

# Simulación del tráfico de autos en una intersección: desde la perspectiva de una plataforma multiagente

## Simulation of an intersection of vehicular traffic: from the perspective of a multi-agent platform

Camacho, Julia<sup>1\*</sup>; Medina, Sebastián,<sup>1</sup> y Terán, Oswaldo,<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Investigación de Operaciones, <sup>2</sup>CESIMO, <sup>3</sup>CEMISID,  
Escuela de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes  
Mérida 5101 - Venezuela  
juliack55@gmail.com

### Resumen

*La problemática actual de movilidad en la ciudad de Mérida genera interrogantes acerca de qué tan apropiadas son las estrategias de control de tráfico de autos aplicadas en las redes urbanas a nivel local – sin embargo, sabemos que el problema no es solo local, sino también nacional e internacional –, así como del potencial de estudios de simulación para enfrentar las dificultades locales y nacionales. Se requiere comprender el fenómeno y develar su trasfondo, el cual se muestra más y más dramático cada día, a fin de proponer soluciones locales. Con esto en mente, se desarrolla un modelo multiagente, en una conocida plataforma de simulación, que simula el tráfico de automóviles en una intersección de la ciudad de Mérida. Este modelo se adapta a las características de una intersección real, del tipo de tráfico (conductores particulares, taxis, etc.), así como a ciertos patrones de comportamiento de los conductores reales. Se simulan algunos escenarios de interés a fin de explorar los cambios en el comportamiento del sistema. Los resultados permiten elaborar conclusiones interesantes acerca del comportamiento del modelo y de la realidad, dado que el modelo es exitosamente validado, algunas no intuitivamente esperadas.*

**Palabras clave:** Simulación social, sistemas multiagentes, modelado de tráfico, NetLogo, tráfico en intersección.

### Abstract

*Traffic jams and violation of traffic norms and laws are common at Merida city roads, generating diverse mobility problems. It is necessary to study and understand the problem in order to propose locally applicable solutions. Simulation models, and in particular, multiagent based social simulation (MABS), are a promising approach. This paper presents a MABS model of a vehicular intersection at Merida City. The model represents characteristics of the real situation: particularities of the real intersection, type of vehicles (common people drivers, taxis, etc.), and behavioural patterns of the drivers. Pertinent scenarios are simulated in order to explore the model behaviour. Relevant conclusions, some counter intuitive, are drawn in. The model is successfully verified, and validated so that conclusions can be extrapolated to the real system.*

**Key words:** Social simulation, MABS, traffic modelling, NetLogo, traffic in an intersection.

### 1 Introducción

En la actualidad, a nivel mundial, y en especial en Latinoamérica y en particular en Venezuela, el tránsito de automóviles se ha convertido en un problema que atañe a todos los ciudadanos que día a día sufren una larga espera para poder llegar a su destino, producto de los terribles congestionamientos. En Europa, EE. UU. y Japón, los problemas de tránsito aunque persisten generalmente son menos graves que en Latinoamérica, dada la disponibilidad de

mayores recursos económicos, tecnológicos y organizacionales. Es así como allí aparecen los trenes de gran velocidad, el metro con múltiples líneas en cualquier ciudad, los trenes eléctricos dentro de las ciudades con recorridos diferentes y alternos a los de las vías de autos, etc.

El grave problema mencionado ha sido abordado de diferentes maneras por diversos investigadores, a fin de proponer soluciones desde diversos puntos de vista. Muchos de estos investigadores han utilizado el modelado computacional por ser una alternativa que permite experi-

mentar a bajo costo, sin afectar el sistema estudiado. Algunos científicos han usado autómatas celulares (Rodríguez, 2002), Redes de Petri (Cerón, 2007), entre otros enfoques, modelos y teorías, para entender dicho problema. Estos modelos han permitido estudiar los sistemas de tráfico como problemas complejos, y relacionar el sistema real con teorías como las de sistemas caóticos.

Los agentes o Sistemas Multiagentes (SMA) han sido otro de los métodos exitosamente usados para tal fin. En los SMA se representan como agentes autónomos e individuales a cada uno de quienes toman decisión en el sistema a modelar, lo cual permite una buena adaptación del modelo a la situación real. Estos sistemas se diferencian de los primeros enfoques mencionados en cuanto a que permiten la toma de decisión de cada ente involucrado, a diferencia de cuándo éstos son obviados o sobre-simplificados. Representan una rama de estudio ampliamente explorada dentro de la Simulación Social, donde se han creado asociaciones internacionales, tales como la iberoamericana (SIMSOCIA, 2011) y la europea (ESSA, 2011), y cuyos trabajos se publican en revistas de acceso libre tales como JASS (JASS, 2011). Los SMA han permitido aplicar teorías como la Criticidad Auto-Organizada al estudio de sistemas de tráfico (Paczuski y Nagel, 1995). Precisamente uno de los elementos que define la complejidad de un sistema de tráfico es el llamado por algunos Mecanismo Vicario, es decir, la capacidad de tomar decisiones de un conjunto de entes heterogéneos (los conductores, en este caso); característica obviada, como se ha dicho, en otro tipo de modelos, como los modelos de ecuaciones diferenciales o la teoría de colas.

Los SMA han sido utilizados ampliamente en el desarrollo de modelos para el tráfico de automóviles. Algunos de los trabajos más trascendentes en esta área son los de (Gershenson, 1998), (Bazzan y col., 1999), (Bazzan y col., 2002), (Champion y col., 1999), (Erol y col., 2002), (Paruchuri y col., 2002), (Guzmán y col., 2002), (Klügl-frohnmeier y Bazzan, 2002), (De Schutter, 2003), (Balmer y col., 2004), (Lin y col., 2005), (Vogel y Nagel, 2005), (Zhang y col., 2005), (Cao y col., 2006), (Jian y col., 2006), (Gregoire y col., 2007).

En este artículo se presenta el desarrollo de un modelo multiagente para el flujo de automóviles presentes en una intersección usando como plataforma de desarrollo a NetLogo (NetLogo, 2009). Se pretende observar comportamientos emergentes en el tráfico simulado y de hacer conjeturas sobre el tráfico real, para el caso de una intersección de la ciudad de Mérida.

El objetivo de la investigación no es el desarrollo de una herramienta Multi-agente, de una técnica, de un software o de un algoritmo, sino más bien la exploración de las potencialidades del modelado multiagente, a través de una herramienta o plataforma computacional ya existente (NetLogo, 2009), para entender una problemática social latinoamericana y mundial, en su manifestación local especí-

fica. El modelo incluye elementos de la situación local generalmente obviados en estudios tradicionales o en algunos enfoques del modelado multiagente, como la toma de decisiones de los agentes (más allá de decisiones probabilísticas), donde aparecen aspectos del comportamiento social fundamentales para comprender y poder mejorar la situación problemática. Además, el modelo está basado en un estudio de campo detallado, el cual incluye la recolección de datos que permiten no solo elaborar el modelo sino también validarlo.

El estudio social basado en el modelado y simulación multi-agente tiene diversos enfoques, pudiendo encontrarse también una gran variedad de lenguajes y plataformas computacionales para el diseño y corrida del modelo, así como para el análisis de resultados (CORMAS, 2012; Le Page y col., 2012; REPAST, 2012; SDML, 2012; SWARM, 2012; Perozo y col., 2012; MASON, 2012; Terán y Ablan, 2011).

## 2 Modelo de simulación

Se realizó un análisis de la intersección a modelar y un estudio del comportamiento de los conductores que transitaban por dicha intersección, para posteriormente implementar el modelo de simulación en NetLogo.

### 2.1 Análisis de la intersección

La intersección seleccionada para el estudio la conforman la Calle 26 con la Av. 5 del casco central de la Ciudad de Mérida, Venezuela, la cual cuenta con tres pares de semáforos sincronizados que regulan el flujo de autos que llega desde el oeste, desde el este y desde el sur. Cada uno de estos semáforos presenta un ciclo de 21 segundos para la luz verde y 3 segundos para la luz amarilla. La particularidad de esta intersección permite que se formen embotellamientos, los cuales son de gran interés en los estudios del tráfico. Por esta intersección transitan un gran número de autos, pero en el modelo solo se representan cinco tipos de autos: Los particulares, los de transporte público (taxis, buses y buses) y los autos de carga pesada (camiones), debido a que existen ciertas características pertinentes al tipo de auto que influyen en el comportamiento de los conductores. Para cada uno de estos tipos de autos se realizaron mediciones del ancho y del largo sobre muestras obtenidas en la intersección real, llegando a obtener un promedio de las mismas. Este promedio será utilizado en el modelo para representar el tamaño de los autos, lo que no debe influir significativamente en los resultados de la simulación. Para determinar las proporciones en las que estos cinco tipos de autos concurrían a la intersección se llevó a cabo un estudio de campo, el cual fue realizado por tres observadores dispuestos al este, oeste y norte de la intersección bajo estudio. Se observó durante cinco días, desde las 7:00 am hasta las 8:00 am., el flujo de autos que transitaban por la intersec-

ción. En la Tabla 1 se presentan valores obtenidos en dicha observación.

Tabla 1. Porcentajes de los diferentes tipos de autos en cada dirección

| Tipo de auto | Este (%) | Oeste (%) | Norte (%) |
|--------------|----------|-----------|-----------|
| Particular   | 60       | 63        | 47        |
| Buses        | 8        | 9         | 14        |
| Busetas      | 5        | 5         | 11        |
| Taxis        | 24       | 19        | 24        |
| Camiones     | 3        | 4         | 4         |

## 2.2 Estudio del comportamiento de los conductores

Como resultado del estudio del comportamiento llevado a cabo a los conductores merideños, basado en una encuesta a un total de 180 conductores que transitaban por el casco central de la ciudad de Mérida, se detectaron dos tipos de conductores: los agresivos y los pasivos; ambos representados en el modelo elaborado. Los datos obtenidos fueron analizados y posteriormente revisados por el Dr. Luís Esqueda, Ex Director del Centro de Investigaciones Psicológicas de la Universidad de los Andes, quien elaboró el patrón de comportamiento que presenta a cada uno de estos tipos de conductores. Según este patrón de comportamiento un conductor es agresivo si al menos cumple con alguna de las siguientes condiciones:

- Se acerca excesivamente al vehículo precedente, irrespectando la distancia mínima de seguridad.
- Conduce con cambios frecuentes de carril con invasión de la distancia de seguridad delantera, lateral y trasera de los otros vehículos.
- Conduce a velocidad excesiva para las condiciones del tráfico y normas de la vía.
- Usa el carril que no le corresponde según la velocidad.
- No respeta los semáforos en luz roja, o considera a la luz amarilla como verde.

Se dirá que un conductor es pasivo si presenta un comportamiento contrario al planteado para el conductor agresivo.

Los valores de los parámetros que definen el comportamiento de un conductor pueden observarse en la Tabla 2.

Tabla 2. Valores de los parámetros que definen el comportamiento de los conductores

| Parámetros            | Agresivo (si cumple al menos una) | Pasivo (si cumple todas) |
|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| velocidad             | > 40 Kmph.                        | <= 40 Kmph.              |
| distancia             | <= 1 m                            | > 1 m                    |
| Máxima aceleración    | >7 m/s <sup>2</sup>               | <= 3 m/s <sup>2</sup>    |
| Máxima desaceleración | >17 m/s <sup>2</sup>              | <= 10 m/s <sup>2</sup>   |

En la Tabla 3 se presenta el porcentaje de conductores agresivos y pasivos para cada uno de los cinco tipos de autos bajo estudio. Estos datos fueron obtenidos del total de

conductores encuestados.

Tabla 3. Porcentajes de conductores agresivos y pasivos para los diferentes tipos de autos

| Tipo de auto | Porcentaje de agresivos | Porcentaje de pasivos |
|--------------|-------------------------|-----------------------|
| Particular   | 52                      | 48                    |
| Taxi         | 58                      | 42                    |
| Buseta       | 63                      | 37                    |
| Bus          | 42                      | 58                    |
| Camión       | 5                       | 95                    |

Dadas las limitaciones de espacio de este artículo, los detalles acerca de las reglas que rigen el comportamiento de los conductores no pueden ser agregadas acá con la claridad debida, por lo que recomendamos al lector interesado consultar el trabajo original de Camacho (Camacho, 2008).

## 2.3 Implementación del Modelo en NetLogo

Se modela por medio de agentes a cada uno de los elementos activos, es decir, que toma decisiones, de los que conforman el sistema a modelar, siendo en este caso el sistema el tráfico de autos presente en una intersección. Por lo tanto, los agentes representarían a los conductores que transitan por la intersección, y su comportamiento estaría dado por ciertos parámetros definidos en la sección anterior (por ejemplo, si son o no pasivos).

La plataforma de desarrollo multiagente seleccionada para el estudio fue NetLogo, por ofrecer una interfaz gráfica agradable y de fácil manejo. En NetLogo, el único agente que presenta movilidad dentro de su espacio es el Turtle (Tortuga). A este tipo de agente se le puede incorporar cualquier comportamiento agregándole variables a su sistema de variables internas; así, éste agente tomará sus decisiones de acuerdo al valor que tomen tales variables. Por lo tanto, los conductores son modelados usando este tipo de agente. Los tramos y los semáforos fueron modelados por otro tipo de agente llamado Patch (Parche), el cual es el encargado de modelar el entorno donde se desenvuelven los Turtles. Cada parche tiene un tamaño de 3,31 píxeles y equivale a un metro en la realidad.

Para la representación de la intersección y de los diferentes tipos de autos se tuvo que llevar a cabo una adaptación de las medidas reales a las medidas de los parches (patch) que conforman la interfaz gráfica del NetLogo. En la Tabla 2 se muestran las medidas en metros y las medidas en parches para cada tipo de auto, excepto para la velocidad que se muestra en Km. por hora.

En el modelo, un agente se desplazará por las calles que forman la intersección dependiendo del comportamiento y de la trayectoria seguida, las cuales son asignadas aleatoriamente. A los conductores (agentes) se les permite los cruces a la derecha y la izquierda, los cambios de carril, las paradas, los cruces indebidos, y las infracciones con respecto a la luz roja y amarilla del semáforo. Se presentan cinco

tipos diferentes de autos, con sus tamaños, límites de velocidad, límites máximos de aceleración y de desaceleración. Se elaboraron en total veinte procedimientos que controlan la creación y movimiento de los diferentes tipos de autos, además de reportar salidas de la simulación de interés para el estudio, tales como: número de autos en cola, número de cruces indebidos, y número de autos que irrespetan las señales del semáforo.

La interfaz gráfica de NetLogo presenta una serie de botones que permiten llevar a cabo la simulación. Además, dicha interfaz ofrece a los usuarios veinte deslizadores que permiten manipular los parámetros del sistema y comprobar diferentes escenarios. Las salidas del sistema se observan por medio de monitores que muestran los valores de las mismas para cada paso en la simulación. Para observar con detalle elementos relacionados con el uso de NetLogo, como, por ejemplo, los diferentes botones que permiten controlar los parámetros del modelo y los monitores para cada una de las salidas, entre otros, referimos al lector al trabajo original de Camacho (Camacho, 2008), disponible en la web. De la misma manera, para bajar el software ver NetLogo (NetLogo, 2009).

### 3 Verificación y validación del modelo

Una vez desarrollado el modelo se llevaron a cabo una serie de corridas para verificar y validar el mismo. Según Hoeger (Hoeger, 1997), la verificación también puede ser llamada depuración, dado que consiste en asegurarse de que el modelo hace lo que debe hacer de acuerdo al diseño. Por otra parte, la validación consiste en asegurarse de que los supuestos usados en el desarrollo del modelo son razonables en el sentido de que, si está correctamente implementado, el modelo producirá resultados próximos a los observados en el sistema real.

#### 3.1 Verificación

Para la verificación del modelo se llevó a cabo una prueba de continuidad, la cual consistió en aumentar la densidad de los diferentes tipos de autos y observar los cambios producidos en las salidas del sistema. En principio las proporciones de los diferentes tipos de autos fueron adaptados a valores escogidos libremente, luego éstas se incrementaron en un 100%, para así observar los efectos en las salidas del simulador. Las salidas para los datos escogidos libremente y para los datos con el incremento se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4. Salidas del sistema

| Salidas del sistema                      | Valores iniciales | Val. al aumentar la densidad de autos |
|--|-------------------|---------------------------------------|
| Autos en cola                            | 1630              | 3120                                  |
| Cruces indebidos                         | 74                | 183                                   |
| Infracciones (luz roja del semáforo)     | 16                | 53                                    |
| Infracciones (luz amarilla del semáforo) | 2                 | 9                                     |

De los resultados obtenidos se puede observar que efectivamente las salidas del sistema arrojan valores intuitivamente correctos, por lo que se considera que el modelo pasó la prueba de verificación para las exigencias del estudio planteado.

#### 2.2. Validación

Para dar soporte a la validez del modelo se llevó a cabo una comparación entre el promedio de cruces indebidos arrojados por el modelo y el promedio de cruces indebidos obtenidos en un estudio de campo, en el cual se observó, durante 10 días desde las 7:00 a.m. hasta las 8:00 a.m., el número de ocurrencias de este tipo de infracción realizada por los conductores agresivos. Según los datos (ver Tabla 5) la estimación del número promedio de cruces indebidos está dado por:

$$\bar{x} = (1/10) \sum_{i=1}^{10} x_i = 89,5 \quad (1)$$

Y el intervalo de confianza para la media de aproximadamente un 90% es (para mas detalles acerca de estas ecuaciones, ver Hoeger (1997, p. III-13), donde  $t_{1-\alpha/2, n-1}$  se refiere a la distribución t de Student con parámetros  $(1-\alpha/2, n-1)$ ):

$$\begin{aligned} \bar{X} \pm t_{1-\alpha/2; n-1} \sqrt{\text{Var}(x)/n} \\ = 89,5 \pm t_{0,95;9} \sqrt{258,3/10} \\ = 89,5 \pm 1,8331 \times 5,082 = 89,5 \pm 9,32 \end{aligned} \quad (2)$$

Por lo tanto, se puede decir que con un 90% de confiabilidad el número de cruces indebidos está contenido en el intervalo [80,18; 98,81] cruces.

Tabla 5. Número de cruces indebidos

| Nº de observación | Nº de cruces indebidos |
|-------------------|------------------------|
| 1                 | 80                     |
| 2                 | 79                     |
| 3                 | 85                     |
| 4                 | 81                     |
| 5                 | 77                     |
| 6                 | 129                    |
| 7                 | 96                     |
| 8                 | 102                    |
| 9                 | 87                     |
| 10                | 79                     |

Para el cálculo del promedio de cruces indebidos arrojados por el simulador se realizaron en total 10 corridas con el fin de obtener una buena estimación. Los resultados de estas corridas se pueden observar en la Tabla 6.

Tabla 6. Número de cruces indebidos arrojados por el simulador

| Número de corrida | Número de cruces indebidos |
|-------------------|----------------------------|
| 1                 | 85                         |
| 2                 | 73                         |
| 3                 | 82                         |
| 4                 | 86                         |
| 5                 | 77                         |
| 6                 | 82                         |
| 7                 | 85                         |
| 8                 | 91                         |
| 9                 | 76                         |
| 10                | 89                         |

El promedio de cruces indebidos arrojados por el modelo, al aplicar la ecuación (1) de nuevo es 82,6; y el intervalo de confianza de aproximadamente un 90%, aplicando la ecuación (2) (la varianza de  $x$  en este caso es: 24,26), es:  $82,6 \pm 2,84$ .

Así, se puede decir que con un 90% de confiabilidad el número de cruces indebidos esta contenido en el intervalo [79,76; 85,44] cruces.

Sí se compara el valor de este promedio con el promedio obtenido en el estudio de campo, se puede observar que estos valores son cercanos; y, más aún, que el intervalo de confianza resultante de la experimentación con el modelo está contenido en el intervalo de confianza resultante de observar la realidad; por lo que se consideran aceptables las salidas arrojadas por el simulador, y que el modelo es válido.

#### 4 Análisis de escenarios

En esta sección se plantea modificar los valores de algunos parámetros del sistema y observar los cambios en el flujo total del tráfico. Como ya se ha dicho anteriormente las salidas del sistema son: El número de autos en cola, el número de autos que realizan cruces indebidos, y el número de conductores que irrespetan tanto la luz roja como la luz amarilla del semáforo; por lo tanto, las observaciones de los cambios en el sistema se harán sobre los cambios de estas variables. Se plantean dos escenarios (o dos familias de escenarios, ya que se trata de explorar varios escenarios en cada caso, a través del cambio de una variable controlada) como ejemplo del tipo de observaciones que se puede realizar en este tipo de estudio, a fin de entender mejor el sistema empírico estudiado, y orientar la toma de decisiones en torno a este sistema, por ejemplo, del Estado Venezolano (en el presente caso de estudio). Se espera intuitivamente, además, dada la familiarización de los investigadores y de la comunidad de Mérida con el sistema en estudio, que dentro de cada escenario la variable modificada genere resultados de interés como cambios en el comportamiento de los conductores, y por consiguiente cambios en el flujo total de tráfico. La variable que define (o variable a ser cambiada en) cada escenario es: para el Primer Escenario: porcentaje

de conductores que son agresivos; para el Segundo Escenario: porcentaje de autos que son particulares. A continuación se presenta los resultados de explorar estos dos escenarios.

##### 4.1 Primer escenario (o familia de escenarios)

El primer escenario, entonces, presenta los efectos en las salidas del sistema de diferentes porcentajes de conductores agresivos. En este caso se realizaron observaciones sobre las salidas para incrementos en un 20% del porcentaje de conductores agresivos, comenzando desde un 0% hasta un 100%. El modelo se corrió 30 veces por un total de 3600 ticks (un tick representa un paso en la simulación), lo que representa una hora en el tiempo real. Los efectos de la variación del porcentaje de conductores agresivos sobre el número de autos en cola se muestran en la Fig. 1.

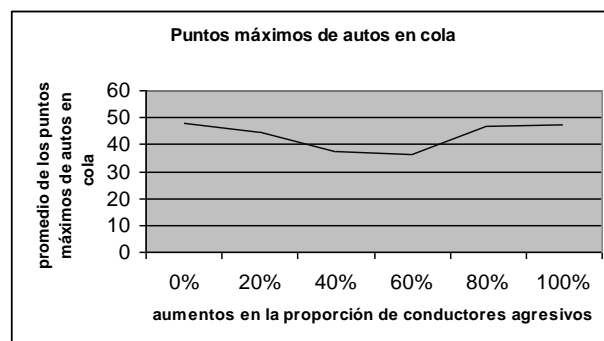


Fig. 1. Número de autos en cola

En la Fig. 1 se puede observar que para porcentajes menores a un cierto valor  $v$  entre el 70% y 80% de conductores agresivos, el número de autos en cola disminuye ligeramente. Esto podría tener explicaciones como la siguiente: Si en alguno de los segmentos que llegan a la intersección todos los conductores son pasivos no se producirían cambios de carril, cruces indebidos, ni infracciones; así, de alguna manera el comportamiento agresivo ayuda a disminuir los autos en la cola, para este caso.

En esta misma figura también se observa que, para porcentajes de conductores agresivos mayores a  $v$ , el número de autos en cola aumenta. Esto posiblemente se deba a que cuando el número de conductores agresivos se hace muy alto se producen atascamientos, o los agresivos comienzan a estorbare entre sí, ya que no todos pueden realizar el mismo tiempo cambios de carril, cruces indebidos, o infracciones. Lo paradójico e inesperado es que, si el objetivo es disminuir el tamaño de la cola, pareciera deseable la existencia de un porcentaje apropiado de conductores agresivos (menor a  $v$ ). Sería interesante explorar posibles formas de mejorar el problema de tráfico tomando en cuenta este tipo de resultados. En futuros trabajos se podría explorar escenarios con tales soluciones posibles. Una manera alternativa en el sistemas real sería manteniendo un grupo

de fiscales bien entrenados que permitan implementar este tipo de movimiento de vehículos de una manera controlada, a fin de que los vehículos realicen movimientos que parecerían no normales y violatorios de normas de tránsito, pero guiados por personas bien entrenadas. Tal vez la experiencia con los fiscales pueda ser implementada en un sistema de guía de tránsito inteligente, basado en herramientas heurísticas.

Los efectos de la variación del porcentaje de conductores agresivos sobre el número de cruces indebidos se muestran en la Fig. 2. En esta figura se puede observar que, de nuevo para un valor en el intervalo [70%, 80%], llamémoslo  $v_1$ , de conductores agresivos, ya el número de cruces indebidos no puede seguir aumentando, lo que no es contrario a la intuición que podemos tener, ya que el colapso generado en el cruce no permite un incremento de los mismos. También se puede observar un punto crítico, de inflexión de la curva, previo al colapso total, para un valor  $v_2$  en el intervalo [20%, 40%].

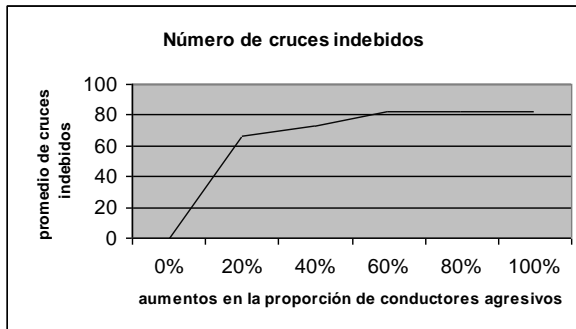


Fig. 2. Número de autos que realizan cruces indebidos

Los efectos de la variación del porcentaje de conductores agresivos sobre el número de conductores que irrespetan la luz roja y la luz amarilla del semáforo se muestran en las Figs. 3 y 4. En esto dos casos, se observa que para porcentajes menores a un valor  $v_3$  de conductores agresivos en [20%, 40%], cercano a  $v_2$ , el número de infracciones aumenta, lo que tiene sentido ya que los conductores agresivos son los únicos que realizan infracciones. También se puede observar que para porcentajes de conductores agresivos mayores a  $v_3$  y menores a un valor  $v_4$  en [70%, 80%], cercano a  $v$  y a  $v_1$ , se mantiene el número de infracciones, lo que posiblemente se deba a que si todos los conductores son agresivos, llegará el momento en que no todos puedan realizar al mismo tiempo infracciones. Se observa que para porcentajes de infractores mayores a  $v_4$  el número de infractores disminuye, debido posiblemente al colapso en la intersección. Nótese la cercanía entre  $v$ ,  $v_1$  y  $v_4$ , por un lado, y  $v_2$  y  $v_3$  por el otro. La causa y consecuencias de estas cercanías pueden ser exploradas en estudios futuros.

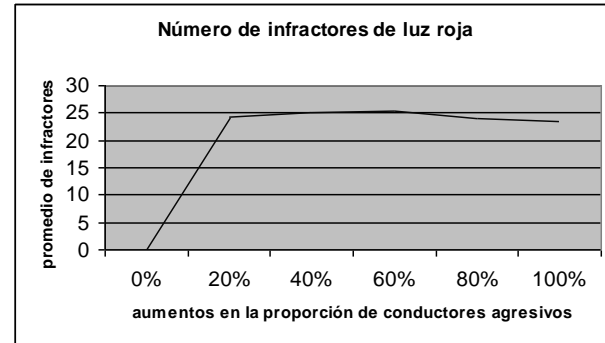


Fig. 3. Número de conductores que irrespetan la luz roja del semáforo

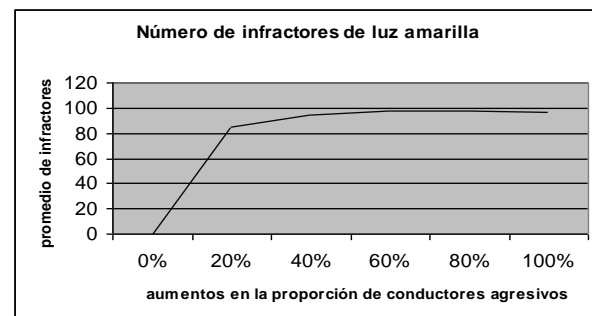


Fig. 4. Número de conductores que irrespetan la luz amarilla del semáforo

#### 4.2 Segundo escenario

En este caso se presentan cambios en el número de autos particulares que transitan por la intersección, esto con la intención de observar de alguna manera los efectos sobre el flujo total del tráfico que podría implicar la aplicación del Plan "Pico y Placa" que restringe el libre tránsito de este tipo de autos. Este plan ya ha sido aplicado en algunos estados del país, como Miranda y Distrito Capital, por lo que se considera de gran interés simular la aplicación de este tipo de plan en el modelo obtenido.

Los efectos de la variación del porcentaje de autos particulares sobre el número de autos en cola se muestran en la Fig. 5. En este caso, se observa que para un porcentaje  $p$  en el intervalo [80%, 100%] de autos particulares existe un incremento gradual en el número de autos en cola, lo que tiene sentido ya que se aumenta el número de autos en el flujo total del tráfico. Sin embargo, para un porcentaje mayor a  $p$  se observa una leve disminución del número de autos en cola, lo cual posiblemente se deba a que, a pesar de haber más autos transitando por la intersección, los conductores de autos particulares son en un 52% agresivos, lo que implica que estos efectúen cambios de carril, cruces indebidos e infracciones.

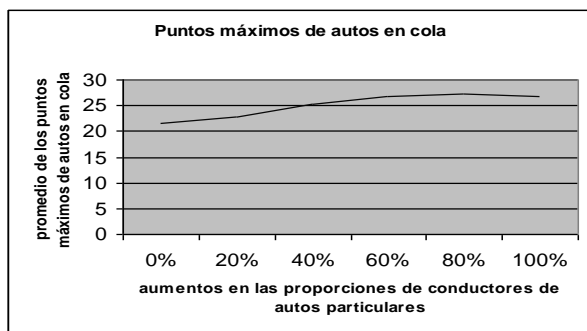


Fig. 5. Número de autos en cola

Los efectos sobre el número de conductores que realizan cruces indebidos se muestran en la Fig. 6.

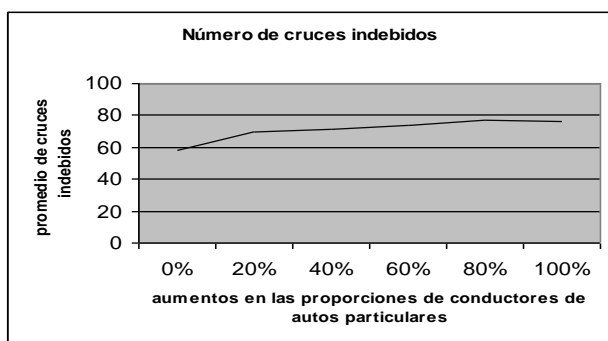


Fig. 6. Número de autos que realizan cruces indebidos

Los efectos sobre el número de conductores que irrespetan la luz roja y la luz amarilla del semáforo se muestran en las Figs. 7 y 8.

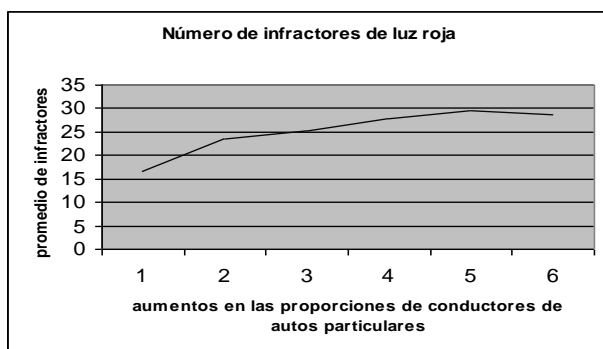


Fig. 7. Número de conductores que irrespetan la luz roja del semáforo

En estos dos casos, se observa que a medida que aumenta el porcentaje de conductores de autos particulares el número de infracciones aumenta, lo que tiene sentido ya que los conductores de autos particulares son en un 52% agresivos, lo que significa que un aumento en el número de autos particulares implicaría un aumento en el número de conductores agresivos.

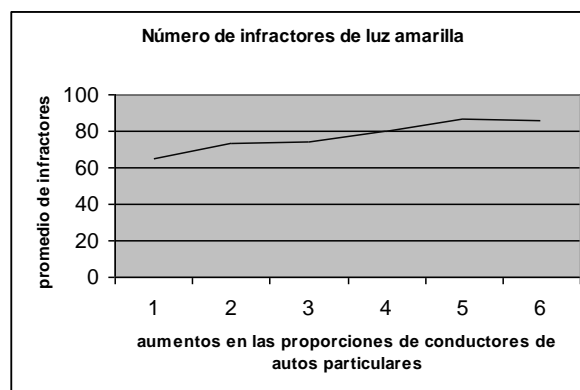


Fig. 8. Número de conductores que irrespetan la luz amarilla del semáforo

### 5 Conclusiones y recomendaciones

Actualmente la ciudad de Mérida, al igual que la mayoría de las ciudades del país, y de Latinoamérica en general, se encuentra sumergida en la caótica situación de los congestionamientos vehiculares, ya que no cuenta con la infraestructura adecuada para el acelerado crecimiento poblacional. Por lo tanto, se hace imperativo el uso de tecnologías como los sistemas multiagente para llevar a cabo la planificación, simulación y observación de los sistemas de tráfico. Sin embargo, para que estas herramientas puedan ser aprovechadas en todo su potencial es necesario que los entes gubernamentales tengan una clara disposición para la inversión respecto a la infraestructura de los sistemas de control y al personal capacitado para su manejo. Esto podría favorecerse por medio de proyectos de investigación que sean financiados por los entes públicos.

Analizando la aplicabilidad de los sistemas multiagente para el modelado del tráfico, cabe destacar la potencialidad que ofrece este tipo de sistemas para representar el comportamiento reactivo y adaptativo de los conductores.

Para el estudio realizado la simulación multiagente facilitó la representación del flujo de autos en la intersección, permitiendo: Representar diferentes tipos de autos, asignarle un comportamiento particular a cada conductor, representar los cambios de carril, los cruces indebidos y las infracciones ocurridas comúnmente en la situación real. Ello muestra como los SMA permiten elaborar modelos que representan bien al sistema real, principal objetivo de este trabajo. Adicionalmente, el modelo fue exitosamente verificado y validado.

Como contribución del modelo realizado al estudio del tráfico de autos se tienen las siguientes conjeturas:

- Para un porcentaje de conductores agresivos menor a un valor en el intervalo [70%, 80%], se consigue: Aliviar las colas en la intersección, aumentar el número de cruces indebidos, y aumentar el número de infracciones. Ello muestra resultados inesperados, como la disminución de

la cola, aunque a costa del aumento de las infracciones, y de la peligrosidad del cruce. Es interesante explorar posibles formas de mejorar el problema de tráfico tomando en cuenta este tipo de resultados. En futuros trabajos se podría explorar escenarios de simulación con tales posibles soluciones. También podría implementarse la solución en el sitio con un grupo humano (fiscales de tránsito) bien entrenados, quienes permitirían implementar este tipo de movimiento de vehículos de una manera controlada. Luego, la experiencia con los fiscales o con modelos de simulación podría ser implementada en un sistema de guía de tránsito inteligente, basado en herramientas heurísticas.

- Para aumentos de la proporción de conductores de autos particulares no muy altas se consigue disminuir el número de autos en cola, al igual que el número de cruces indebidos, y el número de infracciones. Lo que parece deberse a que más del 50% de los conductores particulares son conductores agresivos.
- Los escenarios explorados permitieron observar situaciones un tanto inesperadas o contrarias a la intuición, como por ejemplo: la disminución del número de cruces indebidos para porcentajes de conductores agresivos mayores a un valor  $v$  en el [70%, 80%].

La experiencia de este trabajo, nos permite hacer las siguientes recomendaciones:

- Aplicar la tecnología multiagente para el estudio del tráfico de autos y así obtener modelos que permitan desvelar las causas de los congestionamientos y atascos vehiculares, para así generar soluciones factibles a los graves problemas del tráfico. Estos modelos permiten incluir diversos comportamientos de los agentes.
- Realizar modelos del tráfico en los cuales se incluyan todos los tipos de autos, y efectos más realistas como el cruce de peatones, la presencia de fiscales de tránsito, cambios en las condiciones del tiempo, entre otras.
- Investigar en trabajos futuros la relación entre las variables  $v$ ,  $v_1$  y  $v_4$ , por un lado, y  $v_2$  y  $v_3$  por el otro; mencionadas en la sección 4.1. Estas variables pueden estar relacionadas con transiciones de fase, en la teoría de sistemas caóticos.
- Realizar campañas de concientización sobre el efecto que tiene el cumplimiento de las normas de tránsito sobre el flujo total vehicular, de acuerdo a los resultados de las simulaciones. Es decir, si el violar una norma  $X$  genera cierto tipo de accidentes, o los incrementa en cierto porcentaje, o genera ciertas consecuencias en cuanto al incremento de la(s) cola(s), entonces dar estas explicaciones a los conductores, con los detalles obtenidos de la simulación, podría ayudar a aumentar la consciencia de cada conductor acerca de la situación y problemas de tránsito, así como de su responsabilidad personal en ello.

## Referencias

- Balmer M, Nagel K, Raney B, 2004, Large-scale multi-agent simulations for transportation applications, *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 8 (4), pp. 205-223.
- Bart de Schutter S, Hoogendoorn H, Schuurman S, 2003, A multi-agent case-based traffic control scenario evaluation system, *Proceedings of the IEEE 6th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC'03)*, Shanghai, China, pp. 678-683.
- Bazzan A, Franziska K, 2002, Re-routing agents in an abstract traffic scenario, *19th Proceeding of the Brazilian Symposium on Artificial Intelligence, SBIA, LNAI 5249*, Savador, Brazil, October 26-30, pp. 63-72.
- Bazzan A, Wahle J, Klügl F, 1999, Agents in Traffic Modelling - from Reactive to Social Behavior, *Lecture Notes In Computer Science*, Vol. 1701, *Proceedings of the 23rd Annual German Conference on Artificial Intelligence: Advances in Artificial Intelligence*, pp. 303-306.
- Camacho J, 2008, Estudio del uso de sistemas multiagentes para el modelado del tráfico de autos, Proyecto de grado para obtener el título de Ingeniero de Sistemas, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Cerón O, 2007, Análisis de tráfico vehicular en una zona crítica de la ciudad de Quito, Tesis de Maestría en Sistemas de Control, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- CORMAS, 2012. Se encuentra en <http://cormas.cirad.fr/indexeng.htm>. Fecha de consulta: 10 febrero 2010.
- Champion A, Mandiau R, Kolski C, Heidet A, Kemeny A, 1999, Traffic generation with the SCANer© II simulator: towards a multi-agent architecture, *Proceedings of the Driving Simulation Conference 1999*, Paris, France, pp. 311-324.
- Erol K, Levy R, Wentworth J, 2002, Application of agent technology to traffic simulation. Se encuentra en <http://www.tfhr.gov/advanc/agent.htm>. Fecha de consulta: 13 febrero 2010.
- ESSA, 2011, The European Social Simulation Association. Se encuentra en <http://www.essa.eu.org>. Fecha de consulta: 18 febrero 2010.
- Gershenson C, 1998, Control de tráfico con agentes: CRASH, *Memorias XI Congreso Nacional sobre Informática y Computación*, ANEI, Xalapa, México, pp. 122-130.
- Gregoire PL, Desjardins C, Laumonier J, Chaib-draa B, 2007, Urban traffic control based on learning agents. *Proceedings of the IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, pp. 916-921.
- Guzmán F, Cordero J, Rodríguez S, 2002, Simulación del tráfico de autos y el modelado basado en agentes, *Centro de Sistemas Inteligentes del Tecnológico de Monterrey, México*.
- Hoeger H, 1997, Curso de simulación 1: Pasos en un estudio de simulación. Se encuentra en <http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/hhoeger/simulacion/PARTE3.pdf>. fecha de consulta: 04 marzo 2009.



- JASS, 2011, Journal of Artificial Societies and Social Simulation. Se encuentra en <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/JASSS.html>. Fecha de consulta: 11 enero 2010.
- Jian C, Minglu L, Linpeng H, Ren Q, Ying L, 2006, Towards building an intelligent traffic simulation platform, APWeb Workshops 2006, pp. 632-642.
- Le Page Ch, Becu N, Bommel P, Bousquet F, 2012, Participatory agent-Based simulation for renewable resource management: The role of the Cormas simulation platform to nurture a community of practice, Journal of Artificial Societies and Social Simulation 15 (1) 10.
- Lin SY, Chen DK, Chen, RS, 2003. Apply adaptive and cooperative multi-agent system to urban traffic signal control, 11. Proceedings of the 11 IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation, Rhodes, Greece
- MASON, 2012. Se encuentra en <http://cs.gmu.edu/~eclab/projects/mason>. Fecha de consulta: 15 enero 2010.
- NetLogo, 2009. Se encuentra en <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>. Fecha de consulta: 07 marzo 2010.
- Paruchuri P, Reddy A, Karlapalem K, 2002, Multi agent simulation of unorganized traffic, Proceedings of the First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, ACM, New York, USA, pp. 176-183.
- Paczuski M, Nagel K, 1995, Self-organized criticality and 1/F noise in traffic, U.S. Department of Transportation: Federal Highway Administration, Report Number: BNL-62385.
- SWARM, 2012. Se encuentra en [http://www.swarm.org/index.php/Main\\_Page](http://www.swarm.org/index.php/Main_Page). Fecha de consulta: 16 marzo 2010.
- Terán O y Ablan M, 2011, Modelado y simulación de situaciones sociales complejas en Latinoamérica: Contribuyendo al cuidado del Bien Público (capítulo de libro en Rodríguez L., 2011, La emergencia de los enfoques de la Perozo N, Aguilar J, Terán O, Molina H, 2012, A verification method for MASOES, aceptado en IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics.
- REPAST, 2012. Se encuentra en <http://repast.sourceforge.net>. Fecha de consulta: 13 abril 2010.
- Rodríguez R, 2002, Modelación de flujo de tránsito de autos utilizando autómatas celulares. Departamento de Aplicación de Microcomputadoras, Instituto de Ciencias, Universidad de Puebla, Septiembre 2002.
- SDML, 2012. Se encuentra en <http://cfpm.org/sdml>. Fecha de consulta: 14 abril 2010.
- SIMSOCIA, 2011, Sociedad Iberoamericana de Simulación Social, disponible en <http://cesimo.ing.ula.ve/simsocia> complejidad en América Latina: Desafíos, contribuciones y compromisos para abordar los problemas complejos del siglo XXI, Tomo I. Comunidad de Pensamiento Complejo), Buenos Aires, Argentina.
- Vogel A, Nagel K, 2005, Multi-agent based simulation of individual traffic in Berlin, Proceedings of the International Conference on Computers in Urban Planning and Urban Management (CUMPUM 05), London, England
- Zhang F, Li J, Zhao Q, 2005, Single-lane traffic simulation with multi-Agent system, Proceedings of Intelligent Transportation Systems, 2005, Vienna, Austria, pp. 56-60.

**Recibido:** 06 de diciembre de 2010

**Revisado:** 26 de julio de 2011

