

# Plataforma de simulación y visualización para el apoyo al análisis y toma de decisiones en proyectos de movilidad urbana

## Simulation and Visualization Platform for Supporting the Analysis and Decision-making in Urban Mobility Projects

Recibido 31 de marzo de 2009, modificado 17 de junio de 2009, aprobado 18 de junio de 2009.

### William Romero

Estudiante de Maestría en Ingeniería de Sistemas y Computación, Grupo IMAGINE (I2D en Computación Visual), Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

wil-rome@uniandes.edu.co ✉

### José Tiberio Hernández

Ph.D. Profesor asociado. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación, Grupo IMAGINE (I2D en Computación Visual). Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

jhernand@uniandes.edu.co ✉

### Juan Camilo Ibarra

M.Sc. Estudiante de Doctorado en Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación, Grupo IMAGINE (I2D en Computación Visual). Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

ju-ibarr@uniandes.edu.co ✉

### Sergio Ordóñez

M.Sc. Profesor instructor. Departamento de Ingeniería de Sistemas y Computación, Grupo IMAGINE (I2D en Computación Visual). Universidad de los Andes. Bogotá D.C., Colombia.

se-ordo@uniandes.edu.co ✉

#### PALABRAS CLAVES

Métodos de simulación, sistemas de apoyo a la decisión.

#### KEY WORDS

Decision support systems, simulation methods.

#### RESUMEN

Este artículo presenta los resultados parciales de la implementación de una plataforma de simulación y visualización para apoyar procesos de análisis y toma de decisiones en proyectos de movilidad urbana. La posibilidad de representar anomalías en la infraestructura vial y en el comportamiento de los diferentes actores, permite su potencial aplicación en escenarios de las ciudades latinoamericanas. Los resultados se presentan en los siguientes temas: modelo de simulación y visualización, aplicaciones de simulación y visualización.

#### ABSTRACT

This article presents the partial results obtained in the implementation of a simulation and visualization platform, to support the analysis and decision making processes in urban mobility projects. The possibility to represent pathologies in road infrastructure and the actors behaviour, allows the potential application in scenarios of Latin-American cities. These results are briefed in the following topics: simulation and visualization model, simulation and visualization applications.

## INTRODUCCIÓN

Las intervenciones físicas y funcionales que se realizan a escala urbana requieren un análisis desde diferentes perspectivas como movilidad, seguridad, calidad del aire, entre otras. Además de la normatividad establecida, es importante considerar problemas asociados al impacto de las intervenciones en el entorno y a la integración con los sistemas urbanos existentes. Las tecnologías de información ofrecen métodos y herramientas para formulación, construcción y simulación de modelos que, con base en la representación de alternativas tanto de infraestructura (referenciada geográficamente) como funcional (reglas de operación) y de comportamiento de los actores (vehículos, peatones, etc.), apoyan este análisis.

Este artículo tiene como objetivo presentar una plataforma de simulación para el apoyo de los procesos de análisis y toma de decisiones en movilidad urbana. Esta propuesta se caracteriza por la capacidad de representación del estado de la infraestructura vial (defectos, deterioros, etc.) y el comportamiento propio de los diferentes actores (vehículos privados, vehículos de servicio público, peatones, etc.). En las siguientes secciones se describe el contexto y el trabajo relacionado, así como los modelos y las aplicaciones de simulación y visualización implementadas. Finalmente, se exponen algunos resultados preliminares y los lineamientos del trabajo futuro.

## CONTEXTO Y ANTECEDENTES

Un ejemplo actual es el caso de la Terminal Satélite Norte de la ciudad de Bogotá (Colombia), que tiene destinado un predio de 40.000 metros cuadrados sobre el costado oriental de la Autopista Norte, a la altura de la Calle 193 [1, 2]. Para el proceso de diseño de dicho equipamiento urbano, se debe realizar un análisis que permita proyectar su funcionamiento e impacto; es decir, las nuevas demandas en el sector

generadas a partir de este equipamiento, los conflictos sobre sistemas circundantes, entre otros. Este proceso se realiza acorde a lo establecido por la Unidad de Planeamiento Zonal<sup>1</sup> (UPZ) correspondiente. Más allá de la normatividad establecida por la UPZ para el diseño de la terminal como elemento significativo en el sistema de movilidad, es importante tener en cuenta el acceso a partir del sistema masivo de transporte adoptado por la ciudad (Transmilenio [3]), vehículos de transporte privado y el acceso peatonal. Los diferentes accesos deben integrarse de manera funcional y sin aislar el equipamiento de la ciudad en crecimiento, integrándose de manera que favorezca el flujo de la salida por el norte de la ciudad.

En este tipo de análisis, es importante ubicar a los participantes (arquitectos, ingenieros, políticos, etc.) en el contexto de realización del proyecto y así apoyar la toma de decisiones con base en escenarios plausibles. Para este fin, existen herramientas computacionales que permiten realizar observaciones sobre el escenario de acción de la intervención y recrear la dinámica del mismo. Por ejemplo, las aplicaciones para el análisis del tráfico y transporte como VISSIM [4] y SimTraffic [5], ofrecen herramientas para la visualización de mapas con información 3D georeferenciada y la simulación del comportamiento de vehículos y peatones.

En 1999 el proyecto *Smartest* [6], desarrollado por la Unión Europea, realizó una revisión comparativa de herramientas de modelado y simulación en diferentes niveles de aplicación en el área de tráfico y transporte: planeación, evaluación de infraestructura y planes de contingencia de problemas en el tráfico, emisiones nocivas, etc. A partir de este resultado, se desarrolló una propuesta con 2 elementos diferenciadores: un modelo en el cual se considere el estado de la infraestructura vial y el comportamiento realista de los diferentes actores del sistema.

---

1 Artículo 290 del Decreto 619 de 2000.

En general, las aplicaciones de simulación y, en particular, las aplicaciones comerciales se desarrollan bajo ciertos supuestos del contexto como: normatividad de tránsito, conducta ideal de los vehículos, estado óptimo de la infraestructura vial, entre otros. Por ejemplo, en el modelo presentado en [7], se definen 6 patrones de estados posibles para los vehículos que inciden en la aceleración en un instante de tiempo determinado. Esta caracterización se realizó con el propósito de reflejar los componentes físicos y humanos que manifiesta un conductor en el tráfico vehicular. Cuando se utilizan este tipo de herramientas para modelar un escenario en el contexto de una ciudad como Bogotá, que se caracteriza por el no cumplimiento de los supuestos descritos, los resultados no son conformes a la realidad del escenario. En este caso, es necesario realizar ajustes a la herramienta para adaptarlas a las necesidades propias del contexto de análisis, lo que representa un costo adicional por la adaptación de una solución desarrollada para un contexto ajeno.

Con esta situación como referencia, se diseñó e implementó un prototipo de aplicación, en el cual los analistas y expertos en movilidad pueden incluir aspectos y características propias de las problemáticas de una ciudad como Bogotá. Esta propuesta permite representar escenarios realistas que contienen anomalías de la infraestructura vial (huecos, carriles irregulares, etc.) y de comportamiento (vehículos que no cumplen la normatividad de tránsito y peatones que no son consientes de las recomendaciones de seguridad), con el fin de mejorar el material de entrada en los procesos de toma de decisión.

A continuación se presenta el modelo propuesto y la implementación de las aplicaciones de simulación y visualización.

## MODELO

El espacio de la zona de interés se modela con base en la intersección vial como unidad estructural y funcional básica de análisis. En una intersección, en cada

instante de tiempo, los móviles (vehículos y peatones) definen su posición y velocidad en los diferentes tipos de espacios, teniendo en cuenta su entorno y su comportamiento individual. Las intersecciones se pueden conectar entre sí gracias a zonas compartidas, en las que se da el flujo de móviles entre ellas. A partir de este concepto, es factible construir modelos que pueden crecer manteniendo una complejidad computacional acotada por la intersección más compleja. En esta sección, se describen brevemente los modelos utilizados para la implementación de la plataforma.

## MODELO DE SIMULACIÓN

El modelo representa un sistema dinámico discreto (Tabla 1), similar a los modelos basados en autómatas celulares (TCA) presentados en [8]. Los modelos TCA tienen por objetivo reproducir comportamientos macroscópicos basados en interacciones microscópicas. La representación del espacio y la evolución del sistema se realizan a partir de unidades discretas. El espacio se representa a través de una malla de celdas regulares  $\mathcal{L}$  de dimensión  $d$ ; a partir de esta malla, una intersección se define como un conjunto de celdas que conforman su geometría (Figura 1). Una celda tiene un conjunto de atributos (estructurales y funcionales) como: posición, tipo (espacio peatonal, espacio vehicular, etc.), direcciones esperadas (sentidos que diferentes tipos de móviles deberían moverse) y estado (óptimo, hueco, deterioro).

La unión de los diferentes subconjuntos de móviles (vehículos de transporte público, vehículos de transporte privado, peatones, etc.) conforman la población  $M$  del sistema. Un móvil, se caracteriza por un conjunto de *atributos* (aspectos estructurales) y *creencias* (aspectos funcionales “individuales”) que definen su comportamiento en el sistema. Por ejemplo, un móvil de clase bus de servicio público puede definirse con los atributos estáticos: dimensiones (tamaño del bus), estado mecánico y tipo de combustible; y atributos dinámicos: posición y velocidad. Como *creencias* se pueden definir “prioridad  $p$  de recoger pasajeros”

Definición	Descripción
$\mathcal{L}^d$	Malla de celdas rectangulares de dimensión $d \times Z^+$
$c_i$	$i$ -ésima celda de la malla
$\mathcal{A}_{c_i}$	Conjunto de atributos para la celda $i$ .
$I_n = \{c \in \mathcal{L}^d : r(c)\}$	Una Intersección $n$ es el conjunto de celdas que cumplen con una regla de asociación $r$ .
$S_{ij} = \{c \in I_n : c \in I_{n+j}\}$	Zona compartida entre la intersección $I_n$ y $I_{n+j}$ .
$M$	Conjunto de móviles
$\mathcal{A}_m$	Conjunto de atributos de un móvil.
$B_m$	Conjunto de creencias de un móvil.
$t \rightarrow t+1$	La evolución del sistema se realiza en unidades discretas de tiempo.
$\Sigma_{I_n}^t$	Estado en $t$ de $I_n$ .
$\Gamma_m^t$	Estado en $t$ de un móvil.
$\sigma_n : \Sigma_{I_n}^t \rightarrow \Sigma_{I_n}^{t+1}$	Función de transición de la $n$ -ésima intersección.
$\gamma_m : \Gamma_m^t \rightarrow \Gamma_m^{t+1}$	Función de transición del un móvil.

Tabla 1. Principales conceptos que definen el modelo.

y “respeto  $r$  a la normatividad”. Esto determina la probabilidad de sobrepasar los límites de velocidad, cambiar abruptamente de carril, entre otros. Estas definiciones permiten, por una parte, definir los perfiles de la población del sistema y, por otra, reflejar los comportamientos característicos de cada tipo de móvil en las funciones de transición.

Una etapa importante para la utilización real de esta plataforma de simulación es la de ajuste del modelo, la cual consiste en la caracterización del escenario y la población. Es decir, definir el estado de la infraestructura vial con base en atributos estructurales, especificar los perfiles de los móviles (taxis, buses, peatones, etc.) y sus creencias particulares, como también precisar los patrones de comportamiento en las funciones de transición.

**ESTRUCTURA Y MODELO DE VISUALIZACIÓN**

El modelo se basa en el Sistema de Visualización de Grafos Anatómicos y Temáticos - SVGAT [9], en la cual se define una estructura de datos con la capacidad de mostrar información de diferente naturaleza, a diferente escala, en un mismo ambiente visual basado en una jerarquía de componentes. La naturaleza

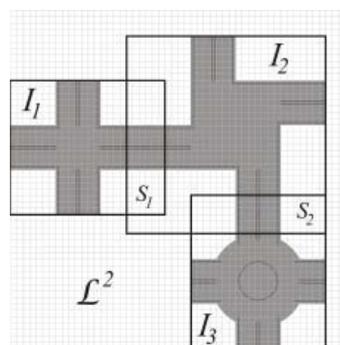


Figura 1. Representación espacial del modelo de simulación.

se refiere al tipo de información a mostrar y la escala se refiere a la granularidad de dicha información. La utilización de una estructura jerárquica permite la capacidad de observar una misma información en diferente nivel de detalle; la representación de aspectos de cada uno de los niveles componentes del modelo permite interactuar desde puntos de vista diferentes (ejemplo: movilidad, seguridad, calidad del aire) con el mismo modelo.

La Figura 2 ilustra la construcción del escenario de visualización de una zona de la ciudad de Bogotá (a). Para ello, se definen los ejes principales viales que

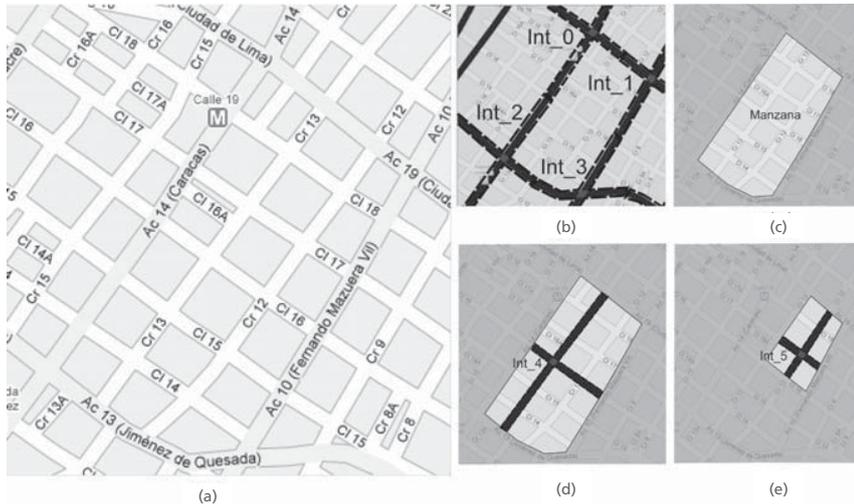


Figura 2. Construcción de un escenario de interés.

contienen las intersecciones de mayor jerarquía (b), los cuales dividen la ciudad en zonas llamadas manzanas (c). Este proceso es iterativo hasta que se alcance el nivel de detalle mínimo deseado (d) (e). La relación existente entre estos componentes (intersecciones, cruces, tramos, manzanas) define la jerarquía que administra el sistema SVGAT.

**APLICACIONES**

La plataforma se compone por 2 aplicaciones: la aplicación de simulación que permite definir el escenario en términos de las anomalías de infraestructura vial, vehículos y peatones; y la aplicación de visualización que presenta el escenario 3D según los resultados de la simulación. Las aplicaciones implementan los modelos expuestos en la sección anterior.

**APLICACIÓN DE SIMULACIÓN**

Esta aplicación (Figura 3) facilita la especificación del escenario y los atributos para cada celda que compone el espacio. Las celdas se pueden configurar de acuerdo a los atributos: espacio vial, espacio peatonal, zona verde, edificación. La población se define en términos de “familias” de vehículos y peatones; para cada uno de estos subgrupos, basados en representación de *creencias*, se definieron cuatro algoritmos de

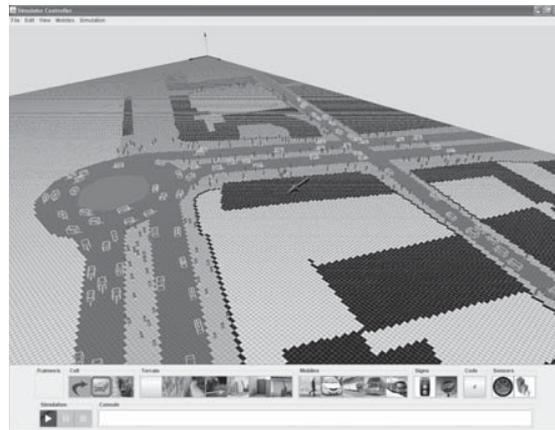


Figura 3. Aplicación de simulación.

comportamiento: básico, formal, informal y agresivo. Una característica interesante de la plataforma es la posibilidad de definir “sensores” sobre la operación del modelo. Ejemplos de éstos son: sensor de velocidad individual sobre los vehículos, de promedios de ocupación y de velocidad por zonas. De esta manera, se facilita la construcción de estadísticas adecuadas al análisis de cada escenario [10].

**APLICACIÓN DE VISUALIZACIÓN**

Es una implementación del modelo SVGAT especializada en la visualización de escenarios de movilidad

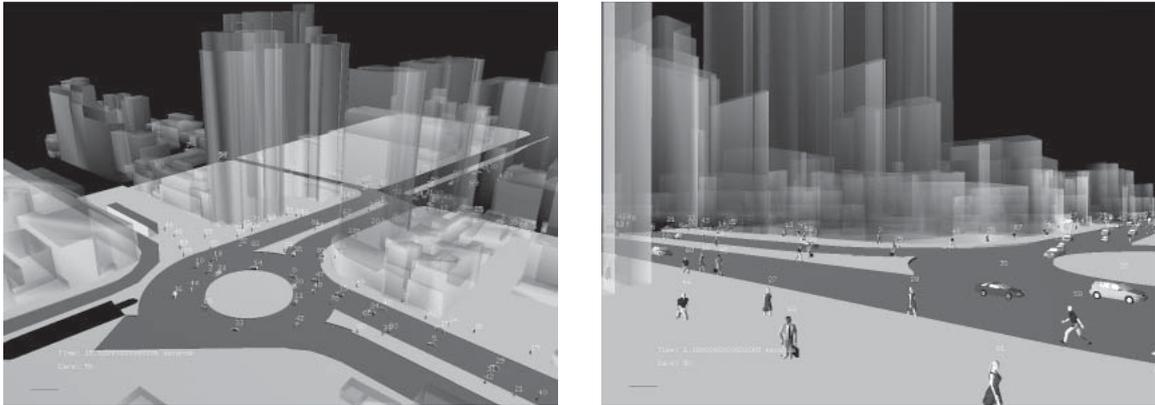


Figura 4. Visualización 3D: calle 19 con carrera 3, Bogotá.

[11]. La herramienta genera un punto de vista centrado en las vías y presentan las construcciones como complemento (Figura 4). La aplicación permite una visualización interactiva e inmersiva del proceso simulado, para recrear las dinámicas de interés.

El funcionamiento de la plataforma descrita se probó montando una intersección (Figura 4) con representación de anomalías de infraestructura (huecos en el pavimento) y de comportamiento tanto en vehículos (“de afán, no-respetuoso”, “de afán, respetuoso”, “muy prudente”), como en peatones (“no es necesario cruzar por la cebra”, “sólo por la cebra”). Si bien no se realizó una “calibración” con datos reales, el escenario simulado fue considerado “creíble” por parte de especialistas en esta primera aproximación.

#### CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se ha presentado una plataforma de representación y simulación microscópica de movilidad multimodal en espacios urbanos. Con esta plataforma, es posible representar anomalías de la infraestructura y del comportamiento de los diferentes actores (vehículos privados, vehículos de servicio público, peatones, etc.).

Debido a que la emisión de contaminantes atmosféricos en los espacios urbanos tiene una relación directa con el tráfico vehicular, se está formulando un modelo para la visualización de la relación de peso por unidad de volumen del monóxido de carbono (CO) y material particulado (PM10) a partir de la aplicación de simulación de tráfico presentada.

Actualmente, existe un trabajo conjunto con el grupo de estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional – SUR de la Universidad de los Andes, en la caracterización de los comportamientos propios del parque vehicular en la ciudad de Bogotá y un protocolo de calibración del modelo para escenarios reales de utilización.

#### AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha contado con la cofinanciación del Centro de Investigación de la Facultad de Ingeniería – CIFI de la Universidad de los Andes. Los autores agradecen los valiosos aportes de los ingenieros Álvaro Rodríguez y Juan Pablo Bocarejo (Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental) y de la arquitecta Mónica Hernández.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “El próximo año se iniciarán las obras del Terminal Satélite del Norte”. Portal de la Ciudad de Bogotá. Alcaldía Mayor de Bogotá. Fecha de consulta: Marzo 30 de 2009. Disponible: [http://www.bogota.gov.co/portel/libreria/php/frame\\_detalle.php?h\\_id=21848](http://www.bogota.gov.co/portel/libreria/php/frame_detalle.php?h_id=21848)
- [2] “Adjudicado contrato para el diseño de la Terminal del Norte”. Portal de la Ciudad de Bogotá. Alcaldía Mayor de Bogotá. Fecha de consulta: Marzo 30 de 2009. Disponible: [http://www.bogota.gov.co/portel/libreria/php/frame\\_detalle.php?h\\_id=29359](http://www.bogota.gov.co/portel/libreria/php/frame_detalle.php?h_id=29359)
- [3] “Transmilenio”. Fecha de consulta: Marzo 30 de 2009. Disponible: <http://www.transmilenio.gov.co>
- [4] “VISSIM, Micro-Simulation Software”. PT AG. Fecha de consulta: Marzo 30 de 2009. Disponible: <http://www.ptvag.com/traffic/software-system-solutions/vissim/>
- [5] “SimTraffic 7”. Trafficware Ltd. Fecha de consulta: Marzo 30 de 2009. Disponible: <http://www.trafficware.com/simtraffic7.html>
- [6] “The SMARTEST Project”. Fecha de consulta: Marzo 30 de 2009. Disponible: <http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/index.html>
- [7] **T. Schulze and T. Fliess.**  
“Urban Traffic Simulation with Psycho-physical Vehicle-following Models”. *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*. 7-10 December 1997, pp.1222-1229.
- [8] **S. Maerivoet and B. de Moor.**  
“Cellular automata models of road traffic”. *Physics Reports*. Vol. 419, No. 1, November 2005, pp.1-64.
- [9] **J.C. Ibarra, O. Chavarro, D. Castro y J.T. Hernández.**  
“Esquema de Representación Espacial Multinivel para el Modelamiento Geométrico de Sistemas Complejos”. *Avances en Sistemas e Informática*. Vol. 5, No. 1, Mayo de 2008, pp. 103-110.
- [10] **S. Ordóñez.**  
“Plataforma de micro-simulación escalable y multimodal para evaluar movilidad urbana en escenarios no convencionales”. Tesis Magíster en Ingeniería de Sistemas y Computación. Bogotá: Universidad de los Andes, 2009.
- [11] **J.C. Ibarra.**  
“Esquema de representación para sistemas complejos con múltiples puntos de vista: una aplicación a movilidad en sistemas urbanos”. Tesis Magíster en Ingeniería de Sistemas y Computación. Bogotá: Uniandes, 2009.