



La geosimulación, una herramienta para la prevención de los accidentes de tránsito

The geosimulation, a tool for the prevention of traffic accidents

Castro-Hernández Felipe de Jesús

Universidad Tecnológica de México, UNITEC México

Correo: felipe_castro@my.unitec.edu.mx

Resumen

En México los accidentes de tránsito constituyen un problema de salud pública y son la segunda causa de muerte en personas entre 5 y 29 años. Dentro de las metodologías que se utilizan para su entendimiento y prevención se encuentra el uso de los modelos cuantitativos, pero los más utilizados son los de tipo estático, con la característica principal de que no consideran la interacción dinámica de sus variables a través del tiempo, como los basados en los sistemas de información geográfica y en las redes neuronales¹. En este trabajo se abordó el problema a través del uso de un modelo de tipo dinámico, basado en la técnica llamada geosimulación, donde todos los elementos que intervienen se interrelacionan de manera activa. Para conocer las ventajas de estos respecto a los estáticos, se realizó una representación de la avenida Insurgentes Norte. Con el modelo dinámico se logró una aproximación de manera directa en relación con el número de accidentes reales, estimación que ningún método estático proporcionó. Se analizaron diferentes escenarios modificando las variables que intervienen y se observaron comportamientos emergentes no previstos; por lo que se puede decir que es el modelo más adecuado para su entendimiento y prevención. La aportación técnica que se realizó fue la adaptación de la plataforma basada en agentes para la representación de los accidentes de tránsito.

Descriptores: Accidentes de tránsito, geosimulación, modelación basada en agentes, sistemas de información geográfica, modelos dinámicos, traffic.

Abstract

In Mexico, traffic accidents are a public health problem reaching the second leading cause of fatal injuries among people between 5 and 29 years old. One of the methodologies used to understand and prevent such problem is the use of quantitative models, being the most common the static type. Their main characteristic is that this model does not consider the dynamic interaction of its variables over time, such as those based in geographic information systems and neural networks. This paper addresses the issue and proposes a dynamic type model based on the geosimulation, in which all elements interact with each other and with the environment. To learn the advantages of dynamic models in comparison to the static ones, the author made a patterned representation of the North Insurgentes Avenue in Mexico City. The proposed dynamic model achieved the best relation to the real number of accidents, a result that no static method previously achieved. In addition, the author also analyzed different scenarios by changing the variables involved and then it was possible to observe new unforeseen behaviors. Hence, the author validates that the dynamic type model, based on geosimulation is the best model to represent and predict fatal traffic accidents. The technical contribution was the adaptation of the agent-based platform in the representation of traffic accidents.

Keywords: Traffic accidents, geosimulation, agent-based modeling, geographic information systems, dynamic models, traffic.

¹ Se revisaron 168 artículos de casos de modelación de accidentes de tránsito, de los cuales 68% hacen referencia a la utilización de los sistemas de información geográfica y redes neuronales.

INTRODUCCIÓN

Los accidentes de tráfico representan una tragedia interminable, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (2013) cada año mueren en el mundo 1.24 millones de personas. La mayoría de los esfuerzos en el modelado de fenómenos de naturaleza dinámica se ha

enfocado en trabajar con *snapshots*² estáticos que reducen la profundidad natural de la dinámica del mundo para simplificarla, abstrayendo perspectivas que son fijas o estáticas en alguna forma (Martínez y Levachkin, 2014). En el caso de los accidentes de tránsito, la ma-

² Procedimiento basado en una secuencia animada de mapas.

yoría de modelos que se utilizan son los que se basan en el principio de causa y efecto, donde la aparición de una o diversas variables dan origen al suceso, como un efecto dominó. Estos modelos se pueden agrupar en dos, los modelos secuenciales que utilizan pocas variables y los epidemiológicos que involucran un número mayor de estas, pero esencialmente caen en el mismo principio, es decir, los factores están dispuestos como un dominó de tal manera que la caída de la primera ficha resulta en la caída de la última. Estos modelos sirven para describir y entender sistemas relativamente simples en el caso de los accidentes de tránsito, debido a su complejidad, ya que es difícil poder entenderlos y proyectarlos (Qureshi, 2009).

Actualmente, las ciencias de la información geográfica se enfocan en capturar el dinamismo de entornos geográficos y a describir la semántica de sus entidades (objetos y eventos), así como las relaciones espaciales entre ellas a través del tiempo. Existe un gran número de estas que por su naturaleza no son estáticas, es decir, su comportamiento es dinámico dentro de un entorno geográfico (Langran, 1993). Si se define un accidente de tránsito como una colisión en un entorno vial, resultado de una combinación de factores relacionados con los componentes del sistema, la mejor manera para modelarlo y proyectarlo es a través de un modelo dinámico (Organización Mundial de la Salud, 2009).

En este trabajo se aborda la modelación y prevención de los accidentes de tránsito a través de la utilización de un modelo dinámico, utilizando la técnica llamada geosimulación. El objetivo fue demostrar que los modelos dinámicos proporcionan mayores beneficios en cuanto a su representación e información, la cual se genera para la toma de decisiones en su entendimiento y prevención. La metodología empleada se realizó a través de la solución de un caso de estudio y la comparación de resultados entre los diferentes tipos de los modelos utilizados.

En la siguiente sección se presenta un panorama de la situación actual de los accidentes de tránsito en México, posteriormente se mencionan los conceptos básicos sobre geosimulación y de manera más específica la modelación basada en agentes. En la tercera parte del trabajo se muestra la solución del caso de estudio, donde se representa la avenida Insurgentes Norte, la cual tiene la mayor cantidad de accidentes (Instituto de acceso a la información pública y protección de datos personales del Distrito Federal, 2005), en el tramo comprendido entre el entronque de la autopista México Pachuca y el metro Indios Verdes. Primero se utilizaron los modelos estáticos basados en los sistemas de información geográfica en redes neuronales y por último un

modelo dinámico. Al final se exponen las conclusiones junto con algunas sugerencias para futuros trabajos.

SITUACIÓN DE LOS ACCIDENTES DE TRÁNSITO EN MÉXICO

Los siguientes datos muestran un panorama de la situación de los accidentes de tránsito en México (Cenapra, 2013):

- a) Por día mueren 43.4 personas y 85.8 resultan heridos.
- b) México ocupa el séptimo lugar en número de accidentes de tránsito a nivel mundial.
- c) Las cifras oficiales, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), señalan que durante el 2013 en nuestro país, fallecieron a consecuencia de accidentes de tráfico de vehículo de motor 15,856 personas, sin embargo, de acuerdo con estudios científicos relacionados con el sub registro de información en México, se calcula que cada año fallecen más de 24,000 personas, cifra que podría casi triplicarse en la próxima década (Aguilar, 2012).

En el año 2011, el gobierno mexicano dio a conocer la Estrategia Nacional de Seguridad Vial (Cenapra, 2011). Esta tiene como objetivo la reducción de 50% de las muertes ocasionadas por los accidentes de tránsito, con esto el gobierno capitaliza su adhesión al llamado internacional del Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020 convocado por las Naciones Unidas. De acuerdo con las cifras publicadas por el INEGI (2015) el número de accidentes se ha reducido de 0.70% durante el periodo de 2011 a 2013, considerando que en 10 años la disminución debe ser de 50%, es decir, lo que se ha logrado no tiene la proporción de acuerdo con el objetivo esperado.

LA GEOSIMULACIÓN Y LA SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES

“La geosimulación, es un título usado para representar un campo muy reciente de investigación en geografía, concerniente con el diseño y construcción de modelos espaciales basados en objetos de alta resolución, se utilizan para explorar ideas e hipótesis acerca de cómo los sistemas espaciales funcionan a través de la interacción de sus elementos. Asimismo desarrolla *software* de simulación y herramientas para realizar simulaciones basadas en objetos y aplicar la información que generan en la solución de problemas reales en contextos geográficos” (Benenson y Torrens, 2005).

Dentro de las técnicas específicas de geosimulación empleadas en este trabajo, se encuentra la modelación

basada en agentes, la cual se puede describir con base en las siguientes características (North y Macal, 2007):

- a) Se construyó sobre dos técnicas exitosas: la simulación discreta de eventos y la programación orientada a objetos. La simulación discreta de eventos provee un mecanismo establecido para coordinar la interacción de componentes individuales o agentes dentro de un ambiente común. La programación orientada a objetos crea un ambiente bien definido para organizar los agentes en función de sus comportamientos. Los agentes móviles producen elementos individuales que interactúan directamente con otros y algunos esperan su turno para actuar, todos dentro de un ambiente espacial.
- b) Los agentes son elementos tomadores de decisiones en sistemas complejos adaptativos. Los agentes establecen reglas o patrones de comportamientos que les permiten tomar información, procesar las entradas y efectuar cambios hacia su entorno. El procesamiento de información dentro del agente le permite incluir alguna forma de adaptación o aprendizaje. Este es uno de los dos principales recursos de los sistemas complejos adaptativos.
- c) Los agentes siguen en general tres pasos. El primero evalúa su estado actual y determina qué hacer en el momento. En el segundo, se ejecutan las acciones que ellos eligen. Tercero, evalúan los resultados de sus acciones y ajustan reglas tomando como base los resultados. Esos pasos se pueden adaptar de muchas formas, incluyendo el uso de reglas simples, reglas complejas, técnicas avanzadas, programas externos o diferentes niveles de subagentes.

METODOLOGÍA

Para mostrar las ventajas y desventajas entre los distintos modelos se realizó la representación de la avenida Insurgentes Norte, en el tramo que comprende el entronque de la autopista México Pachuca y el metro Indios Verdes.

El primer modelo empleado se basó en un sistema de información geográfica (SIG). Con la creciente disponibilidad de datos de accidentes de tránsito y la popularidad de los SIG, el análisis de los accidentes con esta herramienta permitió, a nivel macroscópico, la identificación de las zonas con alta incidencia de accidentes, la frecuencia de los sinistros relacionados con cada cruce, el análisis de la tasa de accidentes y las consultas espaciales, que permiten al usuario analizar y manipular datos de manera rápida e identificar posibles áreas y zonas problemáticas (Roche, 2010).

El análisis de los accidentes de tránsito utilizando un SIG fue el siguiente:

- a) Primeramente se eligió la ubicación geográfica de los accidentes, la cual se obtuvo del Sitio Web Laboratorio para la Ciudad (2013), donde se obtiene la información de la hora, coordenadas geográficas y el tipo de accidente. Esta información se selecciona para utilizar únicamente la del tipo que se pronosticará con los modelos en estudio, aunque esta se genera a través de llamadas al 072 es la única disponible con el nivel de agregación requerida; esta se complementó con la disponible en el documento denominado "Diagnostico Espacial de los Accidentes de Tránsito en el DF" (Chías, 2011) en el que se especifica de manera exacta el lugar en donde sucedieron los accidentes, el tipo y su gravedad.
- b) El primer análisis con el SIG fue la elaboración de mapas temáticos, que muestran, con base en el tamaño de los puntos, los lugares donde se presenta la mayor cantidad de accidentes.
- c) Al número de accidentes geocodificados se les aplicó una función geo estadística, con la cual se realizó la proyección de estos en el tiempo, se utilizó la técnica denominada Kriging³, que calcula un estimador lineal insesgado de una característica estudiada (Schabenberger y Gotway, 2005), este proyecta el número de accidentes en la misma unidad de tiempo que los datos de entrada.
- d) Otra de las funciones que se utilizó fue la elaboración de un mapa de calor, en donde se enfatizan con color rojo las zonas en donde se concentra la mayor cantidad de accidentes.

Es de suma importancia recalcar que, con el uso de un SIG, se puede realizar un análisis de tipo espacial más a detalle, si consideramos adicionalmente la ubicación de otros elementos que intervienen o tienen relación con la generación del fenómeno, como zonas de bares, aforo vehicular, condiciones ambientales, etcétera, deduciendo de manera indirecta el comportamiento de los accidentes de tránsito.

El segundo tipo de modelo se basó en redes neuronales, que son la herramienta preferida para muchas aplicaciones de minería de datos, es predictiva por su potencia, flexibilidad y facilidad de uso. Una de las definiciones más certeras es que las redes neuronales "son conjuntos de elementos de cálculos simples, usualmente adaptativos, interconectados masivamente en paralelo y con una organización jerárquica que les permite

³ Los valores se obtuvieron utilizando el programa de geo estadística Stanford Geostatistical Modeling Software.

interactuar con algún sistema, del mismo modo que lo hace el sistema nervioso biológico» (Anderson, 2007). El uso de redes neuronales nos permitió proyectar a futuro los accidentes de tránsito y el lugar donde sucedieron, ello a través de una ecuación donde la ventaja es que imita el patrón de comportamiento de las variables independientes o predictoras, que en este caso, fueron el número de accidentes históricos y el flujo vehicular que se presentaron en los cruces de la avenida en estudio. Se obtuvo utilizando el *software* SPSS (2007), asimismo, el tipo de red neuronal que se utilizó fue de tipo perceptron multicapa, que permitió simular comportamientos que no son lineales, es decir, permite reproducir patrones definidos que muestran los datos (Mejía, 2004), este generó un modelo predictivo para una variable dependiente para los accidentes de tránsito.

El tercer modelo fue de tipo dinámico, un modelo basado en agentes. Las etapas que se siguieron para su desarrollo fueron las siguientes:

- a) Virtualización de la situación real, donde se definieron los elementos a incluir en el modelo, sus características y comportamientos. Para poder lograr esto, se hizo una revisión del estado del arte de los accidentes de tránsito y de las teorías sobre cómo se generan, principalmente las publicadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) en su informe mundial sobre prevención de los traumatismos causados por el tránsito (2004), se revisaron las diferentes perspectivas de estudio y se adaptó la que se presentó por la OMS, que coincide con la Matriz de Haddon (1980), en ella los accidentes se describen como procesos complejos y dinámicos, ambos coinciden en que los elementos y sus características deben incluirse en un modelo vial como: los vehículos, los semáforos (elementos fijos en el sistema vial), los conductores y las vías. Los vehículos dentro del modelo son aquellos elementos que adoptan características propias de los automóviles como: velocidad, distancia al siguiente vehículo, aceleración y desaceleración, asimismo cómo los conductores tienen comportamientos similares a los de los peatones, como propensión a pasarse un semáforo, a rebasar al siguiente carril, distracción (Bálint, 2007), estas conductas se definieron con base en un porcentaje a que puedan suceder, en este momento este valor no tiene un soporte para establecerse con base a investigaciones sobre las conductas humanas; en este trabajo no se incluye este punto.
- b) La segunda etapa fue la implementación del modelo en una plataforma de cómputo. Para la selección de la herramienta se hizo una revisión de varios traba-

jos en torno a la comparación de varios ambientes de modelación basados en agentes, algunos de ellos fueron: *comparison of agent-based modeling software y tools of the trade: a survey of various agent based modeling platforms* (Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 2009), entre otros. Como resultado de este análisis se llegó a la conclusión de que la mejor herramienta para el desarrollo era la plataforma Repast. Una vez que se determinó la plataforma a utilizar a través del sistema de consulta de usuarios se encontró una plataforma de cómputo llamada Traffix, que se utilizó para modelar sistemas viales. Esta es una plataforma general, flexible y altamente configurable (Bálint y Gulyás, 2008).

La plataforma Traffix fue la adecuada para el desarrollo del modelo, ya que cumple con las siguientes características:

- 1) Se basa en Repast y trabaja sobre el ambiente de desarrollo Eclipse, está escrito en lenguaje Java, lo que hace factible poder añadirle nuevos elementos y comportamientos al modelo. Está formado por ocho paquetes, cada uno de estos tiene una función específica en la creación de elementos en el ambiente vial.
- 2) Los modelos viales, cumplen con la teoría clásica de las medidas básicas del flujo vehicular y su relación entre estas, lo que hace que la plataforma pueda simular ambientes reales, las variables principales son: velocidad (V), que es la velocidad promedio de los vehículos, la densidad (K), que es la cantidad de vehículos que se encuentran en un carril a la velocidad V en una unidad de distancia lineal, y el flujo (Q), que es el número de vehículos que pasan en un carril en una unidad de tiempo (Cal y Mayor y Cárdenas, 2007), asimismo cumplen con las siguientes ecuaciones (Bálint y Gulyás, 2008):

$$V = V_{max} \left(1 - \frac{K}{K_d}\right) \text{ y } Q = V_{max} \left(K - \frac{K^2}{K_d}\right)$$

donde

V_{max}	= Velocidad máxima
V	= Velocidad promedio
K	= Densidad promedio
Q	= Flujo promedio
K_d	= Densidad de congestión o densidad máxima alcanzada

En cualquier análisis de un flujo vehicular, sus principales variables deben relacionarse de acuerdo con las ecuaciones antes mencionadas. Para poder representar cualquier entorno, estas deben determinarse de acuerdo con sus condiciones específicas, por lo que al cumplir la plataforma Traffix con estas relaciones es factible simular el caso de estudio (Cal y Mayor y Cárdenas, 2007).

c) La descripción del funcionamiento de cada uno de los elementos que forman parte del modelo, así como la interacción entre estos, se realiza empleando la metodología denominada Proceso Unificado de Desarrollo de Software (Jacobson *et al.*, 2000). Los diagramas que se utilizaron para la descripción fueron: diagramas de casos de uso, diagramas de clases, diagrama de secuencias y diagrama de actividades, este último se muestra en la Figura 1 y se utilizó para describir el funcionamiento del modelo.

El algoritmo del modelo se explica a través de la descripción de sus principales clases:

1) Clase insertNewStatCar: Crea y permite que un vehículo ingrese a la red vial, la cual se creó previamente de acuerdo con un número de carriles y sus medidas, en proporción a las reales; cuando el vehículo se incorpora a la red se

le asigna un color y un tipo de vehículo de acuerdo con una función de números aleatorios llamada `Random.uniform.nextIntFromTo` (0, 4) y con base en el número que se generó se incorporan cuatro tipos de vehículos: 0-Jeep, 1-PickUp, 2-Truck, 3-SlowTruck y 4-StandarCar.

2) Clase assignDriver: Asigna un conductor a cada vehículo, este contará con un porcentaje a pasarse un alto, rebasar un vehículo cuando tiene otro enfrente, tomar su distancia al siguiente vehículo y a detenerse en un cruce; estos valores se asignaron de manera aleatoria, la correcta asignación de valores queda fuera del alcance de este trabajo.

3) Clase getContainerConfigs: Cuando el vehículo entra al sistema determina su posición y sus velocidades, las cuales se configuran y se obtienen a través de un estudio de aforos vehiculares de manera presencial y a las formulas de la determinación de la velocidad de servicio del Manual de Capacidad Vial (Torres y Pérez, 2002), el número de observaciones se determinaron de acuerdo con una primera muestra y considerando una distribución normal⁴.

4) Clase desiredMove: Cuando el vehículo avanza a la siguiente posición debe tomar la decisión de si se pasa un semáforo, si tiene que

4 El porcentaje de confiabilidad de la muestra fue de 95%.

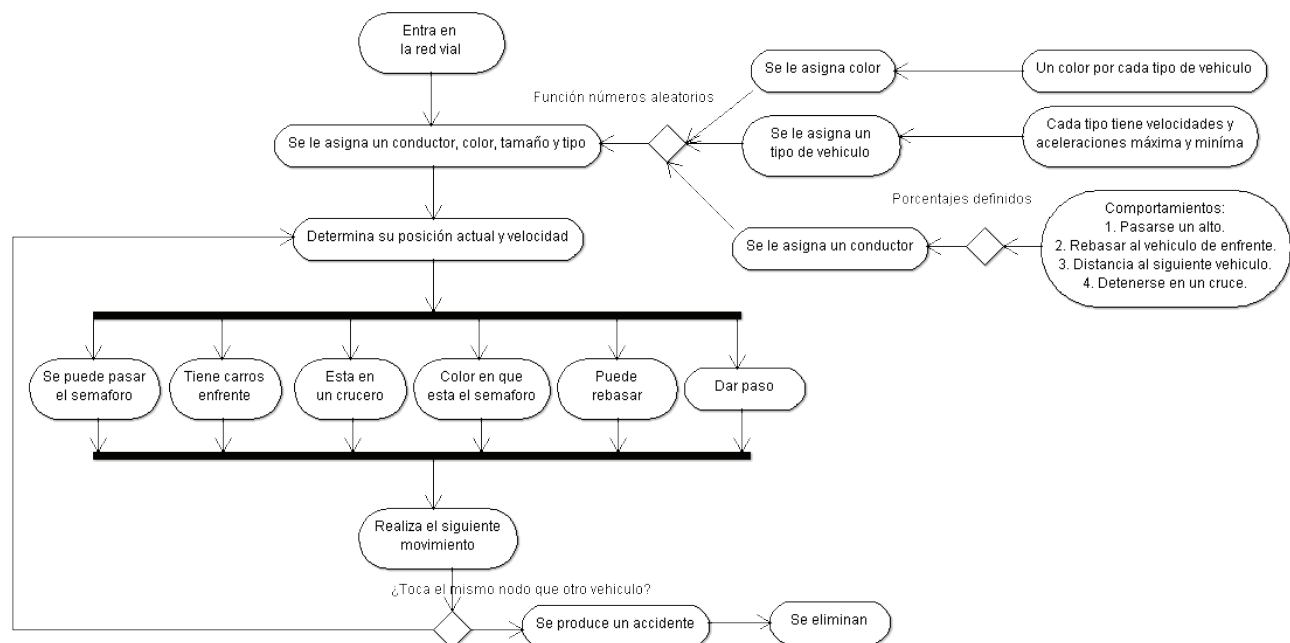


Figura 1. Diagrama de actividades del modelo de accidentes de tránsito, utilizado para entender y predecir (creación propia)

rebasar por tener carros enfrente, si se pasa el crucero, si observa el color del semáforo, si decide rebasar o cede el paso a otro vehículo.

- 5) Clase moveCar: Con base en la decisión anterior, se hace el movimiento del vehículo.
- 6) Clase setCrashed: Cuando dos vehículos tocan el mismo punto se considera como un accidente y se contabiliza, esta es parte de la aportación en programación y en las funcionalidades de la plataforma. Así también es una ventana que nos muestra el número de accidentes que se van registrando.
- 7) Comportamientos específicos como bloqueo de avenidas o transportes públicos que se detienen en terceras filas se colocan en el modelo de manera directa a través de la modificación de los archivos de configuración.
- 8) Otra de las aportaciones realizadas en funcionalidades a través de la programación, fue la creación de una ventana de estadísticas, en la cual vemos de manera gráfica el número de vehículos que existen en el sistema, así como el tiempo promedio de permanencia.

d) Prueba del modelo con datos reales, el modelo se alimentó con la información siguiente, la cual se tomó en campo:

- 1) Se tomaron las condiciones de circulación en el rango de horarios de las 6:00 am a las 8:30 am (horas pico).
- 2) Tipos de vehículos: 4 y sus velocidades máximas fueron de: 45, 35, 50 y 25 kilómetros por hora, respectivamente; sus desaceleraciones: 3, 2, 2 y 2 kilómetros por hora, respectivamente.
- 3) Características de los conductores: rebasar cuando se tenga oportunidad 5%, tomar la ruta más corta, probabilidad de pasarse un semáforo 5%, distancia de proximidad con el vehículo de enfrente 0.5 metros y factor de distracción 5%.
- 4) Tiempo de corrida 50,000 ticks, que es equivalente en tiempo a 34 días.
- 5) Una situación adicional que se registró en el modelo fue que en la zona del metro Indios Verdes, el transporte público bloquea tres de los cuatro carriles, situación que se logró representar modificando un archivo de texto de configuración.
- 6) Con un mapa de curvas de nivel se determinó el cambio de pendiente a lo largo de la avenida, lo cual se reflejó en el modelo como un in-

cremento o disminución de la velocidad de los vehículos en 1%, la determinación de este valor se hizo de manera aleatoria sin ningún soporte, esta fuera del alcance del proyecto.

Cabe recalcar que la aportación técnica que se elaboró en este trabajo fue la adaptación de la plataforma Traffic para poder representar los accidentes de tránsito, a través de la creación de nuevas clases descritas previamente.

DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con la utilización de los sistemas de información geográfica, se determinaron las zonas en donde se presentan con más frecuencia los accidentes, así mismo, hace una proyección en el tiempo. Esta herramienta considera el comportamiento actual de los accidentes, es decir, donde se presentan con más frecuencia se repetirá este patrón. La Figura 2 muestra un mapa temático, el tamaño del círculo es proporcional a la cantidad de accidentes. En la Figura 3 se observa un mapa de calor, la zonas rojas marcan mayor peligrosidad. Los resultados de la proyección en el mismo periodo de tiempo se presentan



Figura 2. Mapa temático de los accidentes de tránsito (creación propia)

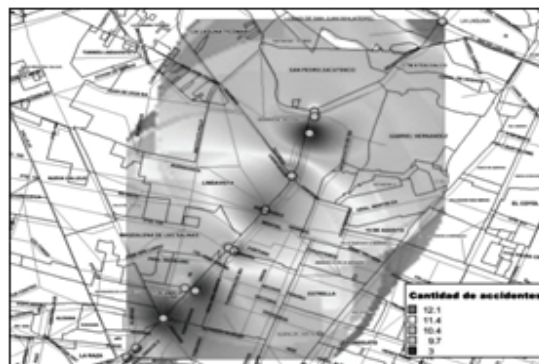


Figura 3. Mapa de calor, el color oscuro indica la mayor presencia de accidentes (creación propia)

en la Tabla 1. En términos generales los resultados son gráficos y señala las zonas de peligrosidad.

Respecto a los resultados del modelo de redes neuronales, los valores de las constantes de la ecuación se muestran en la Tabla 2 y el resultado del pronóstico en la Tabla 3. Revisando estas proyecciones podemos ver que el patrón de comportamiento es similar, es decir, donde existen actualmente la mayor cantidad de accidentes, al paso del tiempo mantendrán el mismo comportamiento y serán directamente proporcionales al flujo vehicular. Asimismo, proporciona el número de accidentes proyectados a través del tiempo a nivel de crucero, pero no permite entender el proceso, ni qué acciones se deben tomar de manera específica para su reducción.

Los resultados del modelo dinámico fueron de 19 accidentes en un lapso de 34 días (5,000 ticks⁵) comparado contra los reales que son de 17 en el año 2013, aquí se marca una diferencia de 2 más, lo que equivale a 13% adicional, cabe mencionar que este fue el único modelo que mostró un resultado de manera directa. Esta diferencia se puede atribuir a que algunos de los parámetros con que se alimentó se asignaron sin ningún soporte científico, como el porcentaje de distracción; asimismo, faltó incluir algunos factores como los desperfectos en la vía o la interferencia de los peatones.

La plataforma incluye los elementos principales de un ambiente vial, y el hecho de que no se integren factores secundarios, no invalida los resultados, ya que la plataforma Traffix es un programa con base en objetos de código libre, que permite incluir factores adicionales, además si se considera la existencia de un sub registro en el conteo de estos, el número proporcionado es mejor, además de entender el fenómeno y proporcionar información para tomar decisiones y reducirlos, esto a través del cambio de algunas variables principales como se menciona en los siguientes párrafos.

En la interface gráfica que se elaboró se puede ver el efecto del bloqueo de los tres carriles que hace el transporte público, en donde el número de vehículos (color rojo) crece de manera exponencial, así como el tiempo que se encuentran en la vía de estudio (Figura 4).

Si se desbloquean los carriles en el área mencionada previamente y se corre nuevamente el modelo, obtenemos que el número de accidentes se reducen a 12, lo que representa una disminución de 29% respecto a los registrados durante el año 2013. Con esto podemos conocer el efecto que tiene el cambio de los diferentes escenarios de acuerdo con los accidentes de tránsito. La Figura 5 muestra la interface con este efecto.

⁵ Tick es la unidad de tiempo del modelo y equivale a 10 minutos.

De igual manera, el modelo permite cambiar los diferentes valores de sus parámetros de operación y ver los efectos en la generación de accidentes, por ejemplo, si incrementamos el porcentaje de distracción desde 5% hasta 14% los accidentes se incrementan en 22, lo que equivale a un aumento de 16%. También se puede determinar que el tiempo promedio en recorrer el tramo de estudio es de 45 minutos, contra 15 minutos si no hubiera el bloqueo del transporte público, con lo que se puede determinar la cantidad de horas hombre que se pierden todos los días por este bloqueo, este modelo es un laboratorio en donde podemos analizar comportamientos y efectos no previstos cuando se diseñó.

Después de haber modelado la avenida en estudio utilizando los tres modelos, las ventajas de los modelos dinámicos las podemos resumir en los siguientes puntos:

- a) Representan fenómenos o procesos complejos.
- b) Permiten representar el comportamiento de cada uno de sus elementos a nivel micro y la suma de todos da el comportamiento general del sistema.
- c) Permiten conocer el comportamiento del proceso de manera gráfica.
- d) Todos los elementos tienen como variable principal el tiempo.
- e) Permiten conocer comportamientos que no estaban previstos.
- f) Se pueden realizar escenarios llamados “que pasaría si...” a través del cambio de sus variables principales.

La principal desventaja respecto a los estáticos, es que para poder hacer el diseño del modelo de acuerdo con nuestros requerimientos se deben utilizar programas de código abierto, sin embargo la documentación es poca y no muy clara, por ello, para poder operar este tipo de herramientas se requieren conocimientos avanzados de programación de computadoras.

Tabla 1. Proyección de accidentes de tránsito en la misma unidad de tiempo (creación propia)

Intersección	Calle 1	Calle 2	2013	2014	2020
1	Av. Insurgentes Norte	Eje 5 Norte Av. Montevideo	30	31	41
2	Av. Insurgentes Norte	Av. Acueducto de Guadalupe	28	30	38
3	Av. Insurgentes Norte	Eje 4 Norte Av. Euzkaro	31	33	43
4	Av. Insurgentes Norte	Av. Ticoman	26	28	36
5	Av. Insurgentes Norte	Av. Ferrocarril Industrial (Clave)	17	17	23
6	Av. Insurgentes Norte	Circuito Interior	18	19	25
7	Av. Insurgentes Norte	Poniente 112	18	19	25
8	Av. Insurgentes Norte	Fortuna	10	10	14
9	Av. Insurgentes Norte	Av. Cuitlahuac	7	7	9
10	Av. Insurgentes Norte	Moctezuma	5	5	7
11	Av. Insurgentes Norte	Tenochtitlan	5	5	7
12	Av. Insurgentes Norte	Excelsior	7	7	9
Total de accidentes			202	212	276

Tabla 2. Valores de las constantes de la variable predictiva a partir de los accidentes de tránsito y del aforo vehicular (creación propia)

Parameter Estimates					
Predictor		Predicted			Output Layer VAR00001
		H(1:1)	H(1:2)	H(1:3)	
Input Layer	(Bias)	.640	.372	.124	
	VAR00002	.205	-.081	-.426	
Hidden Layer 1 (Bias)					-.733
H(1:1)					-.522
H(1:2)					-1.872
H(1:3)					-.263

Tabla 3. Valores proyectados de los accidentes de tránsito utilizando redes neuronales (creación propia)

Intersección	Calle 1	Calle 2	2013	Aforo vehicular	Valores pronosticados
1	Av. Insurgentes Norte	Eje 5 Norte Av. Montevideo	30	50	42
2	Av. Insurgentes Norte	Av. Acueducto de Guadalupe	28	45	38
3	Av. Insurgentes Norte	Eje 4 Norte Av. Euzkaro	31	40	34
4	Av. Insurgentes Norte	Av. Ticoman	26	20	17
5	Av. Insurgentes Norte	Av. Ferrocarril Industrial (Clave)	17	15	13
6	Av. Insurgentes Norte	Circuito Interior	18	25	21
7	Av. Insurgentes Norte	Poniente 112	18	15	13
8	Av. Insurgentes Norte	Fortuna	10	10	8
9	Av. Insurgentes Norte	Av. Cuitlahuac	7	9	8
10	Av. Insurgentes Norte	Moctezuma	5	10	8
11	Av. Insurgentes Norte	Tenochtitlan	5	8	7
12	Av. Insurgentes Norte	Excelsior	7	7	6
Total de accidentes			202	254	215

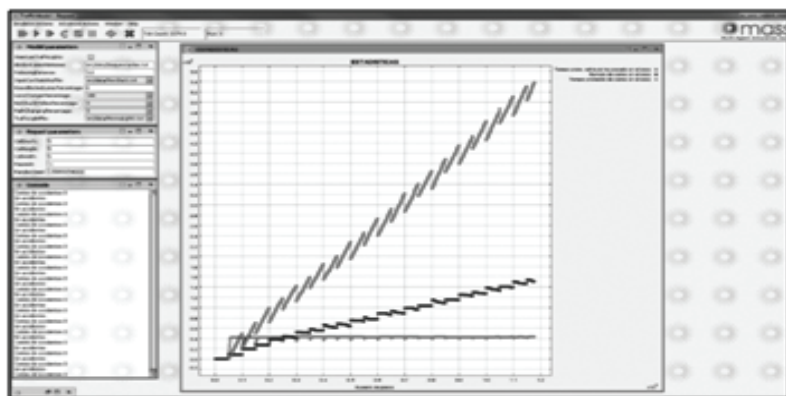


Figura 4. Interface gráfica que muestra el comportamiento de los vehículos en el área de estudio (creación propia)

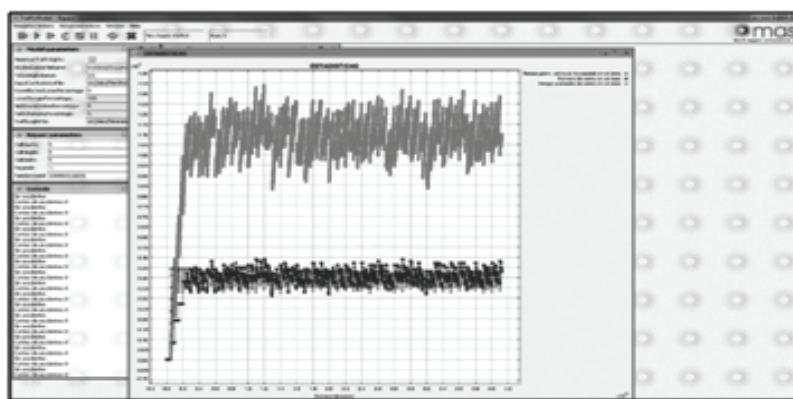


Figura 5. Interfaces gráficas del comportamiento de los vehículos con el desbloqueo de los carriles por el transporte público (creación propia)

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha explorado el uso de la geosimulación, y de manera específica, de la modelación basada en agentes para analizar y prevenir los accidentes de tránsito, utilizando como base una plataforma de simulación avanzada llamada Traffix. Esta se adaptó creando un ambiente virtual representativo de los accidentes de tránsito, donde interactúan los elementos que la forman y proporciona un resultado de comportamiento único.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se concluye que es la mejor herramienta para la proyección, entendimiento y generación de información para la toma de decisiones, asimismo, logra la reducción con las siguientes ventajas respecto a los estáticos:

- Un mayor nivel de agregación en la información generada permite entender el fenómeno de manera gráfica.
- Informa de comportamientos no previstos, ya que sus elementos tienen interacción individual.
- Contiene organismos inteligentes que exhiben un comportamiento complejo, a pesar de que inevitablemente tiene muchas debilidades.

Este enfoque es el más adecuado actualmente, disponible para el modelado de los accidentes de tránsito (modelo complejo). En este modelo solo se consideraron elementos fundamentales, sin embargo con algunas mejoras, puede ponerse a disposición de los organismos políticos encargados de desarrollar acciones concretas para reducir el número de accidentes. La principal desventaja es que la curva de aprendizaje para operar de manera eficiente este tipo de modelos es muy grande, por lo que se requiere tener conocimientos a nivel de experto en programación de computadoras.

REFERENCIAS

- Aguilar A. Los accidentes y la promesa 2089. *Periódico Excelsior* [en línea] México, 19 de agosto de 2012. [Fecha de consulta: 18 de septiembre de 2012]. Disponible en: http://www.excelsior.com.mx/index.php?m=nota&seccion=opinion&cat=11&id_notas=854248
- Anderson J.A. *Redes neuronales*, 1a ed., México, Alfa Omega Grupo Editor, S.A. de C.V., 2007, pp. 120-125. ISBN: 9789701512654.
- Bálint B. *Traffix Developer Guide*, ELTE-IKKK in association with AITIA International Zrt. Budapest, Hungría, 2007.

- Bálint B. y Gulyás L. Traffix: A framework for agent-based traffic simulations, en: Quinta Conferencia de la Asociación Europea de Simulación, septiembre, 2008, Brescia, Italia, Universidad de Brescia, Asociación Europea de Simulación, 2008, 12 p.
- Benenson I. y Torrens P.M. *Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena*, 1a ed., Inglaterra, John Wiley & Sons, LTD, 2005, 312 p. ISBN: 978-0-470-84349-9.
- Cali y Mayor R. y Cárdenas J. *Ingeniería de tránsito, fundamentos y aplicaciones*, 8a ed., México, enero de 2007, pp. 275-325. ISBN: 970-15-1238-3.
- CENAPRA. Estrategia Nacional de Seguridad Vial [en línea] México, 10 de junio de 2011 [Fecha de consulta: 12 de marzo de 2012]. Disponible en: http://www.cenapra.salud.gob.mx/interior/estrategia_nacional_de_seguridad_vial.html
- CENAPRA. Informe sobre la situación de la seguridad vial en México [en línea] México, 2013 [Fecha de consulta: 15 de marzo de 2015]. Disponible en: <http://conapra.salud.gob.mx/Interior/Documentos/Infografia2013.pdf>
- Chías L. Diagnostico espacial de los accidentes de tránsito en el DF [en línea] CENAPRA, México, 2011 [Fecha de consulta: 25 de abril de 2011]. Disponible en: http://www.cenapra.salud.gob.mx/interior/Materiales_CONAPRA/Publicaciones_Especializadas/4_Diagnstico_espacial_de_los_accidentes_de_trnsito_en_el_DF_-_PRELIMINAR.pdf
- Haddon Jr.W. *Advances in the epidemiology of injuries as a basis for public policy*, Public Health Report, Ginebra Suiza, 1980, pp. 411-421.
- Instituto de Acceso a la Información Pública y Protección de Datos Personales del Distrito Federal. Vías con mayor cantidad de accidentes [en línea] México, 29 de noviembre de 2005 [Fecha de consulta: 12 de febrero de 2012]. Disponible en: http://www.infodf.org.mx/pdfs/resoluciones/recur05/RI_0058.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 11 de mayo de 2015. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx>
- Jacobson I., Booch G., Rumbaugh J. *El proceso unificado de desarrollo de Software*, 2a ed., Madrid, Pearson Addison Wesley, Pearson Education S.A. de C.V., 2000.
- Journal of Artificial Societies and Social Simulation. Tools of the trade: A survey of various agent based modeling platforms [en línea] 31 de marzo de 2009 [Fecha de consulta: 1 de abril de 2013]. Disponible en: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/2/2.html>
- Langran G. *Time in geographical information systems*, Londres Inglaterra, Ediciones Taylor & Francis, 1993, p. 185. ISB: 0-7484-0059-1.
- Laboratorio para la Ciudad. Reporte vial [en línea] Enero 2013 [Fecha de consulta: 20 de diciembre de 2014]. Disponible en: <http://datos.labplc.mx/>
- Martínez M. y Levachkine S. Modelo conceptual de entornos geográficos dinámicos. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XV (número 2), abril-junio 2014: 163-174. ISSN 2594-0732.
- North M.J. y Macal C.M. *Managing business complexity*, New York, Oxford University Press, 303 p. ISB: ISBN-13: 978-0195172119 y ISBN-10: 0195172116
- Organización Mundial de la Salud. *Factores de riesgo de las colisiones, prevención de lesiones causadas por el tránsito*, Ginebra, Suiza, Manual de Capacitación, 2009.
- Organización Mundial de la Salud. Lesiones causadas por el tránsito [en línea] Ginebra, Suiza, marzo de 2013 [Fecha de consulta: 4 de diciembre de 2013]. Disponible en: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs358/es/>
- Qureshi Z.H. *A review of accident modelling approaches for complex socio-technical systems*, Defence and Systems Institute, University of South Australia, Mawson Lakes Campus, 2009.
- Roche J. Geographic information systems-based crash data analysis and the benefits to traffic safety [en línea] en: Transportation Scholars Conference Ames Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, 2010, pp. 110-122 [Fecha de consulta: 3 de enero 2015]. Disponible en: <http://www.intrans.iastate.edu/mtc/documents/studentPapers/2000/roche.pdf>
- Schabenberger O. y Gotway C. *Spatial methods for spatial data analysis*, 1a ed., Nueva York, Chapman & Hall/CRC, Taylor & Francis Group, 2005, 512 p. ISBN-10: 1584883227 y ISBN-13: 978-1584883227
- SSPSS Company. Manual de consulta del software SSPS versión 16.0, 2007 [en línea] Marzo de 2007 [Fecha de consulta: 5 de enero de 2012]. Disponible en: <http://min.webs.upv.es/wp-content/uploads/2011/03/Manual-SPSS16.pdf>
- Torres G. y Pérez J. Métodos de asignación de tránsito en redes regionales de carreteras: dos alternativas de solución. *Instituto Mexicano del Transporte, publicación técnica*, (número 214), 2002: 24-25, Sanfandila, Qro.

BIBLIOGRAFÍA

- Allan R. *Survey of agent based modelling and simulation tools*, Computational Science and Engineering Department, junio, 2009, pp. 1-15.
- CENAPRA. Accidentes de tránsito en México 2013 [en línea] México 2013 [Fecha de consulta: 15 de marzo de 2015]. Disponible en: http://conapra.salud.gob.mx/Interior/Documentos/Informe_Nacional.pdf
- CENAPRA. México disminuirá 60 mil muertes por accidentes de tránsito en 10 años [en línea] México, 10 de septiembre del 2011 [Fecha de consulta: 13 de septiembre de 2011]. Disponible en: http://www.cenapra.salud.gob.mx/CENAPRA_2010/buenas_practicas/menos_60_mil_muertes.html
- Geosimulation. 11 de abril de 2011 [en línea]. Disponible en: <http://www.geosimulation.org/>
- Instituto Nacional de Salud Pública. Accidentes de tránsito: importante problema de salud [en línea] México, 26 de mayo de

2010 [Fecha de consulta: 15 de mayo de 2013]. Disponible en: <http://www.insp.mx/noticias/boletines-de-prensa/205-accidentes-de-transito-importante-problema-de-salud.html>

Mejía-Sánchez J.A. *Sistema de detección de intrusos en redes de comunicaciones utilizando redes neuronales* (tesis de licenciatura en ingeniería en electrónica y computadoras), Universidad de las Américas Puebla, 2004.

Organización Mundial de la Salud. *Informe mundial sobre prevención de los traumatismos causados por el tránsito: resumen*, Ginebra, Suiza, Organización Mundial de la Salud, 2004.

Citación sugerida:

Citación estilo Chicago

Castro-Hernández, Felipe de Jesús. La geosimulación, una herramienta para la prevención de los accidentes de tránsito. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIX, 02 (2018): 135-145.

Citación estilo ISO 690

Castro-Hernández F.J. La geosimulación, una herramienta para la prevención de los accidentes de tránsito. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XIX (número 2), abril-junio 2018: 135-145.

SEMBLANZA DEL AUTOR

Felipe de Jesús Castro-Hernández. Candidato a doctor en geografía por parte de la Universidad Nacional Autónoma de México. Realizó estudios como ingeniero industrial en la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería y Ciencias Sociales y Administrativas (UPIICSA) del IPN durante el periodo de 1989 a 1993, obtuvo el grado de maestro en administración en el año de 1998 por parte del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Actualmente trabaja como profesor en la Universidad Tecnológica de México y es consultor en la empresa Neus, sus áreas de interés son la geosimulación, optimización espacial y logística.