

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL PROBLEMA DE MOVILIDAD VEHICULAR EN UN SISTEMA DE INTERSECCIONES SEMAFÓRICAS

MODELING AND SIMULATION OF VEHICULAR MOBILITY PROBLEM IN A TRAFFIC LIGHTS SYSTEM

Ph.D. Paola A. Sánchez

*Universidad Simón Bolívar
Barranquilla, Colombia*

MsC Fernán Villa Garzón

*Universidad Nacional de Colombia
Medellín, Colombia*

(Recibido el 21/02/2012. Aprobado el 19/03/2012)

Resumen. En el contexto global se percibe un aumento del parque automotor. Fenómeno que, entre otros requerimientos, demanda sistemas de tráfico eficientes que respondan al volumen de vehículos que hacen uso de las vías y garanticen una adecuada movilidad. No obstante, esta visión no se corresponde con lo que sucede actualmente en las vías de las medianas y grandes ciudades que presentan problemas complejos de movilidad. El mayor impacto de las reducciones en la movilidad se encuentra en las congestiones de tráfico en sistemas de intersecciones semaforizadas. En este artículo se modela un sistema de semáforos en Medellín y se simulan, como solución, diferentes distribuciones en los tiempos de los semáforos. Los resultados encontrados con la simulación mejoran el comportamiento real y permiten sugerir políticas para el control de tráfico en la ciudad, de acuerdo con el número de vehículos.

Palabras clave: Simulación; Movilidad vehicular; Semáforos; Congestión; Control de tráfico.

Abstract. Globally is seen a dramatic increase in the vehicle numbers, this requires efficient traffic systems as response to the volume of vehicles that use the roads and as an action that ensures adequate mobility. However, medium and large cities presents complex problems of mobility. The greatest impact of the reductions in mobility is due to traffic congestion in signalized intersections systems. This paper models a traffic lights system in Medellín and are simulate different distributions in the times of traffic lights, as solutions. The simulation results improves the actual behavior, allowing suggest different policies to control traffic in the city, related with the number of vehicles passing by the routes.

Keywords: simulation; vehicular mobility, traffic lights, congestion.

1. INTRODUCCIÓN

La más reciente encuesta sobre origen y destino de hogares 2012, realizada por el Área Metropolitana, el Municipio de Medellín y la Universidad Nacional, revela que la movilidad en la ciudad de Medellín y el Área Metropolitana se ha intensificado, que se ha aumentado el número de personas que se movilizan, el número de viajes que se realizan y los vehículos que transitan diariamente [1]. El flujo vehicular que se concentra en ciertos sectores y la falta de cultura sobre el no uso del carro particular hace que las medidas tomadas no tengan el efecto esperado.

De acuerdo con la Secretaría de Tránsito y Transporte de Medellín, cerca de 20.000 nuevos automotores entraron en funcionamiento en los últimos tres años y pocos salieron del sistema. Un ritmo de crecimiento que no permite avizorar soluciones inmediatas para la movilidad.

Los entes gubernamentales han propuesto medidas para mejorar la movilidad en Medellín como el “Pico y placa sectorizado”, obras de ampliación de carriles en vías principales, localización de nuevos sistemas de semáforos, etc., sin embargo, no han sido soluciones para las congestiones de tráfico, toda vez que el ritmo de crecimiento del parque automotor es mayor que las soluciones que se dan para la estructura vial; esto provoca también que, en ocasiones, las soluciones que se dan para un punto en la ciudad trasladen los problemas a otros puntos que no los tenían.

Si bien los problemas de movilidad vehicular se presentan en múltiples ámbitos, éstos son más evidentes en vías con sistemas de semáforos en los que el tránsito debe interrumpirse en un lado para dar paso a la circulación del otro lado. Los pasos son mediados por semáforos de acuerdo con tiempos de secuencias fijados en su programación.

La programación actual de los tiempos de los semáforos produce constantes represamientos, tanto en las intersecciones como en las vías que son sumidero¹ de éstas, que, además, representa una reducción de la movilidad.

En la ciudad de Medellín se cuenta con semáforos inteligentes que permiten adaptarse a las condiciones cambiantes del tráfico, pero dicha adaptación no

¹ En este trabajo se usa extensivamente la palabra sumidero para referirse a las vías en las que se represan flujos provenientes de fuentes con semáforos.

es inmediata, sino que depende de una optimización que se realiza después de evaluar la información vehicular recogida.

El propósito del estudio es analizar el comportamiento de un sistema de intercepción con nueve semáforos de vehículos, dos semáforos peatonales y seis vías con sumideros, y evaluar de qué manera se deben controlar los tiempos de semaforización en las intersecciones, de acuerdo con la hora del día, para mejorar la movilidad. El sistema corresponde a la intercepción vial de la Avenida Oriental (Carrera 46) y la Calle 49 Ayacucho.

El uso de simulación en sistemas de movilidad permite estudiar el comportamiento de los problemas actuales y probar escenarios factibles de solución [2]; así mismo, permite evaluar políticas que conduzcan a mejorar el desempeño del sistema existente [3], [4], [5], [6], [7].

En Colombia se han hecho estudios acerca de la movilidad [8], pero son escasos los trabajos que utilizan modelos de simulación para evaluar su comportamiento [9].

Lo que sigue de este artículo está distribuido en cuatro secciones: en la segunda parte se describe el problema de movilidad vehicular que se va a atacar, posteriormente, en la sección Metodología se presenta el protocolo que se ha de seguir en la representación y simulación del problema; en la sección Resultados se comparan los valores obtenidos con los escenarios de solución propuestos y el sistema actual; finalmente, en la última sección, se presentan las conclusiones del estudio y los problemas abiertos para futuros trabajos.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Tal como se expone en [10] la movilidad es una condición inherente del desarrollo urbano de las ciudades; movilizarse significa trasladarse de un lado para otro, en el caso vehicular, con el uso de automotores. En la ciudad la movilidad se hace a través de las vías, no obstante, la procedencia de los problemas de movilidad son físicos, estructurales y culturales.

Algunas causas del problema de movilidad son:

- Incremento constante del parque automotor en la ciudad: existe una relación directa entre el número de vehículos en circulación y la reducción en la movilidad.

- Estacionamiento de vehículos, en especial de buses, sobre las vías: los paraderos de buses, autorizados o no, interfieren el flujo normal de vehículos porque limitan los carriles disponibles para la circulación.
- Bloqueo de intersecciones: este problema se presenta cuando, tras el cambio de un semáforo, los automotores en tránsito no alcanzan a seguir su marcha y se quedan atascados en la vía. (Ver Figura 1).

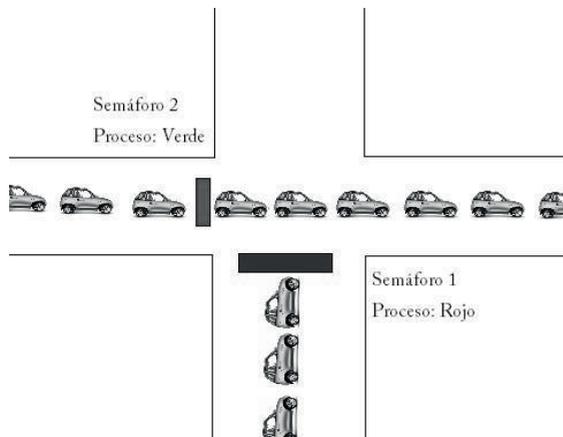


Fig. 1. Bloqueo de intersección, instante 1

Los que tenían la vía anteriormente (Semáforo 2 en Figura 1), bloquean el paso de quienes pasan a obtener la luz verde. (Ver Figura 2).

Este problema puede hacer que se pierda un ciclo completo de semáforo y entorpece la circulación.

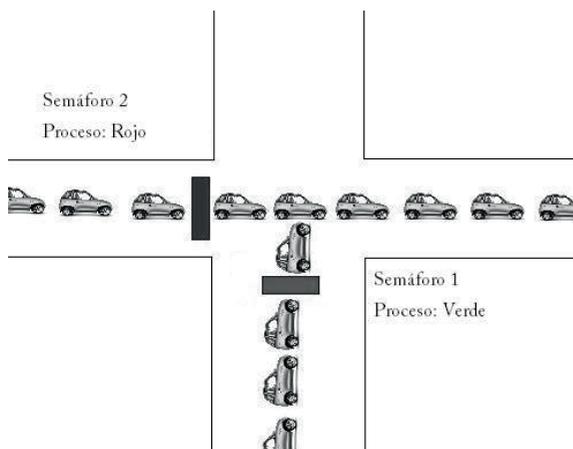


Fig. 2. Bloqueo de intersección, instante 2

§ Falta de cultura ciudadana: se refleja en varios ámbitos como uso innecesario de vehículos particulares, irrespeto en las normas de movilidad, carencia de una visión holística de las causas de las acciones individuales.

El sistema que se propone se concentra en el “bloqueo de intersecciones”, ya que las demás causas son factores incontrolables, de difícil cuantificación y se consideran no influyentes para efectos de este estudio.

Un análisis del caso real evidencia que cuando hay gran afluencia de vehículos (número alto de vehículos en circulación), las intersecciones se bloquean, toda vez que los sumideros se llenan y no alcanzan a evacuarse totalmente antes del cambio de semáforo. La hipótesis es que este fenómeno ocurre por el tiempo y por la secuencia de cambio de los semáforos.

Los semáforos de la intersección cambian de estado de a dos a la vez, es decir, se permite el paso en sentido norte-sur u oriente-occidente y los semáforos de las fuentes permiten el paso cuando el semáforo del sumidero se encuentra en rojo. (Ver en la Figura 3 el esquema del sistema real). Segundos después, los semáforos de la intersección cambian a verde. Los bloqueos se producen cuando los tiempos de programación de los semáforos no son suficientes para abastecer el tránsito de una cantidad adecuada de vehículos y evacuarlos en su totalidad antes de que la intersección sea invadida; aún más: no evacúa un sumidero lleno antes de permitir el acceso de más vehículos.

En la representación del problema, por simplicidad y para facilitar la comprensión del fenómeno, se omitirán algunas características del sistema real, tales como el tamaño y tipo de los vehículos, los peatones, etc., aunque se incluyeron tiempos diferenciales tanto en el paso de vehículos como en los cambios de los semáforos para representar tales fenómenos.

3. METODOLOGÍA

Para la representación del sistema actual y la posterior simulación de escenarios de solución se lleva a cabo un protocolo que consta de las siguientes etapas:

- Identificación del sistema real
- Toma y procesamiento de datos
- Implementación del modelo del sistema actual
- Implementación de escenarios de solución
- Análisis de resultados

A continuación se aborda cada una de las etapas del protocolo.

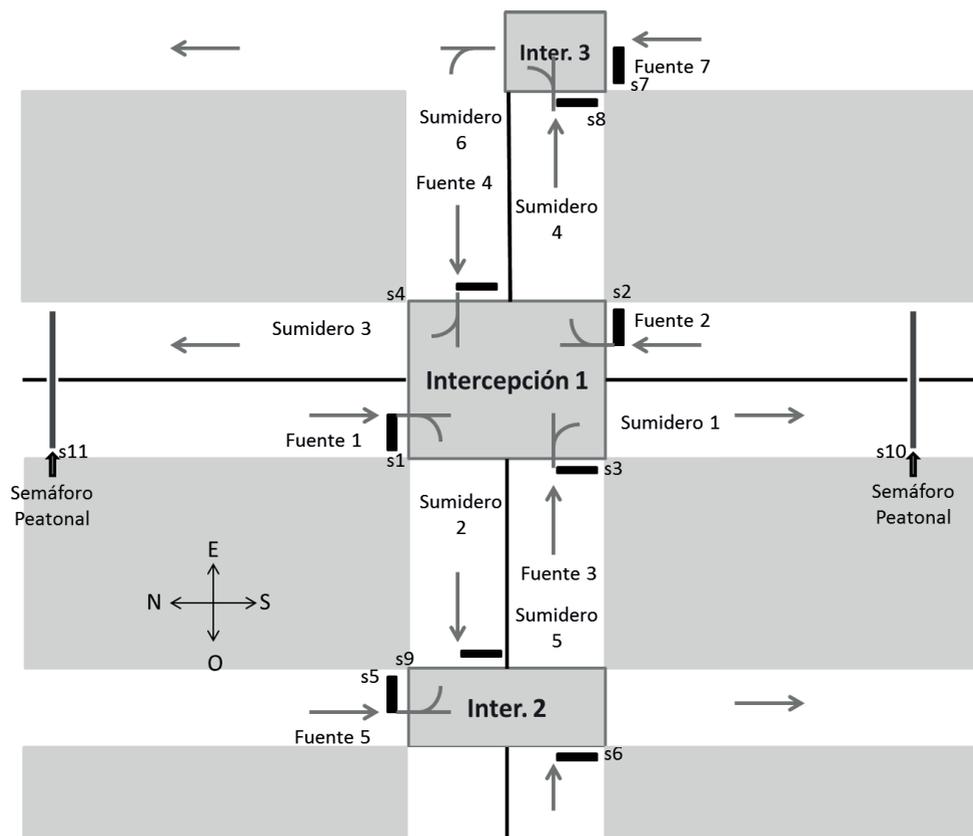


Fig. 3. Representación del sistema real

A. Identificación del sistema real

En la Figura 3 se esquematiza el sistema real que se analiza en este trabajo. La intercepción semafórica cuenta con ocho semáforos, seis fuentes de abastecimientos de vehículos que se represan en cuatro sumideros y dos semáforos peatonales.

Como se enfatizó anteriormente, los semáforos cambian de a dos a la vez, según corresponda a calles (sentido oriente-occidente, y viceversa) o carreras (sentido norte sur y viceversa). Las distribuciones de los semáforos son: dos en dirección norte sur, dos en dirección sur-norte, dos en dirección oriente-occidente, tres en dirección occidente-oriente, adicionalmente la carrera tiene dos semáforos peatonales, 1 en la dirección norte-sur, y otro sur-norte; en cada una de las orientaciones mencionadas hay un sumidero.

B. Toma y procesamiento de datos

Para la ejecución del estudio, la recolección de datos se realizó manualmente en tres momentos del día: 9:00am, 2:00pm, 6:00pm. Los datos medidos corresponden a:

- Tiempo de cada semáforo en cada estado.
- Número de vehículos que transitan en estado "verde".

Después de esta medición, se realizó un procesamiento para obtener estadísticos adecuados para la implementación.

De los datos recolectados, se calcula el promedio de vehículos que transitan en estado "verde" \bar{x} para trabajar con un aproximado válido en cada uno de los momentos del día. (Ver la Tabla 1). Así como diferentes tasas.

- Tasa de vehículos en circulación: 60% a las 9:00am, 85% a las 2:00pm, 120% a las 6:00pm.

Se tiene en cuenta la siguiente premisa: los semáforos que se comportan igual en su programación son: S1 = S2, S3 = S4, S8 = S9, S10 = S11 (Semáforos peatonales).

Tabla 1. Datos medidos y calculados del sistema real (seg)

	Tiempo verde 9 am, 2 pm, 6 pm	Tiempo rojo	\bar{x}
S1	60, 52,52	30, 49,49	60,100,80
S2	60,52,52	30,49,49	60,83,69
S3	30,26,26	60,70,70	30,40,35
S4	30,30,30	60,70,70	30,28,22
S5	30,52,52	60,43,43	30,8,7
S6	30,26,26	60,70,70	30,22,22
S7	45,52,52	45,43,43	45,37,29
S8	45,30,30	45,70,70	45,25,20
S9	60,26,26	30,70,70	60,16,15
S10	40,52,52	20,35,35	85,76,70
S11	40,52,52	20,35,35	67,62,57

C. Implementación del modelo del sistema actual

El sistema en estudio para el problema de movilidad en la ciudad de Medellín se enfoca en la intercepción de la Av. Oriental, con la Calle Ayacucho, y se extiende hasta sus respectivas fuentes y sumideros.

El modelado y simulación del sistema se hizo mediante la simulación basada en agentes, se usó la herramienta Agentsheets®. En la Figura 4 se ilustra el modelo del sistema real, y en la Figura 5 una ejecución típica.

Los agentes identificados en la implementación son:

- Vehículos: agentes que se desplazan a través de las calles
- Tres tipos de semáforos: horizontales, verticales y los peatonales
- Entradas: lugar por el que ingresan los vehículos al sistema
- Salidas: lugar por donde salen los vehículos del sistema
- Calles: lugar por donde pueden circular los vehículos
- Intercepciones: áreas comunes de diversas vías
- Indicadores de decisión: permiten cambiar la dirección de los vehículos

Si bien se conservaron los parámetros reales medidos en la configuración de simulación, se adicionaron elementos que permiten cambios en la cantidad de vehículos que ingresan al sistema, la probabilidad de cambiar de dirección, el tiempo de duración de los semáforos y el orden de cambio de cada uno.

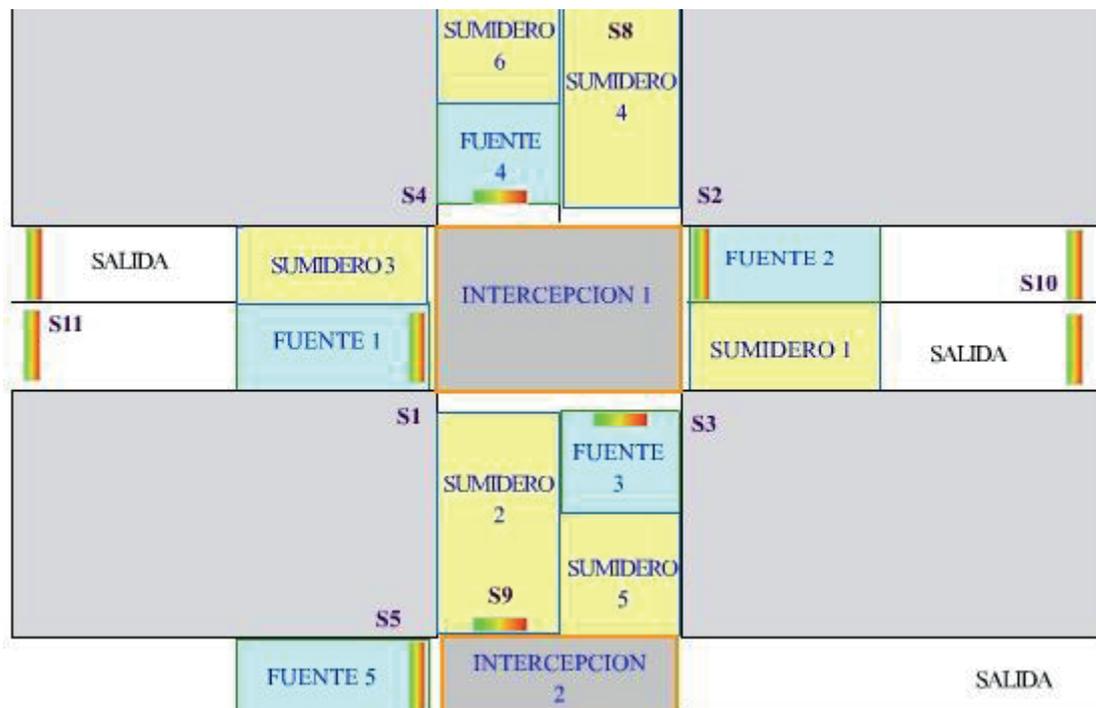


Fig. 4. Modelo del sistema real

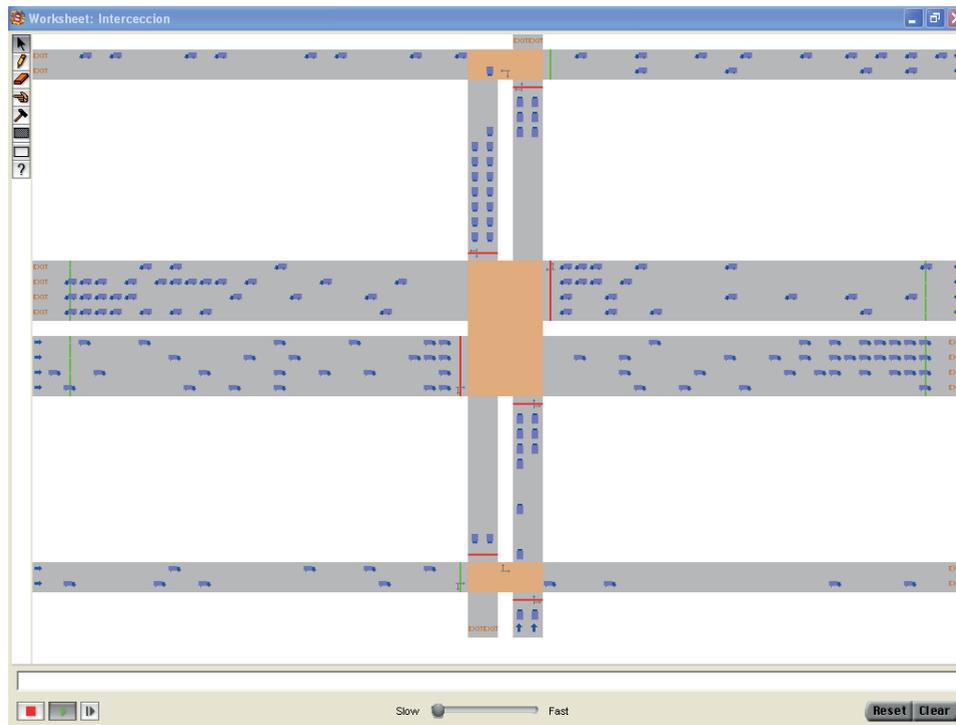


Fig. 5. Modelo del sistema real en ejecución

El sistema real simulado se configuró de tal forma que permita la representación del comportamiento real de los agentes, incluidas las dificultades de movilidad. En los resultados se analizará dicho comportamiento y se contrastará con diferentes escenarios de solución.

Las variables de la simulación están parametrizadas para que sea sencillo adaptar el sistema a cualquier situación.

D. Implementación de escenarios de solución

Basados en el análisis del sistema real, se pudo evidenciar que bloqueos en las intercepciones señaladas en la Figura 3, son los que generan reducciones en la movilidad; tal comportamiento se manifiesta, especialmente, en los sumideros dos, cuatro y cinco. Según lo anterior, como escenarios de solución del problema de movilidad se propone evaluar combinaciones en los tiempos de cambio de los semáforos de las fuentes y sumideros que suplen las intercepciones mencionadas, de manera que se evite la acumulación de vehículos en tales puntos; específicamente, se intervendrán los tiempos de los semáforos seis, ocho y nueve.

Las medidas de solución para evaluar son:

- Incrementar los tiempos del cambio al estado rojo de los semáforos seis, ocho y nueve, respectivamente (incremento de tiempo en estado “verde”).
- Incremento de tiempos en estado “verde” seguido de una disminución de tiempo en estado “rojo” en los semáforos seis, ocho y nueve, respectivamente.

E. Análisis de resultados

En esta etapa se hace una comparación de los resultados numéricos obtenidos con la simulación del sistema real y los dos escenarios de solución propuestos.

La comparación de los resultados se hace en términos de la tasa de vehículos en circulación y el promedio de vehículos que logran pasar en estado “verde”.

4. RESULTADOS

En esta sección se evaluará el comportamiento del modelo real vs los escenarios de solución propuestos.

Una evaluación inicial del modelo del sistema real evidencia que al cabo de algunos ciclos en el cambio de los semáforos se producen bloqueos en las intersecciones, especialmente, en la dos y tres, respectivamente, y luego se extiende a la intersección uno.

En este artículo se trabaja la hipótesis de que cuando el número de automóviles en tránsito comienza a aumentar, el tiempo y las secuencias de los semáforos no son suficientes para evacuar los autos que se encuentran en cada uno, se bloquean los sumideros y las intersecciones.

Los escenarios evaluados de solución al problema buscan evitar las congestiones en los sumideros que provocan bloqueos en las intersecciones dos y tres a través de la intervención en los tiempos de los semáforos 6, 8 y 9 que suplen dichas intersecciones.

El primer escenario de solución consiste en incrementar el tiempo en estado "verde" de los semáforos 6, 8 y 9 en 5 segundos. Cabe aclarar que se probaron incrementos diferentes mayores y menores que el valor presentado, pero no se consideró relevante incluirlos.

Para la evaluación de los cambios propuestos se probaron separadamente simulaciones del comportamiento a las 9:00 am, 2:00 pm y 6:00 pm. Para cada horario se calculó el número promedio de vehículos que transitaban en estado "verde" por los semáforos 6, 8 y 9, y el porcentaje de vehículos no evacuados, tanto para el modelo del estado actual como para el escenario de solución 1. Estos datos son presentados en la Tabla 2, en la que \bar{x} es el promedio de vehículos que transitan en estado "verde" y $ne\%$ es el porcentaje de vehículos no evacuados.

Tabla 2. \bar{x} y $ne\%$ para el modelo del sistema actual vs escenario de solución 1 en horario 9 am, 2 pm, 6 pm

	\bar{x} (actual) 9 am, 2 pm, 6 pm	$ne\%$ (actual)	\bar{x} (S1)	$ne\%$ (S1)
S6	30,22,22	16,27,41	38, 24,25	8,12,16
S8	45,25,20	24,35,59	53,29,32	16,21,29
S9	60,16,15	21,28,36	66,20,22	12,15,14

Los resultados arrojados por el primer escenario de solución son satisfactorios porque permiten disminuir el porcentaje de vehículos no evacuados, además de un tránsito mayor de vehículos en estado "verde" por las vías que alimentan.

Con el escenario de solución 1, salvo pocas ocasiones en la intervención 3, no se presenta el fenómeno de bloqueo en las intersecciones, lo que quiere decir que esta solución permite una evacuación adecuada de los sumideros, antes del cambio de estado de los semáforos.

Si bien los resultados del escenario 1 muestran un comportamiento favorable en cuanto al problema principal del bloqueo de las intersecciones, manifiesta un problema adicional y es que tras el cambio de estado de los semáforos 6, 8 y 9 a rojo, la espera del semáforo se hace muy larga para el número de vehículos que están en espera. Una solución para este inconveniente es presentada en el escenario 2, en el que se combina la solución anterior con una disminución de cinco segundos en el estado "rojo" de los semáforos 6, 8 y 9. Los resultados de la simulación del escenario de solución 2 se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. $ne\%$ para el modelo del sistema actual vs escenario de solución 2 en horario 9 am, 2 pm, 6 pm

	$ne\%$ (actual) 9 am, 2 pm, 6 pm	$ne\%$ (S2)
S6	16,27,41	7,12,12
S8	24,35,59	11,21,23
S9	21,28,36	8,14,13

Un análisis de los resultados presentados en la Tabla 3, muestra mejoras en la solución respecto al sistema actual en el porcentaje de vehículos que no se alcanza a evacuar, se disminuyen notablemente los valores, especialmente, en el semáforo 8 y se alcanzan mejoras superiores al 50%. El escenario de solución 2 permite movilizar un mayor número de vehículos en comparación con el modelo actual y evita, en todos los casos, los bloqueos a las intersecciones.

Finalmente, una comparación de los escenarios 1 y 2, evidenciada en los resultados presentados en las tablas 2 y 3, demuestra que el escenario de solución 2 ofrece mejoras respecto al escenario 1, toda vez que reduce el porcentaje de vehículos no evacuados. Además, el escenario 2 permite solventar totalmente el problema de bloqueo de las intersecciones. Por lo tanto, se considera el escenario 2 como mejor solución para el problema planteado.

Un análisis adicional que se realizó para incrementar el número de vehículos que transitan por el sistema mostró que la solución del escenario 2 es válida, in-

cluso hasta un incremento en un 25% en el número de vehículos. Los resultados de este análisis no se presentan puesto que se consideran fuera del alcance del trabajo.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado la representación y simulación de un proceso de intersecciones semaforizadas en el centro de Medellín, las cuales ofrecen problemas de reducción de la movilidad vehicular porque generan bloqueos. La motivación del trabajo fue identificar las falencias en los procesos actuales y proponer escenarios de solución para solventar los problemas de movilidad.

El análisis del sistema actual evidencia bloqueos en todas las intersecciones, los cuales se generan porque con la programación actual de los semáforos no se alcanza a evacuar la totalidad de los vehículos represados en los sumideros en el cambio de estado y éstos producen bloqueos en las intersecciones, los cuales se expanden por todo el sistema.

Se evaluaron dos soluciones orientadas a intervenir los tiempos de los semáforos 6, 8 y 9, los cuales representan mayor influencia en las intersecciones. En el primer escenario, se aumentó el tiempo en estado “verde”, y en el segundo se retomó el primer escenario y adicionalmente se disminuyó el tiempo en estado “rojo”. Los resultados exhibidos por ambos escenarios son altamente satisfactorios, toda vez que permiten aumentar el número de vehículos en circulación, disminuir el porcentaje de vehículos no evacuados y evitar totalmente los bloqueos en todas las intersecciones del sistema.

Los resultados obtenidos dejan entrever que las intervenciones en los procesos actuales pueden generar resultados beneficiosos en la movilidad de la ciudad. Estudios futuros son incluir en la simulación otro tipo de vehículos como motos, buses y camiones.

6. REFERENCIAS

- [1] A. M. d. V. d. Aburrá, «Área Digital,» 16 de agosto 2012. [En línea]. Available: <http://www.aredigital.gov.co/Documents/EOD%20Medellin%20150812.pdf>. [Último acceso: 10 Octubre 2012].
- [2] A. D’Ambrogio, G. Lazeolla, L. Pasini y A. Pieroni, «Simulation model building of traffic intersections,» *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, pp. 625-640, 2009.
- [3] M. Wegener, «The future of mobility in cities: Challenges for urban modelling,» *Transport Policy*, p. in press, 2012.
- [4] F. Basile, P. Chiacchio y D. Teta, «A hybrid model for real time simulation of urban traffic,» *Control Engineering Practice*, vol. 20, pp. 123-137, 2012.
- [5] J. Vasic y H. Ruskin, «Cellular automata simulation of traffic including cars and bicycles,» *Physica A*, vol. 391, pp. 2720-2729, 2012.
- [6] J. Guerrero, P. Damián, C. Flores y P. Llamas, «Plataforma para Gestión de la Red de Semáforos de Zonas Urbanas,» *Revista Iberoamericana de Sistemas, Cibernética e Informática*, vol. 7, n° 1, pp. 12-18, 2010.
- [7] J. Taplin, «Simulation Models of Traffic Flow,» de *The 34th Annual Conference of the Operational Research Society of New Zealand*, New Zealand, 1999.
- [8] C. Dangond, J. Jolly, A. Monteoliva y F. Rojas, «Algunas reflexiones sobre la movilidad urbana en Colombia desde la perspectiva del desarrollo humano,» *Papel Político*, vol. 16, n° 2, pp. 485-514, 2011.
- [9] D. Robles, P. Ñañez y N. Quijano, «Control y simulación de tráfico urbano en Colombia: Estado del Arte,» *Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes*, pp. 59-69, 2009.
- [10] C. A. d. Fomento, desarrollo urbano y movilidad en América Latina, http://omu.caf.com/media/30839/desarrollourbano_y_movilidad_americalatina.pdf ed., Panamá: CAF, 2011.