEEE 802.11p vs Intervalo de mensajes IEEE 802.11p.

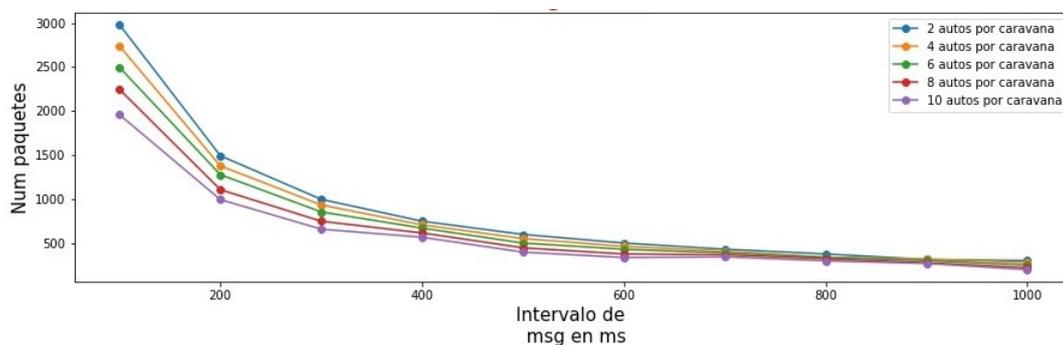


Figura 18. Número de paquetes LTE transmitidos por el CH vs Intervalo de envío de mensajes IEEE 802.11p.

La Fig. 19 muestra cuantos paquetes LTE se recibe en el servidor y en los eNBs cuando se plantea condiciones variables como el intervalo de envío de mensajes IEEE 802.11p y la cantidad de vehículos que conforman las caravanas. Esta gráfica muestra un comportamiento exponencial decreciente similar al de envío de paquetes LTE, sin embargo, se podrá verificar su verdadero comportamiento cuando se analice la eficiencia en el siguiente literal.

La Fig. 20 muestra la eficiencia LTE cuando se tiene parámetros variables como el intervalo de envío de mensajes IEEE 802.11p hacia el CH y la cantidad de vehículos presentes en cada caravana. La gráfica no muestra ningún patrón, sin embargo, se puede apreciar que sea cual sea la variable que cambia, la eficiencia será mayor al 80%. Estas fluctuaciones e irregularidades en la eficiencia LTE puede ser producto de que existe desvanecimiento a gran o pequeña escala por el recorrido de los automóviles o por objetos que generen pérdidas de paquetes, además de que la posición de los eNBs no generaría el mismo rango de cobertura para los CHs.

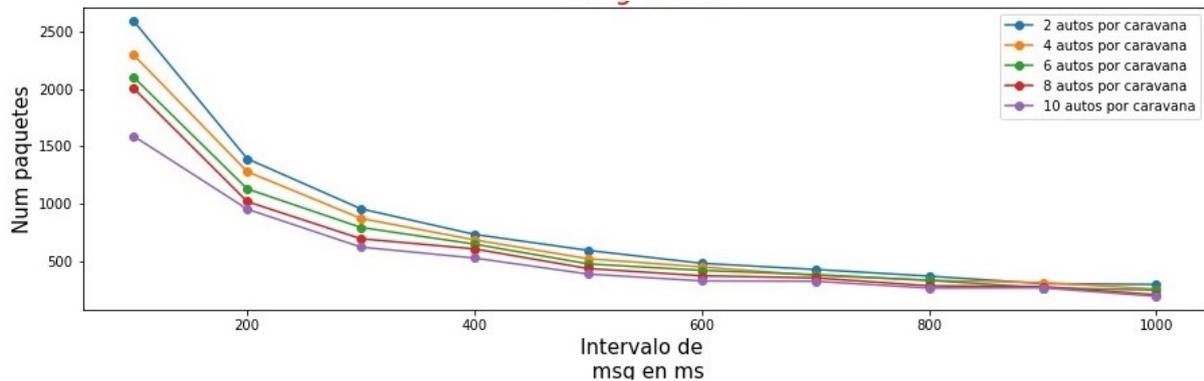


Figura 19. Número de paquetes LTE recibidos vs Intervalo de mensajes para estándar IEEE 802.11p.

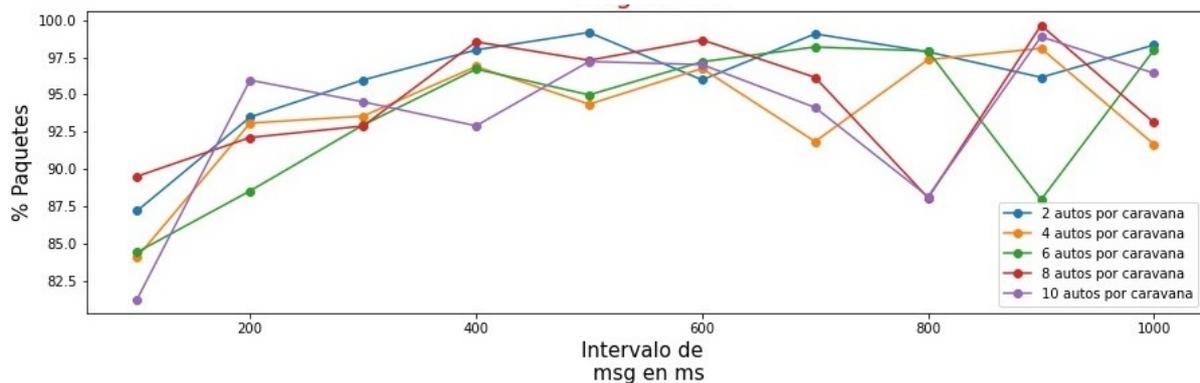


Figura 20. PDR de paquetes LTE vs Intervalo de mensajes para estándar IEEE 802.11p.

5. Conclusiones

Se evaluó, a través de simulaciones, el comportamiento de una HetNet considerando como un caso práctico un sector del centro histórico de Quito, donde se observa que han considerado dos escenarios de simulación. Del primer escenario se concluye que, la posición del CH juega un papel importante dentro de la HetNet, y al colocar el CH en la mitad de la caravana, los paquetes que transmitidos tanto IEEE 802.11p como LTE no se pierdan en comparación con colocar el CH al inicio o al final de la caravana. Además, la potencia de transmisión de la OBU que trabaja bajo el estándar IEEE 802.11p de aproximadamente 10 mW y con el CH en la mitad de la caravana se logra la mejor eficiencia del sistema. Para el segundo escenario se observa que el número de vehículos que conforman la caravana tiene un impacto en el número de paquetes transmitidos y recibidos IEEE 802.11p. así, cuando mayor es cantidad de vehículos que trata de comunicarse con el CH muchos paquetes se pierden en ese proceso por temas de desvanecimiento o a encolamiento en buffers. Sin embargo, para analizar el número de paquetes LTE se observa que la eficiencia siempre es mayor al 80% independiente de la cantidad de vehículos presentes en las caravanas porque para generar un envío de paquetes LTE por parte del CH, primero se debe llegar a tener cierta cantidad de paquetes IEEE 802.11p recibidos en el CH.

7. Referencias

- [1] Gestión Digital. (2020). *Mientras el transporte público sea deficiente, el parque automotor seguirá engordando*. <https://www.revistagestion.ec/sociedad-analisis/mientras-el-transporte-publico-sea-deficiente-el-parque-automotor-seguira>
- [2] Ghorri, M. R., Zamli, K. Z., Quosthoni, N., Hisyam, M., Montaser, M. (2018). *Vehicular Ad-hoc Network (VANET): Review*. IEEE International Conference on Innovative Research and Development (ICIRD), Bangkok, Thailand. <https://doi.org/10.1109/ICIRD.2018.8376311>
- [3] Caiza Changoluisa, M. D. (2017). *Simulación de una VANET para un sector del centro histórico de la ciudad de Quito como apoyo a la movilidad vehicular* [Tesis de grado]. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.
- [4] Rémy, G., Senouci, S. M., Jan, F., Gourhant, Y. (2011). *LTE4V2X: LTE for a centralized VANET organization*. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), Houston, TX, USA. <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2011.6133884>
- [5] Ahmad, I., Noor, R. M., Ahmady, I., Ali Shah, S. A., Yaqoob, I., Ahmed, E., Imran, M. (2018). VANET–LTE based heterogeneous vehicular clustering for driving assistance and route planning applications. *Computer Networks*, 145, 128–140. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.08.018>
- [6] Chekkouri, A. S., Ezzouhairi, A., Pierre, S. (2018). A new integrated VANET-LTE-A architecture for enhanced mobility in small cells HetNet using dynamic gateway and traffic forwarding. *Computer Networks*, 140, 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.04.013>
- [7] Bergenheim, C., Pettersson, H., Coelingh, E., Englund, C., Shladover, S., Tsugawa, S. (2012). *Overview of platooning systems*. 19th ITS World Congress, Viena, Austria.
- [8] Lu, D., Li, Z., Huang, D. (2017). *Platooning as a service of autonomous vehicles*. IEEE 18th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM), Macau, China. <https://doi.org/10.1109/WoWMoM.2017.7974353>
- [9] The Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2016). *IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems LAN and MAN --Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Std 802.11-2016”, IEEE Std 802.11-2016 (Revision IEEE Std 802.11-2012)*. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7786995>
- [10] Eze, E. C., Zhang, S., Liu, E., (2014). *Vehicular ad hoc networks (VANETs): Current state, challenges, potentials and way forward*. 20th International Conference on Automation and Computing, Cranfield, UK. <https://doi.org/10.1109/ICoAC.2014.6935482>
- [11] Ku, I., Lu, Y., Gerla, M., Gomes, R. L., Ongaro, F., Cerqueira, E. (2014). *Towards software-defined VANET: Architecture and services*. 13th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (MED-HOC-NET), Piran, Slovenia. <https://doi.org/10.1109/MedHocNet.2014.6849111>
- [12] Urquiza-Aguiar, L. F. (2012). *Design and implementation of routing protocols with anonymity for vehicular ad-hoc networks in urban environments* [Tesis de Maestría]. <http://hdl.handle.net/2099.1/15903>
- [13] Han, J., Kamber, M., Pei, J. (2012). Data Mining Trends and Research Frontiers. *Data Mining. The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems* (3rd. Ed.) (pp. 585–631). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381479-1.00013-7>
- [14] Jungnickel, V., Manolakis, K., Zirwas, W., Panzner, B., Braun, V., Lossow, M., Sternad, M., Apelfröd, R., Svensson, T. (2014). The role of small cells, coordinated multipoint, and massive MIMO in 5G. *IEEE Communications Magazine*, 52 (5), 44–51. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6815892>
- [15] Uddin, M. A., Rashid, M. (2013). Link expiration timeaware routing protocol for UWSNs. *Journal of Sensors*, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2013/625274>
- [16] OSM. (2021). *OpenStreetMap*. <https://www.openstreetmap.org/#map=7/-1.783/-78.132>
- [17] SUMO. (2021). *Documentation - SUMO Documentation*. <https://sumo.dlr.de/docs/index>.
- [18] OMNeT++. (2021). *A Quick Overview of the OMNeT++ IDE*. <https://omnetpp.org/documentation/ide-overview/>
- [19] Veins. (2021). *Documentation - Veins*. <https://veins.car2x.org/documentation/>
- [20] Claro. (2021). *Mapa de cobertura*. <https://www.claro.com.ec/personas/servicios/servicios-moviles/cobertura/>

- [21] Gadi, S., Pratap Singh, S., Singh Baghel, A. (2016). *BEP / SEP of Binary and M-ary Signals over k - μ Shadowed Fading Channel*. 3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN), Noida, India. <https://doi.org/10.1109/SPIN.2016.7566667>
- [22] GitHub. (2019). *Sample combination of Veins, INET, and SimuLTE*. https://github.com/veins/veins_hetvnet