

## “Simulación de puntos críticos de tráfico vehicular y movilidad vial”

### Federico Liévano M

Fundación Universitaria Católica del Norte  
Calle 70 No. 52 – 21. Off: 21-413  
flievano@ucn.edu.co

### Juan Villada Oquendo

Fundación Universitaria Católica del Norte  
Calle 70 No. 52 – 21. Off: 21-413  
jgvillada@ucn.edu.co

### RESUMEN

En este artículo, se considera el estudio y la experimentación de sectores específicos de mayas viales que presentan inadecuados diseños estratégicos de movilidad, sin conexión estratégica con los ejes viales, con inadecuada implementación de tecnologías de semaforización y poca resistencia a eventualidades como accidentes, daños en vías, entre otras. Se propone el desarrollo de técnicas de simulación avanzadas para proponer políticas de mejora tanto para los determinados puntos críticos así como para la toda maya vial.

**Palabras Clave:** Simulación de eventos discretos, Sistemas de Transporte, Movilidad Vial.

### ABSTRACT

This paper consider the study and experimentation of specific places of the transport systems that having inadequate mobility strategic design, without strategic connection with highways, inadequate implementation of technologies of traffic lights and low resistance to eventualities as: accidents, street damages, among others. We propose the development of a simulation technique for propose improvement politics for the places under study.

**Keywords:** Discrete-event simulation, Transport Systems, Road Movility

## 1. Introducción

El plan estratégico de movilidad que se viene implementando en varias ciudades de Colombia desde el año 2008 pretende realizar las acciones estratégicas adecuadas para el mejoramiento de la movilidad en sistemas de transporte en Colombia, con el objetivo de estar preparados para afrontar los retos del desarrollo y la expansión de las ciudades con miras a años posteriores. En general dentro de los planes estratégicos se definen por parte de los entes gubernamentales cinco pilares claves (Sarmiento I. 2011). El primero, relacionado con las estrategias en transporte. Las cuales buscan en general la consolidación de sistemas integrados de transporte que logren la integración física, operacional y tarifaria de los modos de transporte público.

El segundo componente es la vialidad, que busca mejorar las condiciones de accesibilidad urbana, regional y peatonal de la ciudadanía en general por medio de la implementación de nueva infraestructura. Para esto se han definido y puesto en marcha la construcción de infraestructura y la ampliación de algunas de las vías principales de las ciudades.

El tercer componente es la estrategia en tránsito, que está relacionada con la efectividad en la respuesta y el control de la movilidad cuyo objetivo es mejorar la eficacia en la malla vial y la reacción a situaciones imprevistas para el mejoramiento de la movilidad a través de la creación de centros de monitoreo y control de la operación de los sistemas viales.

El cuarto componente relacionado con el manejo del medio ambiente, el cual busca mejorar la calidad ambiental. Y el quinto componente es cultura ciudadana, que es el cumplimiento voluntario de las normas de convivencia en el espacio público.

Si bien se han visto avances importantes en la ejecución de estos cinco pilares en el país como la construcción de diversa infraestructura vial como la implementación de puentes de la Calle 93-94 y Calle 4 Sur en Medellín, la ampliación de la calle 33 en Cali, la implementación de foto multas y sistemas de cámaras de control de movilidad, la reciente implementación del sistema inteligente de movilidad y campañas cívicas que buscan transformar los valores, las actitudes y los comportamientos de los ciudadanos sobre la movilidad, se cree que el problema de movilidad en Colombia es un problema más complejo que amerita otras consideraciones y estudios científicos de alto nivel en unión con herramientas tecnológicas.

Pese a que los planes de movilidad están bien definidos y que notoriamente se han hechos esfuerzos para mejorar la movilidad de las ciudades, las estadísticas muestran un panorama negativo y casi incontrolable a futuro. La figura 1. Tomada de la secretaria de transportes y tránsito de Medellín, ilustra el incremento del parque automotor en esta ciudad específica que sirve como ejemplo y que es la que más ha hecho esfuerzos en temas de planeación estratégica en Transporte. En esta figura se observa cada año se introduce en el sistema aproximadamente 7000 vehículos. Y en el año 2011 el incremento mensual de vehículos fue casi de 1000.

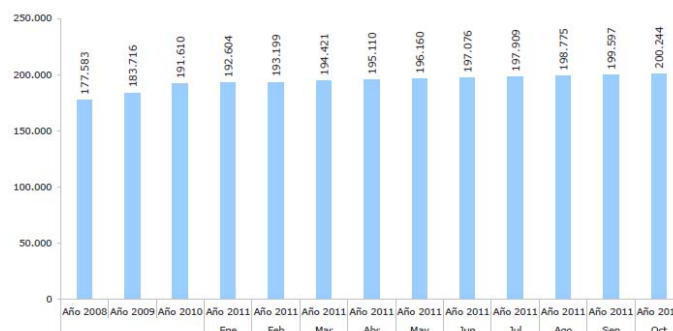


Figura 1. Incremento del Parque Automotor. Tomado de secretaria de transportes y tránsito.

Por otro lado el número de accidentes en dicha ciudad es muy elevado registrando índices muy altos donde los valores mensuales de accidentes de tránsito oscilan entre 1500 y 2100 vehículos mes afectados aproximadamente. Medellín y Cali reportan las tasas más elevadas de accidentalidad de todo el país, con un promedio de 290 accidentes por cada 10000 vehículos.

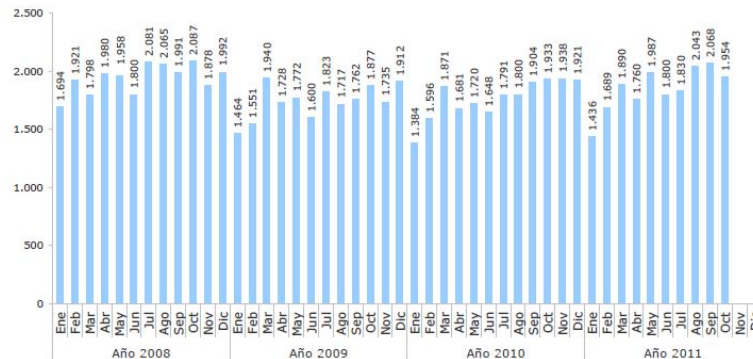


Figura 2. Evolución Accidentalidad. Medellín. Tomado de secretaria de transportes y tránsito Medellín.

Las condiciones expuestas anteriormente, evidencian el descontento de los ciudadanos y la sensación de que cada vez hay menos capacidad vial para suplir la movilidad de las ciudades, estas situación, amerita tomar otras medidas que no han sido consideradas dentro de los planes estratégicos.

En este artículo, se considera el exhaustivo estudio de algunos sectores con infraestructura ya definida dentro de la maya vial con inadecuados diseños estratégicos de movilidad, sin conexión estratégica con los ejes viales, con inadecuada implementación de tecnologías de semaforización y poca resistencia a eventualidades como accidentes, daños en vías, entre otras.

Dichos puntos críticos han sido identificados como puntos de alta accidentalidad y alta congestión que han sido instaurados dentro de las mayas viales por el dinamismo del complejo sistema de transporte o por su previo mal diseño.

Dada esta hipótesis es necesario plantear nuevas estrategias de movilidad con base en el actual diseño e infraestructura que se tiene implementada, de esta manera pueden adoptarse nuevas formas para la circularidad y la efectiva movilidad vehicular en los distintos fragmentos de las ciudades. Los problemas a abordar en este artículo se enfocaran en dichos puntos críticos o cruces específicos que determinan el núcleo de los problemas viales de las ciudades.

Es importante destacar que el sistema de transporte, es un sistema dinámico que cambia en el tiempo, debido al ingreso de nuevas variables, y al cambio dinámico de toda la infraestructura vial, por tal motivo es común el aumento de puntos críticos en el tiempo dentro de las mallas viales de las ciudades. Estos puntos críticos deben ser identificados, modificados y eliminados puesto que promueven la alta accidentalidad, el poco respeto por el peatón y la poca facilidad para la movilidad de ambulancias, vehículos de bomberos, de seguridad, de protección social y la movilidad total de todo el sistema.

## 2. Metodología

### 2.1 Simulación de eventos discretos para el estudio de sistemas de transporte

La herramienta con la cual se estudiarán los puntos críticos será por medio de Simulación de Sistemas con Eventos Discretos. Estas simulaciones involucran las principales características, elementos y artefactos de los sistemas viales con el fin de entender el diseño actual, el flujo

vehicular y las condiciones generales de los sistemas y ayudan a definir y plantear políticas de mejora para obtener una mayor eficiencia en términos de movilidad.

La metodología que se usó en esta investigación se basa principalmente en los siguientes elementos:

- Descripción del sistema y el planteamiento del problema: donde se identifica el problema y el enfoque del modelo de simulación para el análisis de las posibles soluciones.
- Implementación del estudio de campo de los puntos viales objeto a estudiar: en esta parte se extraerán los datos e información necesaria para desarrollar análisis estadísticos que permitan identificar distribuciones de probabilidad que representen las dinámicas del sistema.
- Uso de tecnologías de información y comunicación para extraer información de la movilidad de y del comportamiento vehicular.
- Desarrollo de pruebas estadísticas: que permitan hacer inferencias estadísticas, probar la bondad de ajuste de las distribuciones de probabilidad, extraer y replicar los comportamientos reales del sistema.
- Definición de las variables y supuestos principales del modelo: para construir una simulación robusta que represente adecuadamente el sistema.
- Construcción de diagramas de flujo detallado del sistema: en este ítem se construirán diagramas de eventos discretos que representen de manera algorítmica y lógica los principales fenómenos del sistema.
- Construcción de simulación y desarrollo de experimentos controlados: replicación de la realidad por medio del diseño o uso de un software especializado.
- Análisis de resultados: desarrollo de múltiples corridas que permitan entender el sistema y establecer intervalos de confianza del comportamiento.
- Validación y análisis de sensibilidad: modificación de parámetros y comparación con comportamientos reales del sistema.
- Planteamiento de mejoramiento del sistema con sus respectivas simulaciones: desarrollo de múltiples corridas con modificaciones que permitan mejorar el sistema.
- Escritura de resultados y conclusiones: las cuales deben estar relacionadas con el planteamiento del problema y los resultados obtenidos del sistema vial actual y de las mejoras propuestas

La metodología contribuyó a diseñar simulaciones robustas que se acercaron eficazmente a comportamientos de puntos viales de la realidad y a la solución de problemas reales, a la formulación y análisis de sistemas complejos y a implementar una herramienta metodológica para el estudio de sistemas de transporte (Jaoua, A., et al,2012), (Labeau, P and Zio, 2002).

## 2.2 Desarrollo de la infraestructura vial en Colombia

Diversos análisis sobre el desarrollo económico en Colombia han definido que una de las principales variables que determinan el crecimiento del país, es la infraestructura vial básica que constituye la malla y red de movilidad de las ciudades, municipios y corregimientos (Sarmiento 1996). La forma como están concentradas las actividades económicas en Colombia, su accidentada geografía hace que la infraestructura en transporte y vías tenga un gran impacto en la eficiencia económica y competitividad de las instituciones y empresas del país (Ministerio de Transporte 2007).

Es evidente que las inversiones en infraestructura básica, los marcos regulatorios del sector y la planeación y diseño de las estructuras viales inciden fuertemente en la competitividad sistémica en Colombia. Uno de los más recientes diagnósticos oficiales sobre infraestructura vial en Colombia señala que la red de carreteras del país, constituida por 164.000 km aproximadamente, presenta un estado crítico, debido al paulatino deterioro de las vías, la falta

de mantenimiento, inadecuados diseños viales y condiciones climáticas desfavorables y topográficas.

Asimismo es importante entender como el aumento de flujo vehicular ha cambiado las condiciones para las cuales fueron pensados los diseños viales y por esto es común ver en nuestras ciudades y municipios puntos críticos de movilidad que afectan toda la malla vial, donde se presentan a menudo problemas relacionados con: grandes trancones, altos índices de accidentalidad, y dificultades de accesibilidad peatonal.

El sistema vial de las ciudades cambia y evoluciona acorde con el ordenamiento territorial de las localidades y con el aumento de los vehículos que entran en circulación. Dichos cambios causan que los sistemas viales actuales sean cada vez más complejos y que requieran un estudio detallado para identificar como se pueden mejorar o cambiar.

El artículo ilustra varias simulaciones computarizadas que representen complejos puntos viales que exhiban dificultades de movilidad. Estas simulaciones permitirán entender los aspectos físicos y dinámicos de los sistemas viales, comprender las situaciones problemáticas y poder enfrentar dichos sistemas con el planteamiento de políticas de mejora.

### 2.3 Modelo de Simulación

#### 2.3.1 Sistema de Estudio

El modelo de simulación que se estudia en este artículo y que sirve de ejemplo para la implementación de la metodología tiene que ver con un cruce específico en una de las más importantes vías de la ciudad de Medellín, Colombia. Por privacidad se omite la dirección exacta del estudio realizado. La topología de la maya vial se ilustra en la Figura 3.



Figura 3. Sistema Vial Estudiado

Este lugar de la ciudad se presenta grandes congestiones de forma constante, incluyendo vehículos de todo tipo y peatones que cruzan frecuentemente la vía. La estructura vial que se maneja actualmente en este punto está diseñada en función del flujo vehicular y no responde a factores como la seguridad del peatón ya que los semáforos siempre tienen un flujo de entrada abierto y los peatones no cuentan con tiempo alguno para cruzar las vías.

Adicionalmente el sistema se extiende espacialmente un poco más a lo mostrado en la Figura 3, agregando además la intersección correspondiente con otras avenidas. Uno de los principales objetivos de la simulación ilustrada en este artículo fue analizar el correcto funcionamiento de los semáforos ilustrados en la figura 4. El sistema ha sido asumido como un sistema de colas, en el que los servidores son los semáforos y los clientes son los vehículos (automóviles y motocicletas), los cuales esperan en la cola para ser atendidos (semáforo en verde).

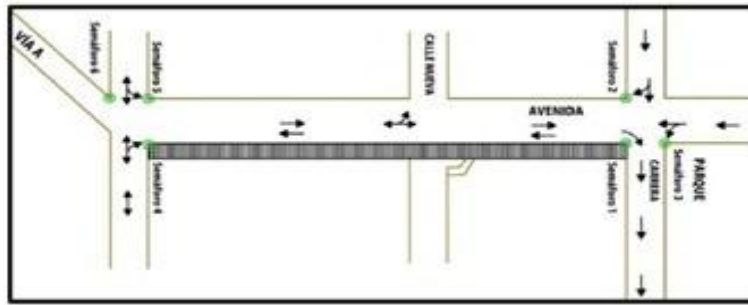


Figura 4. Extensión del Sistema vial

### 2.3.2 Información y Datos

Para facilitar el proceso de toma de datos se realizó una clasificación de maniobras en las dos posiciones (Figura 5). Algunas de las maniobras son utilizadas en el ajuste de datos para crear generadores de llegadas, es decir, las llegadas de los vehículos, la razón para que se consideraran sólo algunos es que no todas las maniobras correspondían a ingresos al sistema, por ejemplo: Las maniobras 2F, 2G y 2H son consecuencias directas del flujo de vehículos provenientes de la posición 1, por lo cual no hay que generarlas de nuevo, es decir, aún están en el sistema; los generadores que producen este flujo estarían ubicados en la Carrera, proporcionando entradas al sistema por medio de 1C y 1D, y en la avenida suministrando llegadas mediante 1A y 1B, así, los vehículos que realizan las maniobras 2F, 2G y 2H, resultan de la suma de vehículos de los dos generadores mencionados. La clasificación de las maniobras tiene como finalidad, además, determinar la probabilidad de realizar determinado giro en un cruce. Por otro lado, los tiempos de operación de los semáforos (servidores) son determinísticos, es decir, están programados para cambiar en diferentes intervalos de tiempo (para cada uno) y con determinada sincronización entre ellos.

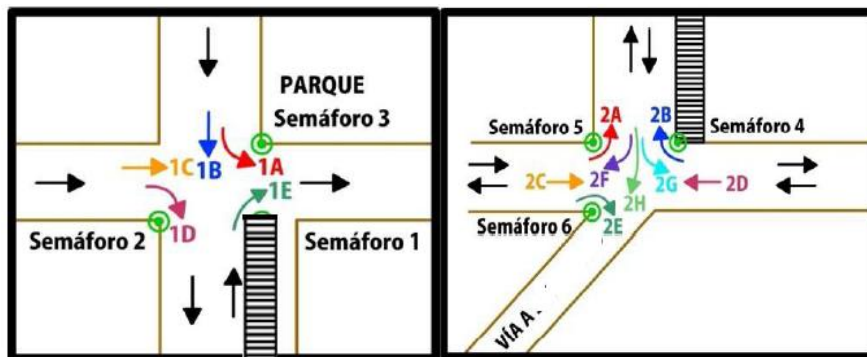


Figura 5. Maniobras para la toma de datos.

El muestreo realizado se llevó a cabo un día aleatorio, con el fin de captar el comportamiento normal del sistema. La muestra tomada incluye 85 datos. El plan de recolección de datos se estableció como un conteo de automóviles y motocicletas por intervalo de tiempo (2 minutos), debido a que considerar el tiempo entre llegadas a los semáforos resulta, más que tedioso, poco práctico, ya que las llegadas a un determinado cruce se producen en muchas ocasiones de forma casi simultánea, lo que quiere decir que los tiempos entre llegada pueden ser mínimos para los casos en que un vehículo esté a tan sólo unos metros de otro, situación que se repite constantemente.

Los datos tomados especifican el tipo de maniobra, de acuerdo a las Figura 5, ya que no basta con saber la cantidad de vehículos que transitan en un intervalo de tiempo, es también necesario saber de dónde provienen y hacia dónde se dirigen. Por otro lado, los tiempos de operación de los semáforos (servidores) son determinísticos, es decir, están programados para cambiar en diferentes intervalos de tiempo (para cada uno) y con determinada sincronización entre ellos.

### 2.3.3 Pruebas Estadísticas

Para realizar los ajustes de las muestras de datos necesarias para la generación de llegadas al sistema, se utilizó el software Statgraphics, el cual realiza pruebas de hipótesis para diferentes distribuciones y las compara, con el fin de determinar cuál de todas ellas resulta más adecuada. Para tal comparación se utiliza como criterio de decisión el logaritmo de verosimilitud. La Tabla 1 muestra el resumen de los ajustes realizados con un nivel de significancia de  $\alpha = 0.05$

Tabla 1. Ajuste Estadístico de las distribuciones usadas en el modelo de simulación

| Generador       | Parámetro poisson ( $\lambda$ )-<br>vehic/(2 min) | Valor P | Parámetro<br>Exponencial -min |
|-----------------|---|---------|-------------------------------|
| 1A+1B: Motos    | 6,75294   | 0,8443  | 0,29617                       |
| 1A+1B: Autos    | 3,75294   | 0,1562  | 0,53292                       |
| 1C+1D: Motos    | 2,85882   | 0,0588  | 0,69959                       |
| 1C+1D: Autos    | 0,77647   | 0,0805  | 2,57576                       |
| 2B+2D: Motos    | 7,4000  | 0,1223  | 0,27027                       |
| 2B+2D: Autos    | 2,69412   | 0,8339  | 0,74236                       |
| 2A+2C+2E: Motos | 5,89412   | 0,3425  | 0,33932                       |
| 2A+2C+2E: Motos | 3,27059   | 0,1764  | 0,61151                       |

### 2.3.4 Supuestos del Modelo

Uno de los supuestos principales del modelo es el hecho de no considerar restricciones espaciales, en todos los aspectos que pueda abarcar, como son el ancho de las calles, distancias entre los vehículos y vehículos parqueados en las calles. Lo anterior implica que no se reproducen accidentes o colisiones. En el funcionamiento de los semáforos, el tiempo que se destina originalmente para el color amarillo (2 segundos como máximo) se incluye en el color verde, pues desde el mismo momento que el semáforo deja el color rojo, los vehículos empiezan a moverse. El tiempo de atención es igual para todo tipo de vehículo, ya que cuando el semáforo da la señal de avance todos se encuentran en reposo, y para realizar su giro se demoran aproximadamente el mismo tiempo. Se considera una velocidad media de 35 km/h, la cual se estableció después de realizar un muestreo en el lugar estudiado; para lo cual se considera una escala de 3 pixeles por metro en el software de Simulación.

### 2.3.5 Presentación y análisis de resultados

En la Tabla 2 muestra los resultados de los objetos de simulación de interés, así como los intervalos de confianza respectivos. Se realizaron 30 corridas correspondientes a intervalos de tiempo de 3 horas.

Tabla 2. Resultados del Modelo de simulación

| Objeto de simulación | Medida de desempeño | Intervalo de confianza |        |        | Objeto de simulación | Medida de desempeño | Intervalo de confianza |        |        |
|----------------------|---------------------|------------------------|--------|--------|----------------------|---------------------|------------------------|--------|--------|
|                      |                     | -95%                   | Prom.  | 95%    |                      |                     | -95%                   | Prom   | 95%    |
| Salida 1             | N° salidas          | 1579.7                 | 7593.5 | 1607.3 | Cola 5               | Long. prom          | 0.34                   | 0.38   | 0.42   |
| Salida 2             | N° salidas          | 588.83                 | 597.57 | 606.30 |                      | Long Max.           | 5.74                   | 6.00   | 6.25   |
| Salida 3             | N° salidas          | 52.06                  | 55.10  | 58.13  |                      | Espera Max          | 0.08                   | 0.08   | 0.085  |
| Salida 4             | N° salidas          | 733.04                 | 744.16 | 755.29 |                      | Espera prom         | 0.37                   | 0.38   | 0.38   |
| Cola 1               | Long. prom          | 1.542                  | 1.645  | 1.748  | Cola 6               | Long. prom          | 0.45                   | 0.49   | 0.54   |
|                      | Long Max.           | 10.96                  | 11.43  | 11.91  |                      | Long Max.           | 6.23                   | 6.47   | 6.71   |
|                      | Espera Max          | 1.008                  | 1.013  | 1.018  |                      | Espera Max          | 0.09                   | 0.10   | 0.10   |
|                      | Espera prom         | 0.324                  | 0.328  | 0.332  |                      | Espera prom         | 0.38                   | 0.40   | 0.41   |
| Cola 2               | Long. prom          | 0.386                  | 0.422  | 0.459  | Servicio 2           | N° atendidos        | 317.85                 | 323.37 | 328.89 |
|                      | Long Max.           | 4.804                  | 5.033  | 5.263  | Servicio 3           | N° atendidos        | 1196.5                 | 1209.7 | 1222.8 |
|                      | Espera Max          | 0.960                  | 0.972  | 0.984  | Servicio 4           | N° atendidos        | 873.56                 | 883.53 | 893.51 |

| Objeto de simulación | Medida de desempeño | Intervalo de confianza |        |        | Objeto de simulación | Medida de desempeño | Intervalo de confianza |       |       |
|----------------------|---------------------|------------------------|--------|--------|----------------------|---------------------|------------------------|-------|-------|
|                      |                     | -95%                   | Prom.  | 95%    |                      |                     | -95%                   | Prom  | 95%   |
|                      | Espera prom         | 0.234                  | 0.240  | 0.246  | Servicio 5           | N° atendidos        | 810.6                  | 819.0 | 827.4 |
| Cola 3               | Long. prom          | 1.374                  | 1.470  | 1.567  | Servicio 6           | N° atendidos        | 893.7                  | 902.6 | 911.4 |
|                      | Long Max.           | 11.77                  | 12.27  | 12.58  | 1A1B aut             | N° llegadas         | 337.3                  | 342.9 | 348.5 |
|                      | Espera Max          | 0.844                  | 0.850  | 0.855  | 1A1B mot             | N° llegadas         | 594.3                  | 602.9 | 611.4 |
|                      | Espera prom         | 0.220                  | 0.223  | 0.226  | 1C1D aut             | N° llegadas         | 66.06                  | 69.37 | 72.68 |
| Cola 4               | Long. prom          | 0.280                  | 0.333  | 0.386  | 1C1D mot             | N° llegadas         | 248.2                  | 253.7 | 259.3 |
|                      | Long Max.           | 8.776                  | 9.333  | 9.891  | 2A2C2E a             | N° llegadas         | 256.6                  | 292.8 | 298.9 |
|                      | Espera Max          | 0.345                  | 0.354  | 0.364  | 2A2C2E m             | N° llegadas         | 521.2                  | 526.0 | 530.8 |
|                      | Espera prom         | 0.079                  | 0.081  | 0.082  | 2B2D aut             | N° llegadas         | 236.2                  | 241.9 | 247.6 |
| Servicio 1           | N° atendidos        | 933.47                 | 943.47 | 953.47 | 2B2D mot             | N° llegadas         | 651.5                  | 660.4 | 669.3 |

### 2.3.6. Validación y Análisis de Sensibilidad

Para realizar una correcta validación del modelo es preciso analizar primero si la lógica operacional del modelo es correcta, así, se realizaron observaciones del programa de computadora en funcionamiento, ya que la ayuda visual proporciona facilidad para detectar errores en tiempo de ejecución. Se corroboró que los semáforos operaran de acuerdo al sistema real, tanto en tiempo como en secuencia de operación, además de que cumplieran su función de forma efectiva, es decir, regular el flujo de vehículos de acuerdo a los colores de la luz.

Finalmente se visualizó que efectivamente hubiese flujo de vehículos por todas las bifurcaciones, puntos de origen y destino posibles. Los objetos de simulación que permiten evaluar si el modelo es una buena abstracción de la realidad son la cantidad de llegadas que se generan, ya que estos fueron precisamente los datos que se recolectaron.

Para realizar una validación numérica se emplea en este caso la comparación de los datos reales con los arrojados por el modelo. Se realizan 30 corridas de simulación con la configuración del modelo actual y los parámetros calculados e ingresados al software, en la Tabla 4 se muestra la comparación con el respectivo porcentaje de variación. Como se puede ver las variaciones porcentuales son relativamente bajas, exceptuando algunas que alcanzan más del 10%, sin embargo hay que tener en cuenta que el modelo construido es probabilístico y las posibilidades de que los resultados sean totalmente iguales a los datos reales son prácticamente nulas. El modelo se da por validado después de esta comparación y se procede a realizar variaciones con el fin de proponer alternativas de mejoramiento.

Tabla 3. Validación del Modelo

| Objeto de Simulación | Medida de Desempeño | Real | Simulado | % variación |
|----------------------|---------------------|------|----------|-------------|
| G 1A 1B Autos        | N° llegadas         | 319  | 326.9    | 2.48%       |
| G 1A 1B Motos        | N° llegadas         | 574  | 595.7    | 3.78%       |
| G 1C 1D Autos        | N° llegadas         | 66   | 69.367   | 5.10%       |
| G 1C 1D Motos        | N° llegadas         | 243  | 253.7    | 4.40%       |
| G 2A 2C 2E Aut       | N° llegadas         | 229  | 271.7    | 16.68%      |
| G 2A 2C 2E Mot       | N° llegadas         | 629  | 549      | -12.72%     |
| G 2B 2D Aut          | N° llegadas         | 278  | 251      | -9.39%      |
| G 2B 2D Mot          | N° llegadas         | 501  | 580.4    | 15.85%      |

Se realizaron variaciones en los parámetros calculados para la simulación, una disminución del 10% y un aumento en la misma proporción, y se realizan 30 corridas del sistema inicial, y 30 corridas para cada una de las variaciones. Los resultados se presentan en la Tabla 4. Para este caso se consideran únicamente las variaciones en el número de vehículos que entran y salen del sistema, ya que los parámetros calculados corresponden precisamente la distribución de tiempos entre llegada, además las variaciones que se producen en las demás variables del sistema se ocasionan simplemente por el funcionamiento interno, que corresponde a la operación de los



semáforos y la velocidad de los vehículos. Se puede ver claramente que las variaciones en la cantidad de ingresos y salidas del sistema son bastante proporcionales al valor inicial, correspondiente a la simulación del comportamiento real. El modelo no es muy sensible, lo cual es bastante positivo y otorga más argumentos para utilizarlo como una buena representación del sistema.

Tabla 4. Análisis de Sensibilidad

| Objeto de Simulación | Medida de desempeño | Actual   | -10% TELL | % Variación | +10% TELL | % Variación |
|----------------------|---------------------|----------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| Salida 1             | Nº salidas          | 1593,567 | 1774,233  | 11,34%      | 1447,067  | -9,19%      |
| Salida 2             | Nº salidas          | 597,567  | 665,733   | 11,41%      | 543,033   | -9,13%      |
| Salida 3             | Nº salidas          | 55,100   | 61,167    | 11,01%      | 49,967    | -9,32%      |
| Salida 4             | Nº salidas          | 744,167  | 824,867   | 10,84%      | 676,833   | -9,05%      |
| G 1A 1B Autos        | Nº entradas         | 342,900  | 380,100   | 10,85%      | 310,733   | -9,38%      |
| G 1A 1B Motos        | Nº entradas         | 602,900  | 671,233   | 11,33%      | 550,267   | -8,73%      |
| G 1C 1D Autos        | Nº entradas         | 69,367   | 78,000    | 12,45%      | 62,867    | -9,37%      |
| G 1C 1D Motos        | Nº entradas         | 253,700  | 281,033   | 10,77%      | 230,333   | -9,21%      |
| G 2A 2C 2 E Aut      | Nº entradas         | 292,767  | 324,833   | 10,95%      | 266,800   | -8,87%      |
| G 2A 2C 2E Mot       | Nº entradas         | 526,000  | 587,433   | 11,68%      | 476,400   | -9,43%      |
| G 2B 2D Autos        | Nº entradas         | 241,900  | 269,167   | 11,27%      | 219,300   | -9,34%      |
| G 2B 2D Motos        | Nº entradas         | 660,400  | 733,800   | 11,11%      | 600,567   | -9,06%      |

### 2.3.7 Alternativa de mejoramiento

La alternativa de solución que se plantea para este sistema consiste en disminuir el tiempo de operación de los semáforos 2 y 3, cada uno en 8 segundos, quedando con un tiempo de operación de 17 segundos; y el semáforo 1 en 4 segundos. En total son 20 segundos que se proporcionan para el paso de peatones cada 66 segundos. Así mismo se eliminan los retrasos existentes en el punto 2 (entre semáforo y semáforo), a costa de incrementar en una pequeña cantidad las colas y el tiempo de espera en este cruce, con el fin de favorecer la situación en el punto 1, donde se notan disminuciones considerables en los tiempos de espera y longitudes de colas. Se realizaron 30 corridas con las modificaciones mencionadas y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados Alternativa de Mejoramiento 1

| Objeto de simulación | Medida de desempeño | Intervalo de confianza |        |        | Objeto de simulación | Medida de desempeño | Intervalo de confianza |        |        |
|----------------------|---------------------|------------------------|--------|--------|----------------------|---------------------|------------------------|--------|--------|
|                      |                     | -95%                   | Prom.  | 95%    |                      |                     | -95%                   | Prom.  | 95%    |
| Salida 1             | Nº salidas          | 1576.8                 | 1590.6 | 1604.3 | Cola 5               | Long. prom          | 0.67                   | 0.74   | 0.80   |
| Salida 2             | Nº salidas          | 589.9                  | 598.1  | 606.4  |                      | Long Max.           | 6.98                   | 7.33   | 7.68   |
| Salida 3             | Nº salidas          | 52.27                  | 55.43  | 58.60  |                      | Espera Max          | 0.63                   | 0.63   | 0.64   |
| Salida 4             | Nº salidas          | 730.0                  | 741.3  | 752.7  |                      | Espera prom         | 0.16                   | 0.16   | 0.17   |
| Cola 1               | Long. prom          | 1.058                  | 1.122  | 1.186  | Cola 6               | Long. prom          | 1.16                   | 1.25   | 1.35   |
|                      | Long Max.           | 9.475                  | 10.033 | 10.592 |                      | Long Max.           | 7.97                   | 8.37   | 8.77   |
|                      | Espera Max          | 0.805                  | 0.810  | 0.815  |                      | Espera Max          | 0.69                   | 0.69   | 0.70   |
|                      | Espera prom         | 0.207                  | 0.211  | 0.215  |                      | Espera prom         | 0.20                   | 0.21   | 0.21   |
| Cola 2               | Long. prom          | 0.198                  | 0.224  | 0.250  | Servicio 2           | Nº atendidos        | 317.36                 | 322.90 | 328.44 |
|                      | Long Max.           | 3.974                  | 4.267  | 4.560  | Servicio 3           | Nº atendidos        | 1192.6                 | 1205.8 | 1218.9 |
|                      | Espera Max          | 0.529                  | 0.530  | 0.532  | Servicio 4           | Nº atendidos        | 871.76                 | 881.67 | 891.57 |
|                      | Espera prom         | 0.126                  | 0.130  | 0.133  | Servicio 5           | Nº atendidos        | 811.23                 | 819.67 | 828.11 |
| Cola 3               | Long. prom          | 0.604                  | 0.677  | 0.749  | Servicio 6           | Nº atendidos        | 894.06                 | 902.77 | 911.47 |
|                      | Long Max.           | 9.664                  | 10.233 | 10.802 | 1A1B aut             | Nº llegadas         | 337.3                  | 342.9  | 348.5  |
|                      | Espera Max          | 0.573                  | 0.576  | 0.580  | 1A1B mot             | Nº llegadas         | 594.4                  | 602.9  | 611.4  |
|                      | Espera prom         | 0.101                  | 0.103  | 0.105  | 1C1D aut             | Nº llegadas         | 66.06                  | 69.37  | 72.67  |
| Cola 4               | Long. prom          | 0.587                  | 0.658  | 0.730  | 1C1D mot             | Nº llegadas         | 248.2                  | 253.7  | 259.2  |
|                      | Long Max.           | 9.585                  | 10.300 | 11.015 | 2A2C2E a             | Nº llegadas         | 286.6                  | 292.8  | 298.9  |
|                      | Espera Max          | 0.606                  | 0.609  | 0.612  | 2A2C2E m             | Nº llegadas         | 521.2                  | 526.0  | 530.8  |
|                      | Espera prom         | 0.152                  | 0.155  | 0.158  | 2B2D aut             | Nº llegadas         | 236.2                  | 241.9  | 247.6  |
| Servicio 1           | Nº atendidos        | 935.02                 | 945.20 | 955.38 | 2B2D mot             | Nº llegadas         | 651.5                  | 660.4  | 669.3  |

La segunda alternativa de mejora consiste en cambiar el sentido de circulación. La propuesta se presenta en la Figura 6 En la alternativa 1 se pudieron ver buenos resultados de disminución de tiempos de espera y longitudes de cola en la posición 1, así, para la presente propuesta se realiza una redistribución de tiempos similar: Al semáforo 2 se le restan 8 segundos de funcionamiento y se le añaden al semáforo 1, quedando este último con un tiempo de 33 segundos en verde; también se eliminan los retrasos se la posición 2. De esta forma los peatones tienen 53 segundos para cruzar la calle y no se interrumpe el flujo vehicular. En la Tabla 7 se presentan los resultados promedio de 30 corridas realizadas, con sus respectivos intervalos de confianza.

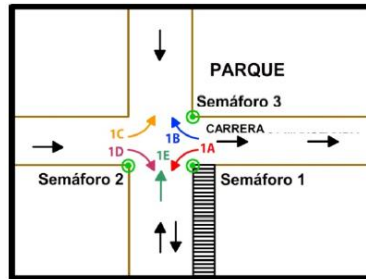
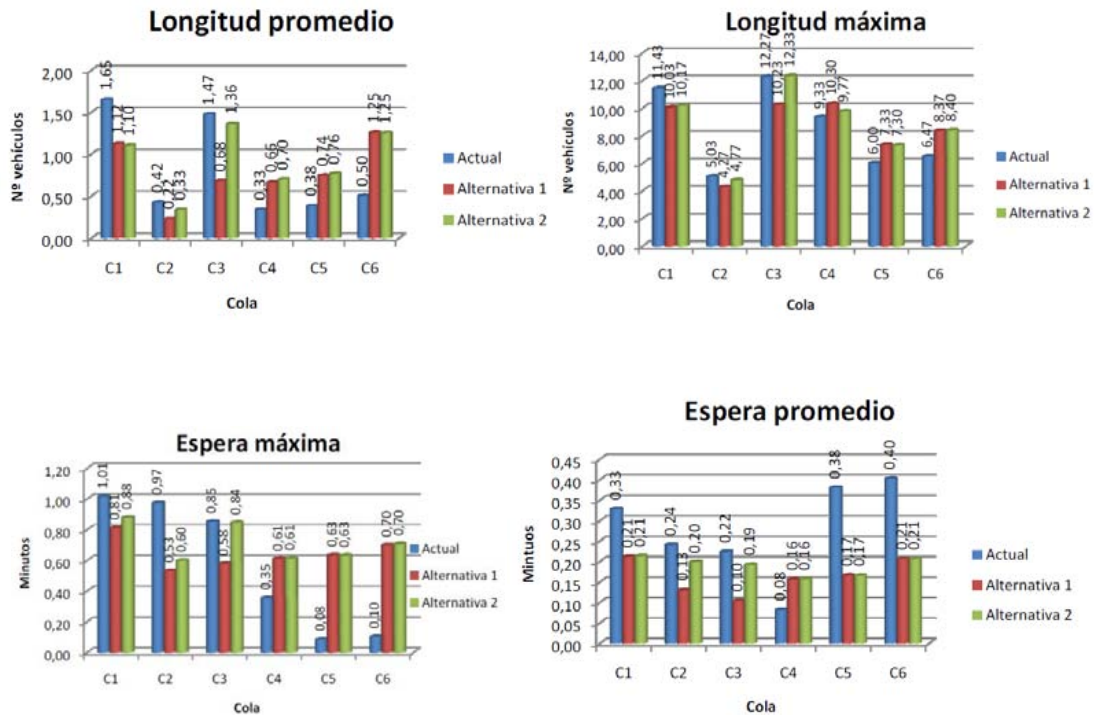


Figura 6. Cambio de Circulación

Tabla 7. Resultados Segunda Alternativa de Mejora.

| Objeto de simulación | Medida de desempeño | Intervalo de confianza |        |        | Objeto de simulación | Medida de desempeño | Intervalo de confianza |        |        |
|----------------------|---------------------|------------------------|--------|--------|----------------------|---------------------|------------------------|--------|--------|
|                      |                     | -95%                   | Prom.  | 95%    |                      |                     | -95%                   | Prom.  | 95%    |
| Salida 1             | N° salidas          | 1579.5                 | 1593.4 | 1607.3 | Cola 5               | Long. prom          | 0.69                   | 0.76   | 0.83   |
| Salida 2             | N° salidas          | 589.8                  | 597.8  | 605.9  |                      | Long Max.           | 6.91                   | 7.30   | 7.69   |
| Salida 3             | N° salidas          | 52.47                  | 55.63  | 58.79  |                      | Espera Max          | 0.63                   | 0.63   | 0.63   |
| Salida 4             | N° salidas          | 731.78                 | 743.20 | 754.62 |                      | Espera prom         | 0.16                   | 0.17   | 0.17   |
| Cola 1               | Long. prom          | 1.029                  | 1.102  | 1.174  | Cola 6               | Long. prom          | 1.16                   | 1.25   | 1.34   |
|                      | Long Max.           | 9.578                  | 10.167 | 10.756 |                      | Long Max.           | 7.96                   | 8.40   | 8.85   |
|                      | Espera Max          | 0.873                  | 0.878  | 0.883  |                      | Espera Max          | 0.69                   | 0.71   | 0.71   |
|                      | Espera prom         | 0.209                  | 0.213  | 0.217  |                      | Espera prom         | 0.20                   | 0.21   | 0.21   |
| Cola 2               | Long. prom          | 0.310                  | 0.332  | 0.355  | Servicio 2           | N° atendidos        | 317.7                  | 323.3  | 328.8  |
|                      | Long Max.           | 4.478                  | 4.767  | 5.056  | Servicio 3           | N° atendidos        | 1196.2                 | 1209.4 | 1222.6 |
|                      | Espera Max          | 0.595                  | 0.597  | 0.599  | Servicio 4           | N° atendidos        | 872.59                 | 882.6  | 892.6  |
|                      | Espera prom         | 0.194                  | 0.198  | 0.202  | Servicio 5           | N° atendidos        | 811.5                  | 819.8  | 828.1  |
| Cola 3               | Long. prom          | 1.268                  | 1.356  | 1.445  | Servicio 6           | N° atendidos        | 893.8                  | 902.5  | 911.2  |
|                      | Long Max.           | 11.77                  | 12.33  | 12.90  | 1A1B aut             | N° llegadas         | 337.3                  | 342.9  | 348.5  |
|                      | Espera Max          | 0.840                  | 0.843  | 0.847  | 1A1B mot             | N° llegadas         | 594.4                  | 602.9  | 611.4  |
|                      | Espera prom         | 0.188                  | 0.191  | 0.194  | 1C1D aut             | N° llegadas         | 66.06                  | 69.37  | 72.67  |
| Cola 4               | Long. prom          | 0.609                  | 0.695  | 0.781  | 1C1D mot             | N° llegadas         | 248.2                  | 253.7  | 259.2  |
|                      | Long Max.           | 9.300                  | 9.767  | 10.234 | 2A2C2E a             | N° llegadas         | 286.6                  | 292.8  | 298.9  |
|                      | Espera Max          | 0.608                  | 0.611  | 0.614  | 2A2C2E m             | N° llegadas         | 521.2                  | 526.0  | 530.8  |
|                      | Espera prom         | 0.153                  | 0.762  | 0.831  | 2B2D aut             | N° llegadas         | 236.2                  | 641.9  | 247.5  |
| Servicio 1           | N° atendidos        | 933.95                 | 944.13 | 954.32 | 2B2D mot             | N° llegadas         | 651.5                  | 660.4  | 669.3  |

Las Figuras 7 a 10 muestran la comparación de longitudes y tiempos de espera en cola para el funcionamiento actual del sistema y las dos alternativas propuestas



Se puede decir que las dos alternativas son buenas, ya que cumplen el objetivo del estudio, es decir, proporcionan tiempo para que el peatón cruce sin violar las normas respetando la movilidad vial.

### 8. conclusiones

La configuración de los semáforos en el funcionamiento actual no es adecuada, el análisis es suficiente para advertir que las holguras que manejan los cambios en la posición 2 no son convenientes, ya que provocan desequilibrio en los tiempos de espera con respecto a la posición 1.

Si se eliminan las holguras de la semaforización en la posición 2 y se redistribuyen los tiempos en la posición 1 se puede lograr una buena mejora, respetando al peatón y equilibrando los tiempos de espera.

Al realizar un cambio de sentido de circulación alrededor del parque se pueden lograr resultados muy provechosos, que se ven incrementados si se realiza la redistribución de tiempos en los semáforos mencionada anteriormente.

Además de las mejoras que proporciona el cambio de sentido de circulación y se presentan en este trabajo, en el sistema real se pueden observar algunas que son bastante evidentes, y que conciernen facilidades para el transporte público.

### Agradecimientos.

Agradecemos el soporte financiero brindado por La Fundación Universitaria Católica del Norte para el desarrollo este estudio.

## Referencias

- Bin, J., Rui, J., Zi-You, G y Xiao-Mei, Z. (2005): The effect of mixed vehicles on traffic flow in two lane cellular automata model. *International Journal of Modern Physics C: Computational Physics & Physical Computation*, Oct2005, Vol. 16 Issue 10, p1617-1627, 11p, 14 Graphs.
- Cardenas, M., Gaviria, A y Melendez, M. (2005): La infraestructura de transporte en Colombia. FEDESARROLLO, Agosto.
- Cheng, Y. (1998): Rule-based train traffic reactive simulation model applied artificial intelligence, jan1998, vol. 12 issue 1, p5-27, 23p.
- Dyner, I., Peña G y Arango S. (2008): Modelamiento para la Simulación de Sistemas socio-económicos y naturales. Ed. Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Meng Q y Ling H. (2008): Optimizing Contraflow Scheduling Problem: Model and Algorithm *Journal of Intelligent Transportation Systems*, Jul-Sep2008, Vol. 12 Issue 3, p126-138, 13p, 5 Diagrams, 2 Charts, 7 Graphs; DOI: 10.1080/15472450802262349
- Ministerio de transporte (2007 a), Diagnóstico del Sector Transporte, Oficina Asesora de Planeación.
- Mohammed, O., Chao W y Stephen I. (2010): Road Traffic Congestion and Crash Severity: Econometric Analysis Using Ordered Response Models *Journal of Transportation Engineering*, May2010, Vol. 136 Issue 5, p424-435, 12p, 3 Charts, 4 Graphs; DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000044.
- Ospina, G. (2004): Recent Economic Development in Infrastructure (REDI), Estudio y Apoyo del sector transporte en Colombia.
- Sarmiento Iván. (2011). Reflexiones sobre el Plan Estratégico de Movilidad de Medellín 2008-2011. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Ingeniería Civil –100 años
- Sarmiento, E. (1996): La crisis de la infraestructura vial, centro de estudios económicos, santa fe de Bogotá, Colombia, Editorial escuela Colombiana de ingeniería.
- Yaser, H. (2002): Calibrating Simulation Models for Advanced Traveler Information Systems/Advanced Traffic Management Systems. *Applications Journal of Transportation Engineering*, Jan/Feb2002, Vol. 128 Issue 1, p80, 9p, 4 Diagrams, 1 Chart, 5 Graphs.
- Holmgren, J., Davidsson (2012), Paul., Persson, Jan A and Ramstedt Linda . TAPAS: A multi-agent-based model for simulation of transport chains. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Volume 23, April 2012, Pages 1-18.
- Jaoua, A., Riopel, D and Gamache M (2012). *Simulation Modelling Practice and Theory*, Volume 21, Issue 1, February 2012, Pages 78-90. A simulation framework for real-time fleet management in internal transport systems.
- Labeau, P and Zio(2002), E Procedures of Monte Carlo transport simulation for applications in system engineering. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 77, Issue 3, September 2002, Pages 217-228.