



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
DOCTORADO EN GEOGRAFÍA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
GEOMÁTICA

**LA GEOSIMULACIÓN, UNA HERRAMIENTA PARA
LA PREVENCIÓN DE ACCIDENTES DE TRÁNSITO**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
FELIPE DE JESÚS CASTRO HERNÁNDEZ

TUTOR PRINCIPAL:

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

DR. LUIS CHIAS BECERRIL

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTORIAL:

INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

DR. RAÚL AGUIRRE GOMEZ

CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN COMPUTACIÓN (CIC-IPN)

DR. SERGEI PAVLOVICH
LEVACHKINE

MÉXICO, CIUDAD DE MÉXICO, NOVIEMBRE DE 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Esta hoja se dejó en blanco de manera intencional

Resumen

Los accidentes de tránsito son la principal causa de muerte entre personas de cinco y treinta cuatro años de edad en México y en países de bajos ingresos generan un costo del 1% del Producto Interno Bruto.¹ Algunos indicadores de las pérdidas que ocasionan son los siguientes:

- De acuerdo a la Organización de la Naciones Unidas (ONU) en el mundo mueren cada año 1 millón 300 mil personas².
- Las cifras oficiales del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), señalan que en México en el año 2013 fallecieron a consecuencia de los accidentes de tráfico de vehículo de motor 16,000 personas; sin embargo, de acuerdo con estudios científicos relacionados con el sub registro de información en México, calculan que cada año fallecen más de 24 mil personas, cifra que podría casi triplicarse en la próxima década³.
- Las lesiones por accidentes de tránsito (AT) en México ocupan el cuarto sitio como causa de mortalidad, además de que generan un impacto negativo en lo económico y social; el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) señaló que 26% de las personas que demandaron atención en las salas de urgencia de hospitales públicos (IMSS, SSSTE y SSA) en México durante 2007 lo hicieron debido a alguna lesión (1,229,667 lesionados), y de éstas el 13% (49,497) fueron provocadas por un AT.
- Otro elemento destacado son los casos de hospitalizados: 49,449 personas; en promedio un lesionado por AT permanece 5 días hospitalizado, considerando el costo para las instituciones del sector de la salud (público y privado) así como los gastos en daños materiales en vehículos involucrados, en los que hubo lesionado, más los costos indirectos debido a mortalidad prematura, se estima que las pérdidas sociales atribuibles a los lesionados por AT suman una cifra de \$82, 498 millones de pesos en ese mismo año.⁴

¹ Instituto Nacional de Salud Pública, "Accidentes de tránsito: importante problema de salud", *Instituto Nacional de Salud Pública*, Mayo 10, 2010, <http://www.insp.mx/noticias/boletines-de-prensa/205-accidentes-de-transito-importante-problema-de-salud.html>, (Consultado Mayo 15, 2012).

² Alfonso Aguilar. "Los accidentes y la promesa 2089", *Excelsior*, Agosto 19, 2012, http://www.excelsior.com.mx/index.php?m=nota&seccion=opinion&cat=11&id_nota=854248, (Consultado en Mayo 25, 2012).

³ Periódico La Jornada, "México, entre los 10 países con mayor número de muertos por accidentes de tránsito", Marzo 25, 2013, <http://www.jornada.unam.mx/2013/03/25/sociedad/041n1soc>, (Consultado en Junio 2013).

⁴ Instituto Nacional de Salud Pública, "Accidentes de tránsito: importante problema de salud", *INSP* (2010), <http://www.insp.mx/noticias/boletines-de-prensa/205-accidentes-de-transito-importante-problema-de-salud.html>, (Consultado en Septiembre 10, 2010).

Los accidentes, dada su gravedad, han sido abordados para su entendimiento y reducción a través de diferentes perspectivas, entre las más comunes están las relacionadas con la Educación Vial y la Seguridad Vial principalmente⁵. Una de las ciencias que se encarga de su estudio, para posteriormente su reducción, es la geografía a través de una sub disciplina denominada geografía de la accidentabilidad de vías, la cual pertenece a la geografía del transporte, y se encarga del estudio espacial de los transportes, en cuanto a los movimientos de mercancías, personas y de información, trata de vincular el análisis de las limitaciones espaciales y atributos con el origen, el destino, el alcance, la naturaleza y el propósito de los movimientos, así como de los problemas que se presentan durante la interacción del transporte, como son los accidentes y la inseguridad vial, intenta comprender los accidentes de tráfico con referencia en una multiescala y sobre una multitemporalidad, para dar respuesta a su reducción⁶. Con respecto a las herramientas modernas de la geografía, para la reducción de los accidentes de tránsito, están los métodos de análisis espacial, los cuales tienen como fin el conocerlos con detalle y como consecuencia tomar acciones para su reducción, entre los más comunes están los que utilizan los sistemas de información geográfica (SIG) y la geo estadística; estos se organizan alrededor de modelos de datos, estructuras computacionales (rasters y vectores son variantes comunes) que determinan cómo los SIG almacenan, organizan y muestran diversos tipos de información para diferentes propósitos; en pocas palabras, el tratamiento de los modelos de datos nos muestran los fenómenos en términos de objetos que representan las entidades y sus atributos relacionados; en un SIG, por lo general no existe un modelo específico de los procesos que gobiernen y muestren su dinámica, su adaptación y evolución del sistema.⁷ Cuando una descripción de un ambiente es hecha en términos de un SIG esta representa las propiedades y las relaciones espaciales entre sus elementos; esas propiedades y relaciones solo describen el estado del ambiente cuando la descripción es hecha, pero no representan cambios que ocurren de manera directa a través del

⁵ Raquel E. Navas Hernández, "Acción estratégica de la dirección general de tráfico (2011-2020) para la educación vial en ámbitos no formales", *ESTT – OEP 2013*, http://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCoQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.dgt.es%2FGalerias%2FIna-dgt%2Fempleo-publico%2Foposiciones%2Fdoc%2F2013%2FTEMA_52_Parte_Comun_mov_segura37e.doc&ei=6ftmU4SjLIQg8QG0x4DgCw&usq=AFQjCNEPydrEwbYhRb8NHDbrGd8WBdAL8w&bvm=bv.65788261,d.b2U, (Consultado Mayo 2, 2013).

⁶ FÁ Cerquera Escobar, "La configuración espacial geográfica, contexto esencial de estudio del transporte y la accidentalidad" (2013), *Universidad Nacional de Costa Rica*, <http://repositorio.una.ac.cr/handle/11056/5712>, (Consultado en Octubre 20, 2011).

⁷ Torrens Paul M, "Process Models and Next-Generation Geographic Information Technology", *Arc News Serie* (2011), <http://www.esri.com/news/arcnews/summer09articles/process-models.html>. (Consultado en Junio 20, 2011).

tiempo; esto se puede hacer realizando una comparación de situaciones en diferentes estados del tiempo. En los modelos basados en un SIG no se incluye el comportamiento del fenómeno con el paso del tiempo, no de manera directa, lo que dificulta poder entenderlo y analizarlo desde una perspectiva dinámica.⁸

Los accidentes debido a la cantidad de factores que intervienen durante su generación son considerados como un proceso complejo. La habilidad para su representación, simulación y predicción serán fundamentales para la toma de acciones preventivas que contribuyan a su disminución⁹. Por otro lado está un método que muestra ser prometedor para cubrir esas limitaciones, llamado geosimulación, de acuerdo con Holland¹⁰ la mejor manera de entender un fenómeno dinámico es a través de la observación del fenómeno reproducido a través de una herramienta de la misma índole. La geosimulación es un nuevo enfoque para el modelado de sistemas complejos compuesto por agentes autónomos que interactúan; los avances computacionales han hecho posible un número creciente de modelos basados en agentes a través de una variedad de dominios de aplicación, las aplicaciones van desde el comportamiento de agentes en el mercado de valores, las cadenas de suministro y los mercados de consumo, a la predicción de la propagación de epidemias, la mitigación de la amenaza de guerra biológica y la comprensión de los factores que pueden ser responsables de la caída de las civilizaciones antiguas; este progreso sugiere que el potencial de la geosimulación pueda tener efectos de largo alcance sobre la forma en que las empresas utilizan los ordenadores para apoyar a la toma de decisiones y los investigadores utilicen modelos basados en esta técnica como laboratorios vivos, algunos sostienen que la geosimulación "es una tercera forma de hacer ciencia", y podría aumentar el razonamiento deductivo e inductivo tradicionales, como los métodos de descubrimiento.¹¹

En este proyecto se propone la modelación basada en geosimulación, como la mejor alternativa para la representación y predicción de los accidentes de tránsito, que son considerados como desequilibrios que suceden dentro de un sistema complejo, mediante el cual podemos

⁸ Martínez Miguel and Levachkine Serguei, *Dynamic Models of Geographic Environment Using Ontological Relations*, (Lectures Notes in Geoinformation and Cartography, 1a Edition USA: Springer, 2009).

⁹ Malleon Nicolas, "Agent-Based Modelling of Burglary", (Doctoral Thesis, The University of Leeds School of Geography, 2010), 45.

¹⁰ Rivas Tovar Luis Arturo, *Efectos de la teoría de la complejidad en la gestión ambiental en México*, (Centro Mario Molina, Instituto Politécnico Nacional, 2009), 180.

¹¹ Rossetti M. D., Hill R. R., Johansson B., Dunkin A. and Ingalls R. G., Simulation Based in Agents (Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, USA, 2009).

entenderlos y proyectarlos; entre las ventajas de este método destacan: 1) la información que nos proporciona cuenta con un nivel mayor de agregación, 2) capta los fenómenos emergentes, 3) ofrece un ambiente natural para el estudio de ciertos sistemas, 4) es flexible, especialmente en relación con el desarrollo de modelos geo espaciales y 5) podemos diseñar escenarios del tipo ¿qué pasaría si?, al cambiar las variables involucradas. Este objetivo se logró a través de la documentación y construcción de un modelo basado en la geosimulación en el que se incluyeron los elementos de un sistema vial, en donde se presentan los accidentes de tránsito, el cual está formado por la vía, el conductor, el vehículo y los semáforos. Este se hizo representando la Avenida Insurgentes Norte, en sus límites entre la Delegación Gustavo A. Madero y el Municipio de Ecatepec de Morelos, que es un cruce con un número elevado de accidentes¹²; se explicaron sus fundamentos teóricos y su logística de operación, también se realizaron modelos tradicionales de esta misma vía y se compararon los resultados entre estos, esto con el fin de conocer sus ventajas y desventajas entre estos, dentro de este trabajo se incluye un apartado con los resultados que se obtuvieron con el cambio de los valores de sus parámetros de operación y se hizo su interpretación; este modelo se construyó con el programa de cómputo llamado Traffix, el cual fue hecho por la Empresa AITIA, S.A., trabaja bajo el ambiente de desarrollo Repast 3; una de nuestras aportaciones, fue la elaboración del módulo de accidentes de tránsito, utilizando las ventajas que nos ofrece la programación orientada a objetos.

El modelo basado en geosimulación puede ser un útil complemento con los modelos estáticos, a los que les denominamos tradicionales, ya que nos puede proporcionar información con un mayor nivel de agregación.

¹² Política Digital, "Los cruceos más peligrosos en el DF", *Serie Política Digital*, <http://www.politicadigital.com.mx/?P=leernoticiaprint&Article=21038>, (Consultada en Diciembre, 2010).

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABLAS.....	17
INTRODUCCIÓN.....	19
CAPÍTULO 1.....	25
DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	25
1.1. Planteamiento del problema.....	25
1.2. Objetivo general y específicos.....	27
1.3. Hipótesis.....	28
1.4. Metodología.....	29
1.5. Justificación de la investigación.....	32
1.6. Viabilidad de la investigación.....	33
1.7. Evaluación de las deficiencias en el conocimiento del problema.	33
1.8. Delimitación de la zona de estudio.....	34
1.9. Organización de la tesis.	35
CAPÍTULO 2.....	37
ENTENDIENDO LOS ACCIDENTES DE TRÁNSITO	37
2.1. La geografía y los accidentes de tránsito.....	38
2.1.1. La geografía y su método de estudio.	38
2.1.2. La geografía económica y del transporte.....	44
2.2. Concepto de accidente de tránsito.	50

2.3.	Perspectivas de estudio de los accidentes de tránsito.....	51
2.4.	Situación en América Latina.....	57
2.4.1.	Estado actual de los traumatismos causados por el tránsito en la región de las Américas.....	60
2.4.2.	Legislación y vigilancia de la aplicación.....	72
2.4.3.	Intervenciones para el diseño de un sistema de tránsito seguro y sostenible.....	78
2.4.4.	Recomendaciones de la OMS sobre seguridad vial.....	80
2.4.5.	¿Cómo se previenen los accidentes de tránsito?.....	81
2.5.	Situación de la seguridad vial en México.....	83
2.6.	Factores que originan los accidentes de tránsito.....	106
2.6.5.	El hombre.....	109
2.6.5.1.	El factor humano.....	109
2.6.5.2.	Alcoholismo.....	110
2.6.5.3.	La visión.....	112
2.6.5.4.	La vista.....	112
2.6.6.	El vehículo.....	113
2.6.7.	La vía.....	114
2.6.7.1.	Señales.....	116
2.6.7.2.	Topes.....	116
2.6.8.	El medio.....	117
2.6.8.1.	Las condiciones ambientales.....	117
2.6.8.2.	La velocidad.....	118
2.6.8.3.	Obstáculos visuales.....	119
2.7.	Teoría de la evolución de los accidentes de tránsito.....	120
CAPÍTULO 3.....		133
LA GEOSIMULACIÓN Y LA MODELACIÓN BASADA EN AGENTES.....		133
3.1.	¿Qué es la geomática?.....	134
3.2.	¿Qué es la Ciencia de la Información Geográfica y Tecnología (GIS & T)?.....	135
3.3.	¿Qué es la geosimulación?.....	138
3.4.	Geosimulación como modelos basados en objetos.....	143
3.4.1.	Representación de los objetos.....	143
3.4.2.	Comportamiento de objetos.....	143

3.4.3.	Tiempo de los objetos.	143
3.5.	Fundamentos de geosimulación.	144
3.5.1.	Teoría de la complejidad y sistemas complejos.	144
3.5.2.	Introducción a la teoría moderna de los modelos dinámicos.	153
3.5.3.	Sistemas de información geográfica y análisis espacial.	157
3.5.4.	Simulación.	160
3.5.5.	Programación orientada a objetos.	162
3.6.	Elemento base de la geosimulación: Autómata.	165
3.7.	Modelación y simulación basada en agentes.	167
3.7.1.	Fundamentos de ABMS.	168
3.7.2.	¿Cómo ABMS funciona?	168
3.7.3.	Atributos de los Agentes.	170
3.7.4.	Comportamientos de los agentes.	172
3.7.5.	Agentes simples o Proto Agentes.	174
3.7.6.	Agentes complejos.	175
3.7.7.	Ejemplo de cómo funcionan los agentes.	176
3.7.8.	Orígenes de la modelación basada en agentes.	181
3.7.9.	Metodologías de modelación basadas en geosimulación.	182
3.7.9.	Ventajas y desventajas de usar modelación y simulación basada en agentes. ...	186
3.7.10.	Evolución y estado del uso de la modelación basada en agentes.	190
3.8.	Guías para escoger una herramienta para la elaboración de modelos basados en agentes.	204
CAPÍTULO 4.		209
MÉTODOS UTILIZADOS PARA LA MODELACIÓN Y PREDICCIÓN DE LOS ACCIDENTES DE TRÁNSITO.		209
4.1.	Métodos utilizados en la proyección de accidentes de tránsito.	210
4.2.	Métodos basados en sistemas de información geográfica.	211
4.3.	Métodos basados en redes neuronales.	221
CAPÍTULO 5.		231
APLICACIÓN DE MODELOS DE ACCIDENTES DE TRÁNSITO.		231

5.1. Modelo basado en un sistema de información geográfico (SIG).....	232
5.2. Modelo basado en redes neuronales.....	242
5.3. Comparación de las características de los modelos basados en geo estadística con respecto a los que utilizan redes neuronales.....	248
5.4. Modelo basado en la geosimulación.	250
5.4.1. Características del modelo basado en agentes.	252
5.4.2. Virtualización de la situación real.....	259
5.4.3. Descripción del modelo basado en agentes utilizando la metodología “El Proceso Unificado de Desarrollo de Software”.	263
5.4.2.1. ¿Qué es el Proceso Unificado de Desarrollo de Software?	263
5.4.3.2. Diagramas de casos de uso.....	267
5.4.3.3. Arquitectura del modelo.....	271
5.4.4. Implementación del modelo en una plataforma de computación.....	272
5.4.4.1. Directrices para la elección de la herramienta de modelación.	272
5.4.4.2. Descripción del kit de modelación Repast.....	276
5.4.4.2.1. Contextos y Proyecciones.....	277
5.4.4.2.2. Parametrización del modelo.....	280
5.4.4.3. Entorno de desarrollo Traffix.....	281
5.4.4.3.1. El ambiente de Traffix basado en la simulación basada en agentes.	282
5.4.4.4. Diseño del modelo basado en agentes y bases de su operación.....	286
5.4.5. Información para alimentar al modelo.....	310
5.4.6. Verificación y calibración del modelo.	316
5.4.7. Prueba del modelo con datos reales.	323
5.4.8. Comparación de los métodos del modelo basado en agentes, redes neuronales y geo estadística.	334
5.4.9. Aplicación del modelo en un sistema integral para la prevención de accidentes.	336
 CAPÍTULO 6.....	 338
 CONCLUSIONES.....	 338
6.1. Introducción.....	338
6.2. Resumen de las investigaciones encontradas.....	339
6.3. Critica a la metodología.	343
6.4. Desventajas de la metodología utilizada.....	345

6.5. Recomendaciones para futuros trabajos.....	346
6.6. Conclusiones finales.....	347
APÉNDICE A	348
DESCRIPCIÓN DEL AMBIENTE TRAFFIX	348
1. RED DE CARRETERAS.....	348
1.1. Las clases que se integran directamente en la gráfica de la Red de Carreteras.	349
1.1.1. La clase del nodo.....	349
1.1.2. La clase Edge o borde.....	350
1.1.3. La Clase Lane.	351
1.2. La clase semáforo o TrafficLight.	354
1.3. La Clase GraphToolbox.	355
1.4. La Clase GraphLoader.	357
2. CLASE VEHÍCULOS O CARS.	358
2.1. Los atributos más importantes de un vehículo.....	358
2.2. Un paso de un coche.	359
2.3. El método desiredMove () método.....	359
2.4. El método moveCar ()......	360
2.5. Uso de un nuevo objeto de la clase de coches, un nuevo coche.	362
2.6. Las clases que implementan la interfaz IVehicle.	362
3. CLASE DE CONDUCTORES.....	362
3.1 El interfaz de Idriver.	363
4. EL PAQUETE TRAFFICMODEL.....	364
APÉNDICE B	370

DIAGRAMAS DE CLASES DEL AMBIENTE TRAFFIX 370

- 1. Paquete trafficModelVehicles..... 371**
- 2. Paquete trafficModelDrivers..... 372**
- 3. Paquete trafficModelObjects..... 373**
- 4. Paquete trafficModelGis..... 374**
- 5. Paquete trafficModelPainters..... 375**
- 6. Paquete trafficModelGraph..... 376**
- 7. Paquete trafficModelVis..... 377**
- 8. Paquete trafficModel..... 378**

BIBLIOGRAFÍA..... 380

Lista de figuras

Estatutos

Figura 2.11. Porcentaje del total de personas fallecidas a causa de lesiones de tránsito que son hombres, según subregión de las Américas, 2006–2007.	66
Figura 2.12. Lesionados no fatales por cada fallecido por lesiones en el tránsito, Región de las Américas, 2006–2007.	67
Figura 2.13. Porcentaje de muertes en el tránsito atribuidas al consumo de alcohol, Región de las Américas, 2006–2007.	68
Figura 2.14. Prevalencia de uso de cinturón de seguridad, Región de las Américas, 2006–2007.	68
Figura 2.15. Tipos de vehículos registrados, subregiones de las Américas, 2006–2007.	69
Figura 2.16. Tasa de motorización por 1,000 habitantes, Región de las Américas 2006 – 2007.	70
Figura 2.17. Existencia de un organismo rector de la seguridad vial, Región de las Américas, 2006–2007.	71
Figura 2.19. Políticas para el diseño de un sistema de tránsito seguro y sostenible, Región de las Américas, 2006–2007.	79
Figura 2.2. Enfoque de salud pública.	53
Figura 2.20. Número de accidentes por zona.	92
Figura 2.21. Causas de accidentes.	93
Figura 2.22. Tipos de accidentes.	93
Figura 2.24. Factores que producen los accidentes de tránsito.	108
Figura 2.25. Los árboles impiden tener una visibilidad clara.	120
Figura 2.26. Espacio en donde sucede un accidente.	121
Figura 2.27. Tiempo en que sucede un accidente.	122
Figura 2.28. Posición en donde sucede un accidente.	123
Figura 2.29. Diagrama de percepción de un accidente.	125
Figura 2.3. Matriz de Haddon.	54
Figura 2.30. Puntos de contacto de un accidente.	127
Figura 2.31. Diagrama de la evolución de un accidente.	129
Figura 2.5. Definición de muerte por lesiones causadas por el tránsito, según tiempo transcurrido entre el evento y la defunción, Región de las Américas, 2006–2007.	64
Figura 2.6. Distribución de las muertes por lesiones causadas por el tránsito, Región de las Américas, 2006–2007.	64
Figura 2.7. Distribución de la tasa reportada de mortalidad por lesiones causadas por el tránsito, Región de las Américas, 2006–2007.	64
Figura 2.8. Distribución de la tasa de mortalidad por lesiones causadas por el tránsito, ajustada por la definición de muerte y sub registro, Región de las Américas, 2006–2007.	65
Figura 2.9. Tasa ajustada de mortalidad por tránsito vehicular, según subregión de la OPS, 2006–2007.	65
Figura 3.11. Número de artículos por año.	191
Figura 3.12. Número de artículos publicados de acuerdo con tema.	191
Figura 3.13. Software utilizado en el diseño de modelos.	192
Figura 3.14. Artículos publicados por campo de estudio.	193
Figura 3.15. Propósito de la simulación por año.	194
Figura 3.16. Propósito de la simulación por año.	195
Figura 3.17. Referencia para tener acceso al modelo.	196
Figura 3.18. Acceso al modelo completo de acuerdo con su referencia.	197
Figura 3.19. Porcentaje de desarrolladores que validaron su modelo.	198
Figura 3.2. Técnicas conocidas como geosimulación.	139
Figura 3.20. Validación de los modelos por año.	199
Figura 3.21. Porcentaje de validación del modelo por área.	200

Figura 3.22 Porcentaje de validación de acuerdo con su propósito.	201
Figura 3.23 Porcentaje de técnicas de validación por año.	202
Figura 3.24 Técnicas de validación utilizada por campo de aplicación.	202
Figura 3.3. Ejemplo de agentes del mundo real.	170
Figura 3.4. Ejemplo de características de agentes.	171
Figura 3.5. Atributos y comportamientos comunes corporativos.	171
Figura 3.6. Organización multi escala con sus empleados como subagentes.	172
Figura 3.7. Comportamientos básicos de diferentes agentes.	173
Figura 3.9. Ejemplo de un agente de un mercado.	182
Figura 4.1. Arquitectura Feedforward con una capa oculta.	224
Figura 5.1. Accidentes geo codificados.	234
Figura 5.10. Características que debe de tener un modelo basado en agentes.	259
Figura 5.11. Caso de uso general del modelo basado en agentes sobre la prevención de accidentes de tránsito.	267
Figura 5.12. Configuración de los elementos del modelo en función de la información recopilada en campo.	268
Figura 5.13. Creación de los elementos del modelo de acuerdo con las características tomadas de la teoría e información en campo.	269
Figura 5.15. Ejecución del modelo con todos sus elementos que lo forman y su interacción entre estos y con su ambiente, todo regido por la unidad de tiempo TICK.	270
Figura 5.16. Obtención de los resultados del modelo con el fin de tomar acciones y reducir el número de accidentes de tránsito.	271
Figura 5.17. Simulación de tráfico de la autopista con la visualización en 3D.	283
Figura 5.19. Elementos utilizados en el modelo: vehículos, avenidas, conductores y semáforos.	296
Figura 5.2. Mapa temático del número de accidentes en cada cruce de la Avenida Insurgentes Norte.	234
Figura 5.20. Ambiente de desarrollo Traffix, trabajando sobre la plataforma Eclipse.	297
Figura 5.21. Principios de funcionamiento del modelo.	298
Figura 5.22. Interface gráfica del programa Traffix.	300
Figura 5.23. Interface del programa Traffix.	306
Figura 5.24. Diagrama de clases del modelo final.	308
Figura 5.25. Diagrama de secuencias.	308
Figura 5.26. Diagrama de actividades del funcionamiento de los vehículos.	309
Figura 5.27. Carga vehicular en número de vehículos por hora.	314
Figura 5.28. Velocidades de los vehículos en kilómetros por hora.	315
Figura 5.29. Curvas de nivel de la zona de estudio.	316
Figura 5.30. Conforme aumenta la cantidad de vehículos la velocidad disminuye.	322
Figura 5.30. Relación entre la velocidad de tráfico, densidad y flujo.	318
Figura 5.31. Comportamiento del modelo de la relación entre las variables velocidad, flujo y densidad.	320
Figura 5.33. Conforme aumenta la cantidad de vehículos la velocidad disminuye.	322
Figura 5.34. Interface gráfica del modelo del corredor Insurgentes Norte.	323
Figura 5.35. Condición de bloqueo que se incluye en el modelo del corredor Insurgentes Norte.	326
Figura 5.36. Interface gráfica que nos muestra el comportamiento de los vehículos en el área durante la modelación.	329
Figura 5.37. Como una variación del modelo los tres carriles se desbloquearon.	331
Figura 5.38. Interfaces gráficas del comportamiento de los vehículos.	332
Figura 5.4. Zonas de ocurrencia de accidentes en el corredor Insurgentes Norte.	237
Figura 5.5. Zoom de las zonas de ocurrencia de los accidentes del corredor Insurgentes Norte.	237
Figura 5.6. Zoom de las zonas de ocurrencia de los accidentes en el corredor Insurgentes Norte.	238
Figura 5.7. Zoom de las zonas de ocurrencia de los accidentes en el corredor Insurgentes Norte.	238
Figura 5.9. Zona del corredor Insurgentes Norte a modelar.	251

Figura A1 - Gráfica de la red de carreteras. Las líneas rojas representan los bordes y el margen izquierdo de su carril 0a. Las líneas azules representan el margen de los otros carriles de los bordes.	350
Figura A2. Los límites de una intersección. Las líneas rojas y azules representan las secciones de las vías verdes que forman parte de la intersección.	353
Figura A3 - Las líneas rojas indican las formas en que los coches han de seguir a través de la intersección.	361
Figura A4. Los parámetros del modelo.	369
Figura B1. Paquetes del ambiente Traffix.	371
Figura B2. Clases del paquete trafficModelVehicles.	372
Figura B3. Clases del paquete trafficModelDrivers.	373
Figura B4. Clases del paquete trafficModelObjects.	374
Figura B5. Clases del paquete trafficModelGis.	375
Figura B6. Clases del paquete trafficModelPainters.	376
Figura B7. Clases del paquete trafficModelGraph.	377
Figura B8. Clases del paquete trafficModelVis.	378
Figura B9. Clases del paquete trafficModel.	380
Tabla 5.12. Resultados obtenidos de accidentes al desbloquear.	330
Tabla 5.3. Aforo vehicular, en vehículos por minuto.	240
Tabla 5.8. Aforos vehiculares por crucero.	312

Esta hoja se dejó en blanco de manera intencional

Lista de tablas

Casos

Figura 3.10. Método genérico para el desarrollo de geosimulación basadas en multi agentes de dos y tres dimensiones.....	185
Figura 3.8. Ejemplo de un proto-agente.....	175
Figura 5.18. Barra de control de Repast.....	287
Figura 5.8. Aforo vehicular en cada cruceo.....	240
Tabla 1.1. Organización de la tesis.....	36
Tabla 2.1. Ramas de la Geografía.....	40
Tabla 2.10. Estadísticas sobre la motorización en México.....	88
Tabla 2.11. Estadísticas sobre accidentes de tránsito en México.....	89
Tabla 2.12. Estadísticas sobre accidentes de tránsito en México.....	90
Tabla 2.13. Causas de los accidentes.....	108
Tabla 2.14. Causas humanas que originan los accidentes de tránsito.....	110
Tabla 2.15. Tiempos de reacción en un accidente de tránsito.....	125
Tabla 2.2. Principales causas de muerte en la región de las Américas.....	59
Tabla 2.3. Países con límite de velocidad en vías urbanas menor o igual a 50 km/hr, según subregión de las Américas, 2006-2007.....	73
Tabla 2.4. Países con leyes de conducción bajo efectos del alcohol, que aplican como referencia alcoholemia menor o igual a 0.5 g/dl, según subregión de las Américas, 2006-2007.....	74
Tabla 2.5. Legislación sobre el uso de casco, según subregión de las Américas, 2006-2007.....	75
Tabla 2.6. Países en los que todos los ocupantes del automóvil deben de utilizar cinturón de seguridad, según subregión de las Américas, 2006-2007.....	76
Tabla 2.8. Observancia de la ley sobre sillas de seguridad para niños y niñas, según subregión de las Américas, 2006-2007.....	77
Tabla 2.8. Situación de la seguridad vial en México.....	86
Tabla 2.9. Distribución de países participantes por subregión.....	81
Tabla 5.1. Información de accidentes de tránsito por dirección.....	233
Tabla 5.10. Información inicial con que se alimentó el modelo.....	325
Tabla 5.11. Resultado del número de accidentes que nos proporcionó el modelo.....	328
Tabla 5.14. Comportamiento de los accidentes de tránsito al incrementar el porcentaje de distracción.....	334
Tabla 5.15. Comparación de los modelos estudiados.....	336
Tabla 5.2. Resultados de la proyección de accidentes por cruceo.....	236
Tabla 5.4. Información de accidentes de tránsito relacionados al aforo vehicular.....	243
Tabla 5.5. Estimación de datos de acuerdo con la red neuronal.....	247
Tabla 5.6. Comparación de los métodos de proyección utilizando geoestadística y redes neuronales.....	249
Tabla 5.7. Cuadro final de comparación.....	275
Tabla 5.8. Resultados obtenidos de accidentes al desbloquear los tres carriles en la lateral del metro Indios Verdes.....	330
Tabla 5.9. Velocidades y desaceleraciones determinadas.....	313
Tablas 5.13. Comportamiento de los accidentes de tránsito con el incremento del porcentaje de conductores a pasárselos altos o a no respetar la señalización.....	333

Esta hoja se dejó en blanco de manera intencional

Introducción

Los accidentes de tráfico representan una tragedia interminable, estos son estudiados por una de las subramas de la geografía llamada geografía de los transportes de la cual se deriva, la que Whiteleg¹³ denomina la geografía de la accidentabilidad en las vías; los intenta comprender utilizando métodos basadas en la geomática, principalmente los apoyados en la geo estadística y en los sistemas de información geográfica, describe los fuertes vínculos de este tipo de análisis con la geografía, son numerosos los temas que depara el futuro de las investigaciones de los accidentes que se están dados en el ámbito geográfico, de aquí la necesidad de contar con nuevos métodos para lograrlos comprender y como consecuencia lograr su reducción.

Entre las estrategias para reducirlos esta la aplicación de modelos cuantitativos, que se elaboran con el fin de entender las causas que los originan, a través de conocer cómo se relacionan las variables que intervienen y la proyección de su comportamiento. Los tipos de modelos más comunes que encontramos fueron los basados en el análisis espacial, utilizando los sistemas de información geográfica, son modelos estáticos que no integran la variable del tiempo de manera directa; otros tipos son los modelos que utilizan redes neuronales, los cuales tratan de reproducir el comportamiento de las variables que describen el fenómeno.

El mundo está incrementando su complejidad y los sistemas que necesita para ser analizado son cada vez más complejos. Las herramientas deben de capturar esta complejidad emergente, algunos sistemas han sido siempre complejos y las herramientas tradicionales no han sido adecuadas, para que las personas apoyadas en estas puedan entenderlos; la información que se requiere para comprenderlos debe de ser cada vez con más fina granularidad. Muchos líderes en las organizaciones y en el gobierno están encontrando que las herramientas que utilizan carecen de robustez para entender sus sistemas¹⁴. Dentro de las nuevas herramientas está la geosimulación, la cual puede ser una herramienta para resolver esta necesidad; estos modelos suelen ser considerados como constitutivos de un laboratorio en miniatura donde los atributos y el comportamiento de los agentes y el medioambiente en el que se alojan, se puede alterar y las repercusiones observadas durante de varias corridas de simulación.

¹³ Whiteleg J., "A geography of road traffic accidents", Department of Geography, University of Lancaster, Bailing, Lancaster, *Transactions of the Institute of British Geographers*, (1987); 2:161-176.

¹⁴ North Michael J. and Macal Charles M., *Managing Business Complexity*, (USA: Oxxoford University Press, 2007) 45.

El planteamiento que se hizo en este trabajo fue el siguiente: los accidentes de tránsito, deben de ser reducidos debido a las pérdidas que provocan en vidas y el incremento en pérdidas económicas para la sociedad; por su naturaleza dinámica y compleja es más conveniente modelarlos y proyectarlos utilizando modelos basados en la geosimulación (modelos que sean dinámicos y que involucren la variable tiempo de manera directa) en comparación con los métodos tradicionales (modelos estáticos). La aportación que se hace es demostrar, a través de la solución de un caso de estudio, que la geosimulación es la herramienta más adecuada para la representación, entendimiento y prevención de los accidentes de tránsito.

Este trabajo está dividido en 6 Capítulos, los cuales se desarrollaron con el objeto de poder mostrar las ventajas de modelar los accidentes de tránsito con una herramienta de tipo dinámico, como son los basados en la geosimulación, en comparación con los métodos estáticos a los que les hemos llamado tradicionales, así como el describir el proceso para la construcción de un modelo de este tipo. En el Capítulo 1 se muestra el protocolo de la investigación, en donde se describen los objetivos generales y específicos, la hipótesis, la justificación, el planteamiento de esta investigación, que se resume en denominar a la geosimulación como la mejor forma de representar y entender los accidentes de tránsito, con el fin de tomar acciones para su reducción. En el Capítulo 2, se muestran datos estadísticos sobre la situación que guardan los accidentes de tránsito en América Latina y en México, así como se analizan algunas teorías en torno a los factores que originan los accidentes de tránsito; lo que se busca en este capítulo es poder entender los factores que los originan y poder incluirlos en la elaboración de un modelo dinámico; esto nos va a llevar a que tengamos un modelo más apegado a la realidad, así como tener conciencia de las pérdidas que nos originan y la importancia de su reducción; se plantea la teoría de estudio de este fenómeno desde la perspectiva de la geografía, los diferentes conceptos de los accidentes de tránsito y sus diferentes enfoques de estudio, que van desde su descripción como un problema de salud pública, es decir, que la solución debe de ser de tipo reactivo, hasta la propuesta que hace la OMS (Organización Mundial de la Salud) que se deben de manejar con un enfoque sistémico. En el Capítulo 3 se aborda el estado del arte de la geosimulación, se hace una descripción de esta metodología así como de sus fundamentos teóricos que la originaron y más a detalle se trata la modelación basada en agentes, que es un método específico de la geosimulación y el que se utilizó en este trabajo. En el Capítulo 4 se describen las técnicas tradicionales que se utilizan más comúnmente para la modelación y predicción de los accidentes de tránsito, las cuales de acuerdo

con sus características las podemos englobar en dos: la representación y predicción utilizando como base los sistemas de información geográfica (SIG) y la geo estadística y la utilización de redes neuronales, los cuales son estáticos y buscan representar un fenómeno dinámico; en este capítulo se muestran varios ejemplos de cómo se utilizan estas técnicas y los resultados que se han obtenido, lo que se busca es conocer con detalle las características y metodologías tradicionales para resolver este tipo de problemas y poder detectar las áreas de oportunidad que se tienen. En el Capítulo 5 se elaboró un modelo basado en geosimulación, en el cual se incluyen los elementos que forman un sistema vial, en el cual se representaron: la vía, el conductor, el vehículo y los semáforos, no solamente de manera estática, si no la mayor parte de sus comportamientos, así como también se elaboraron los modelos tradicionales más utilizados; esto se realizó con el fin de hacer una comparación de los resultados entre estos, y de esta manera poder demostrar las ventajas de los modelos dinámicos sobre los estáticos. Este capítulo es la esencia del trabajo ya que de los resultados obtenidos en este se definen las conclusiones de la investigación; para su diseño se utilizó el lenguaje de modelación UML, tomando como referencia el programa de cómputo Traffix; se elaboró un módulo de accidentes de tránsito, el cual nos da el número de sucesos cuando dos vehículos tocan el mismo punto, que esta última es una de las aportaciones de este trabajo. Por último, en el Capítulo 6 se concluye con las aportaciones de esta investigación, se describen las ventajas y desventajas que tendríamos si utilizáramos un modelo de tipo dinámico, para la representación y modelación de los accidentes de tránsito, en comparación con los métodos tradicionales y la manera en cómo se podría utilizar la información que nos genera para la reducción de estos, se hace una crítica a la metodología utilizada y recomendaciones para futuros trabajos.

Como objetivo secundario se busca dar a conocer este tipo de herramientas que se pudieran utilizar en otros fenómenos geográficos aportándonos mayores ventajas, propias de la herramienta, en su representación y en la información que nos generen para la toma de decisiones.

Esta hoja se dejó en blanco de manera intencional

SITUACIÓN ALARMANTE

Las múltiples pérdidas de vidas por accidentes de tránsito ubican al país en el séptimo lugar en el mundo

Cifras anuales en México...



16 mil
personas
muertas



1 millón
de personas
heridas



40 mil
personas dis-
capacitadas*

CINCO REGLAS...

que se deben seguir cuando se conduce, para estar seguro



Utilizar
cinturón
de seguridad



Usar
casco en
motocic-
tas y
bicicletas



Los niños
viajan en
los asien-
tos trase-
ros



No usar el
teléfono
celular



No
conducir al-
coholizado o
drogado

*De forma permanente. Fuente: Secretaría de Salud

Esta hoja se dejó en blanco de manera intencional

Capítulo 1

Diseño de la investigación

Contenido

1.1. Planteamiento del problema.....	25
1.2. Objetivo general y específicos.....	27
1.3. Hipótesis.....	28
1.4. Metodología.....	29
1.5. Justificación de la investigación.....	32
1.6. Viabilidad de la investigación.....	32
1.7. Evaluación de las deficiencias en el conocimiento del problema.....	33
1.8. Delimitación de la zona de estudio.....	34
1.9. Organización de la tesis.....	34

1.1. Planteamiento del problema.

Uno de los problemas que tiene mayor impacto sobre la sociedad son los accidentes de tránsito, los cuales normalmente se tratan de predecir y entender mediante la utilización de técnicas basadas en análisis espacial y en modelos cuantitativos. En el mundo cada año mueren más de 1.2 millones de personas y entre 20 y 50 millones más sufren de lesiones en las vialidades, por lo que requiere de la atención inmediata por parte de los gobiernos. El 62 % de las muertes por accidentes de tráfico en el mundo ocurre en tan solo 10 países, siendo México el país que ocupa el séptimo lugar.¹⁵

Los métodos tradicionales para la modelación y predicción de accidentes de tránsito los podemos clasificar en dos: los modelos de causalidad y los epidemiológicos. Los modelos de

¹⁵ Noticieros televisa, “Gasta México 120 mil mdp al año por accidentes de tránsito”, <http://www2.esmas.com/noticierostelevisa/investigaciones-especiales/...> (Consultado Junio 2009).

causalidad se basan en la teoría del dominó propuesta por Heinrich en la década de los 40 (Ferry 1988), que describe a un accidente como una cadena discreta de eventos que ocurren en un orden temporal determinado, esta teoría pertenece a la clase de los modelos de accidentes secuenciales o basados en eventos, estos modelos funcionan bien para las pérdidas causadas por fallas de componentes físicos o de errores humanos en sistemas relativamente simples. En la década de los 80's surgió una nueva clase de modelos epidemiológicos de accidentes que trató de explicar la causalidad de estos en los sistemas complejos, los modelos epidemiológicos consideran eventos que conducen a los accidentes como análoga a la propagación de una enfermedad, es decir, como el resultado de una combinación de factores, algunos manifiestos y algunos latentes, que pasan a coexistir en el espacio y el tiempo. Modelos secuenciales de accidentes y epidemiológicos son insuficientes para captar la dinámica y las interacciones no lineales entre los componentes del sistema en el complejo sistema sociotécnicos en donde se da origen a los accidentes de tránsito.¹⁶

Los accidentes de tránsito en el mundo son uno de los mayores generadores de pérdidas en vidas y económicas para la sociedad, los modelos tradicionales que se utilizan para su modelación y proyección se basan fundamentalmente en la representación de los elementos, sus propiedades y sus relaciones matemáticas en el espacio, no consideran, la interacción entre estos ni la variable del tiempo, ante esto surge el siguiente planteamiento:

¿Qué beneficios tendríamos si utilizáramos para el entendimiento y como consecuencia la predicción de los accidentes de tránsito un modelo basado en la geosimulación, en comparación con los métodos tradicionales?

¹⁶ Zahid H. Qureshi, "A Review of Accident Modelling Approaches for Complex Socio-Technical Systems", *Defence and Systems Institute, University of South Australia, Mawson Lakes Campus*, (2009).

1.2. Objetivo general y específicos.

El objetivo de este proyecto fue demostrar que un método dinámico, basado en la geosimulación, para la modelación y prevención de los accidentes de tránsito nos proporciona mayores beneficios en cuanto a su representación, nivel de agregación de la información, entendimiento del fenómeno, su proyección e información que generan, para la utilización de esta en la toma de decisiones para su prevención.

Para lo cual se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- a. Analizar y comprender información y estadísticas sobre los accidentes de tránsito, que nos ayuden a entender sus consecuencias en cuanto a pérdidas de vidas y económicas y el impacto que se tendrá al lograr su prevención.
- b. Hacer una revisión y análisis sobre la literatura existente sobre los accidentes de tránsito, referente a los factores que influyen en su generación y que necesitan ser incluidos en un modelo para que reflejen la realidad, así como las diferentes perspectivas según las cuales se aborda el problema.
- c. Conocer el estado del arte de los métodos para la elaboración de modelos dinámicos y de manera específica los basados en geosimulación.
- d. Hacer un análisis y revisión sobre los métodos tradicionales de modelado y de prevención que se utilizan en los accidentes de tránsito, con el fin de resaltar sus áreas de oportunidad para explotar; dentro de este punto se considera el análisis de casos prácticos y de sus métodos utilizados.
- e. Diseñar y construir un modelo basado en geosimulación que nos ayude a entender la dinámica de los accidentes y permita poder entenderlos y proyectarlos, y que la información que genere pueda ser tomada para establecer medidas para reducirlos.
- f. Aplicar los métodos tradicionales y el basado en geosimulación en un caso práctico, con el fin de conocer las ventajas y desventajas entre estos.
- g. Asegurar que el modelo se puede aplicar a escenarios reales que nos permita hacer proyecciones de los accidentes de tránsito en las principales vías.
- h. Dar a conocer las metodologías de modelación de fenómenos desde un punto de vista dinámico.

1.3. Hipótesis.

Los accidentes de tránsito son desajustes que suceden dentro de un sistema complejo que involucra a múltiples actores y condiciones físicas geográficas interactuantes, su generación se debe a la combinación de una serie de variables, que los modelos tradicionales basados en el principio de causa efecto, al representarlos lo hacen con limitaciones, ya que no representan su complejidad¹⁷. La modelación basada en geosimulación es una de las técnicas más adecuadas para la modelación de este tipo de sistemas, la cual nos ofrece las siguientes ventajas:

1. Sus modelos parten del nivel micro hacia la macro y podemos ver el comportamiento de los accidentes en los dos niveles, el mantener juntos los dos niveles son uno de sus mayores beneficios, ya que permite incrementar el entendimiento del comportamiento de los elementos del fenómeno.
2. Entender el comportamiento y el efecto de cada uno de sus componentes y su relación entre ellos y sobre todo el sistema. Muestra la conexión entre los diferentes elementos del accidente y permite a los usuarios investigar sobre el efecto de estas interacciones y realizar pruebas al poder modificar el valor de cada una de ellas.
3. Sus elementos pueden tomar decisiones y pueden ser diseñados dentro del modelo de manera heterogénea y puede contener la cantidad de elementos requeridos, es decir, la complejidad del modelo puede ser incrementada o reducida de acuerdo con los intereses del investigador.
4. Es un modelo con un enfoque sistémico que nos permite abordar el problema de los accidentes de tránsito ya no desde la perspectiva tradicional de causa efecto.

Las desventajas de la utilización de este modelo son las siguientes:

1. La elaboración del modelo es compleja y requiere de conocimientos avanzados en programación orientada a objetos.
2. Los programas que se disponen de propiedad tienen precios muy elevados y nos limitan a elaborar modelos no tan complejos y pequeños y los programas de código libre su curva de aprendizaje es muy plana y no existe mucha documentación para su estudio.

¹⁷ Zahid H. Qureshi, "A Review of Accident Modelling Approaches for Complex Socio-Technical Systems", *Defence and Systems Institute, University of South Australia, Mawson Lakes Campus*, (2009).

1.4. Metodología.

En la metodología utilizada se incluyen los fundamentos para el análisis de cualquier fenómeno geográfico los cuales son: causalidad, localización, temporalidad, generalización, extensión, relación o conexión y manejo de escalas.

La metodología que se utilizó es la mostrada en los siguientes puntos:

1. Recopilación de fuentes de información.

- a. La primera parte sobre recopilación de información sobre accidentes de tráfico, tuvo como objeto, tener una visión más clara de cómo se comportan los accidentes de tránsito, cuales son los elementos que intervienen en estos y cuáles serían los beneficios que tendríamos si podemos contar con un nuevo método que nos proporcione mejores resultados, para en función de estos tomar decisiones para su reducción. El conocer estos elementos nos ayudó a incluir las variables más importantes en el modelo diseñado. Esta información que se recopiló nos sirvió también para conocer el proceso de elaboración de un modelo basado en geosimulación, así como de los modelos tradicionales y poder detectar sus áreas de oportunidad.
- b. Para la revisión bibliográfica se consultaron las siguientes bases de datos: Wiley Online Library, SpringerLink, Scopus, Elsevier, MyiLibrary y Redalyc, principalmente, se obtuvieron artículos del CASA (Centre for Advanced Spatial Analysis) y de la página de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y se adquirieron libros, principalmente a través de la página de internet Amazon, se hizo un énfasis en la revisión de los documentos y publicaciones en México de especialistas como el Dr. Luis Chías Becerril, además se revisaron noticias y documentos en internet relacionados con el tema.
- c. También se consultó información sobre los accidentes de tránsito vía web en la página de algunos organismos gubernamentales como: el Conapra (Centro Nacional para la Prevención de Acciones), el INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) y de periódicos nacionales en los cuales haya publicaciones relacionadas con los accidentes de tránsito.

- d. La organización de la información obtenida se hizo con la ayuda del organizador de referencias bibliográficas llamado Mendeley, los beneficios que se han obtenido con este programa han sido los siguientes: se tienen todos los documentos en línea, por lo que se pueden consultar en cualquier momento, es posible organizar los documentos, a través de un explorador, por tema, es posible exportar sitios web desde cualquier navegador, las citas bibliográficas son factibles de exportarlas a cualquier procesador de palabras, es posible establecer contacto, por medio del programa, con otros investigadores que trabajen en temas similares, entre otras cosas.¹⁸

2. Obtención de información

- e. Se seleccionó como objeto de estudio la Avenida Insurgentes Norte en los límites entre la Delegación Gustavo A. Madero y el Municipio de Ecatepec, se seleccionó este debido a que, de acuerdo con información de la Secretaría de Seguridad Pública,¹⁹ es una de las avenidas que presentan la mayor cantidad de accidentes de tránsito y de donde se disponía información historia sobre los accidentes de tránsito.
- f. Se recopiló información de campo, en función de las variables que se deben de incluir en el modelo. Esto se realizó por diez días durante el mes de Abril del 2104 en el horario de las 6:00 am a las 8:30 am, la determinación del tamaño de la muestra se hizo de acuerdo con un muestreo de trabajo, considerando una distribución normal, que nos aseguró una confiabilidad de la información de un 95 %²⁰, las variables que se tomaron fueron el flujo vehicular y velocidades de acuerdo con el tipo de vehículo, para esto se contó con el apoyo de un grupo de trabajo de la Empresa TransConsult. Esta información fue la base con que se alimentó el modelo. Ver anexo A.
- g. La información histórica sobre los accidentes de tránsito se obtuvo de una Compañía Aseguradora, bajo un acuerdo de confidencialidad.

¹⁸ Software Mendeley, <http://www.mendeley.com/>, (Consultado Abril 2009).

¹⁹ Política Digital, "Los cruceros más peligrosos en el DF", Serie Política Digital, <http://www.politicadigital.com.mx/?P=leernoticiaprint&Article=21038> , (Consultada en Diciembre, 2010).

²⁰ Ver anexo 1.

3. Elaboración de modelos

- h. Se elaboraron los modelos tradicionales que más se utilizan en la representación y predicción de los accidentes de tránsito, como son: el que utiliza como base los sistemas de información geográfica y geo estadística y los basados en redes neuronales, estos se desarrollaron utilizando la información histórica para la avenida en estudio y mediante la utilización de programas de cómputo comerciales, como es MapInfo para los que utilizan los sistemas de información geográfica y el SPSS para el de redes neuronales.
- i. El método que se utilizó en este proyecto para el diseño del modelo basado en la geosimulación fue “la metodología que nos permita hacer simulaciones de fenómenos espaciales o comportamientos en ambientes geográficos”, desarrollado por el Dr. Walid Ali para obtener su Doctorado en Computación en la Universidad de Quebec Canadá.²¹
- j. Para el diseño del modelo se utilizó como principal herramienta el lenguaje unificado de modelación (UML) a través de los diagramas de casos de uso y diagramas de clases, en el diseño se explica el funcionamiento del modelo.
- k. Para la elaboración del modelo dinámico se utilizó el programa de cómputo llamado Traffix (proporcionada por la Empresa AITIA, S.A. de C.V.), que utilizando las ventajas de la programación orientada a objetos, se hicieron extensiones de sus clases y de esta manera se logró el funcionamiento del programa y la representación del modelo de accidentes, como se mencionó anteriormente, este se alimentó de la información recopilada en campo de cada uno de sus elementos. Una vez que se tuvo el modelo, sus parámetros se modificaron y se analizó la información y distintos comportamientos que se generaron, esta se comparó con la obtenida a través de los modelos tradicionales y con la real, determinando las ventajas y desventajas entre estos, que es el principal objetivo de esta investigación. Una de las aportaciones secundarias de este trabajo fue desarrollar el módulo de accidentes de tránsito, aprovechando las ventajas que nos da la programación orientada a objetos.
- l. Los resultados de los modelos se compararon en función del nivel de agregación de la información que nos generaron, de los resultados obtenidos en comparación con los datos

²¹ Walid Ali, 2D/3D Multi Agent GeoSimulation, The Case of Shopping Behavior in Square One Mail (Toronto), VDM Verlag Dr. Müller, (Quebec City, Canada, 2006).

reales, de su precisión de proyección y de cómo se puede utilizar esta información para la prevención de los accidentes de tránsito. Una de las aportaciones de este trabajo es que a través de los modelos dinámicos es posible modificar sus parámetros e inferir distintos comportamientos.

1.5. Justificación de la investigación.

La utilidad de la investigación propuesta se puede resumir en los siguientes puntos:

Conveniencia. Nos servirá para contar con una herramienta que tenga mayores ventajas que las utilizadas tradicionalmente, que nos permita contar con información con un nivel mayor de agregación que se pueda utilizar para realizar una proyección y como consecuencia una reducción de los accidentes de tránsito así como poder inferir en distintos comportamientos cuando sus parámetros sean cambiados.

Relevancia Social. Los costos de los accidentes de tránsito se traducen en pérdidas en vidas y económicas, esto en el mundo, que contar con una alternativa para su modelación y proyección, desde una perspectiva dinámica, y que nos proporcione información más certera sobre la influencia de sus diferentes elementos, nos ayudara a utilizar para lograr su reducción, obteniendo un beneficio directo a la sociedad.

Implicaciones prácticas. Si el modelo se aplica de manera correcta, en puntos en donde se tiene registro de los accidentes de tránsito, logrará que se tomen acciones para reducir el número de accidentes.

Valor teórico. Se conocerán las ventajas y desventajas de un método dinámico, para la modelación y proyección de los accidentes de tránsito, en comparación con los métodos utilizados tradicionalmente.

Utilidad metodológica. Se contará con un método que nos ayude a modelar los accidentes de tránsito, desde una perspectiva sistemática y dinámica, la cual nos permitirá contar con información con un mayor nivel de agregación de cada uno de sus elementos, y poder tomar decisiones sobre estos para su reducción.

1.6. Viabilidad de la investigación.

La investigación fue viable debido a que se contó con los siguientes recursos y conocimientos para el logro de la investigación:

1. Se contó con una beca por parte del Conacyt para cubrir los gastos que se hicieron durante la investigación, como la compra de libros especializados principalmente de Estados Unidos a través de internet, pago de cursos y diplomados sobre programación orientada a objetos, entre otros.
2. Uno de los principales apoyos fue el código completo de desarrollo de la plataforma Traffix, para el desarrollo de modelos basados en agentes que utilicen redes viales, que nos proporcionó la Empresa AITIA, S.A.²² de Hungría, sin el cual no hubiera sido posible desarrollar este proyecto, ellos tardaron en desarrollarlo cuatro años con un grupo de 20 desarrolladores y con los recursos de la Empresa y de la Universidad de Hungría.
3. Se tenían conocimientos en programación de computadoras los cuales se complementaron con estudios en programación orientada a objetos que nos permitió poder hacer el programa utilizando la plataforma de desarrollo Traffix.

1.7. Evaluación de las deficiencias en el conocimiento del problema.

En esta investigación se realizó un modelo basado la geosimulación y de manera específica se utilizó la técnica de modelación basada en agentes, se simuló el comportamiento de la Avenida Insurgentes Norte, se hizo un modelo, en el cual se incluyen los elementos principales de un sistema vial, los cuales son: la vía, los vehículos (elemento mecánico), los conductores y algunos elementos del ambiente, como son los semáforos, estos elementos se consideraron de acuerdo con los que considera la Organización Mundial de la Salud que intervienen durante un accidente de tránsito desde la perspectiva sistémica²³ al igual que los estudios de William Haddon²⁴ en los que se consideran los mismos elementos, con sus respectivos comportamientos e interacciones, el incluir solo estos elementos no implica que no se incluyan las principales características y

²² Traffix, "Programa para el diseño de sistemas viales basado en agentes", Empresa Aitia, S.A. de C.V., <http://mass.aitia.ai/>, (Consultado Abril 2010).

²³ Organización Mundial De La Salud (OMS), Factores de riesgo de las colisiones, Prevención de Lesiones Causadas por el Tránsito, Manual de Capacitación, (Suiza, 2009): 22.

²⁴ Haddon JR W., Advances in the epidemiology of injuries as a basis for public policy, Public Health Report 1980, (Ginebra 1980):411-421.

funciones de cada uno, este simula el proceso dinámico de una red vial y resalta sus principales ventajas con respecto a los modelos tradicionales, a través de la información que nos proporciona. Este modelo se validó con la información real que se obtuvo junto con la que nos proporcionó el documento “Diagnostico Espacial de la Accidentes de Tránsito en el D.F.”²⁵, que a pesar de incluir solo los elementos mencionados, podemos decir que sigue el mismo patrón de comportamiento que nos muestran los datos reales. A pesar no contar con todos los elementos del sistema vial los datos que nos proporciona son suficientes para cumplir el objetivo de este trabajo.

Lo que faltaría por realizar es elevar la complejidad del modelo y ponerlo en práctica. Lo que se tendría que hacer es lo siguiente: complementar este modelo con otros elementos de la misma red vial, principalmente los ambientales, como los peatones, el efecto de la antigüedad del parque vehicular, los efectos del clima, etc., y ampliarlo a una zona más grande, por ejemplo una Delegación, y correr el modelo con el objetivo de detectar las principales causas que están generando los accidentes de tránsito y el número generado de estos, todo esto dentro de un lapso de tiempo, validar el modelo nuevamente con información real, lo cual nos debería de dar una mayor aproximación y una vez que este validado, empezar a modificar los elementos reales de las vías para reducir los accidentes y medir los efectos de estos cambios en número de accidentes.

1.8. Delimitación de la zona de estudio.

Por el tipo de investigación que se realizó, no es requerido tener una zona específica de estudio, el tipo de modelos que se están estudiando es posible utilizarlos en cualquier lugar en donde exista una red vial.

²⁵ Luis Chías Becerril. “Diagnostico Espacial de los Accidentes de Tránsito en el DF”, CENAPRA, http://www.cenapra.salud.gob.mx/interior/Materiales_CONAPRA/Publicaciones_Especializadas/4_Diagnxstico_espa_cial_de_los_accidentes_de_trxnsito_en_el_DF_-_PRELIMINAR.pdf, (Consultado Abril 2011).

1.9. Organización de la tesis.

En resumen el proyecto se organizó de la siguiente manera:

Objetivo	Capítulos
En esta sección se describe el diseño de la investigación, en donde se muestran los objetivos, generales y específicos, hipótesis, justificación de la investigación, evaluación de las deficiencias en el conocimiento del problema, entre otros.	1. Diseño de la investigación.
Se analizaron datos estadísticos sobre los accidentes de tránsito en América Latina y en específico en México, el objetivo fue recalcar la importancia de su reducción. Se hace un análisis de los accidentes de tránsito desde la perspectiva geográfica, así como una revisión de los factores que lo generan y que deben de ser incluidos dentro de un modelo dinámico de una red vial.	2. Entendiendo los accidentes de tránsito.
Se hizo una revisión del estado de arte de la geosimulación y los diferentes métodos que se utilizan, en la construcción de este tipo de modelos, sus ventajas y desventajas, dándole mayor énfasis a la modelación basada en agentes que es la que se utilizó en este trabajo.	3. La geosimulación y la modelación basada en agentes.
Se hace una revisión de los métodos de análisis espaciales tradicionales que se utilizan en la modelación y predicción de los accidentes de tránsito, describiendo los más comunes, que son los basados en los sistemas de información geográfica y en redes neuronales.	4. Modelos utilizados para la predicción de accidentes.
Se describieron y elaboraron dos modelos tradicionales, los más utilizados, y la predicción de los accidentes, así como un modelo dinámico, utilizando el esquema de agentes. En este Capítulo se compararan los resultados de los tres modelos, recalcando las ventajas y desventajas que existen entre estos. En este Capítulo	5. Aplicación de modelos de accidentes de tránsito.

se muestra un apartado con los resultados que se obtuvieron al cambiar los parámetros del modelo, así como su análisis.	
Se analizan los resultados logrados, tomando como base los objetivos planteados al diseño de la investigación, se hace una crítica a la metodología, desventajas de la metodología utilizada y sugerencias para futuros trabajos.	6. Conclusiones.

Tabla 1.1. Organización de la tesis.²⁶

²⁶ Elaboración propia.

Capítulo 2

Entendiendo los accidentes de tránsito

Contenido

2.1. La geografía y los accidentes de tránsito.....	38
2.2. Concepto de accidente de tránsito.....	50
2.3. Perspectivas de los accidentes de tránsito.....	51
2.4. Situación en América Latina	57
2.5. Situación de la seguridad vial en México.....	83
2.6. Factores que originan los accidentes de tránsito.....	106
2.7. Teoría de la evolución de los accidentes de tránsito.....	120

En la primera parte de este capítulo se aborda el tema de la comprensión y reducción de los accidentes de tránsito desde la perspectiva de estudio de la geografía, esta los aborda como sucesos que ocurren durante el proceso de llevar productos o personas de un lugar a otro, que es el enfoque utilizado en este trabajo.

En la segunda parte se hace un análisis de los principales factores que intervienen en la generación de los accidentes de tránsito, así como las diferentes perspectivas de estudio, esto se hizo a través de la recopilación de estadísticas, tanto de México como de América Latina, y de su análisis, se estudian las diferentes teorías sobre los factores que los originan, con el fin de que cuando se diseñe el modelo dinámico, se incluyan la mayor cantidad de estas, lo cual nos ayudará a que se refleje de una manera más certera su comportamiento y nos proporcione información objetiva para la toma de decisiones para su prevención.

2.1. La geografía y los accidentes de tránsito.

Como estudiosos de la geografía en esta sección se pretende definir el contexto geográfico de los accidentes de tránsito, que es nuestro objeto de estudio, es decir, se vislumbran los accidentes de tránsito como problemas a resolver dentro del marco de la geografía del transporte.

2.1.1. La geografía y su método de estudio.

En esta parte se exponen conceptos acerca de la geografía, su objeto de estudio y su división todo esto basado en el libro de Sampieri²⁷.

La geografía juega un papel importante en los hechos y fenómenos geográficos, ya que interactúa con otras ciencias, misma que ha adquirido mayor importancia como resultado de grandes adelantos científicos y tecnológicos, teniendo como característica fundamental el ser a la vez descriptiva y analítica; ya que su labor principal es la exploración y el conocimiento de los procesos que han contribuido a configurar de muy diversas formas la superficie terrestre.

La geografía la podemos definir como la ciencia que estudia los hechos y fenómenos físicos, biológicos y humanos de la superficie terrestre, atendiendo a las causas que los originan y a su relación con otros hechos o fenómenos.

Entendiendo como **hecho**, el conocimiento del medio que nos rodea, este sujeto a una apreciación de temporalidad que se puede diferenciar, por su proceso formativo, en periodos más o menos largos. Ejemplo de hechos geográficos son: los océanos, las montañas, los ríos, los bosques o los animales y el hombre.

Y como **fenómeno**, se presenta cuando ocurre un cambio en la superficie terrestre y puede ser observado. Los fenómenos se registran en periodos que dependen de la forma en que tienen su origen y como ocurren. Son ejemplo de fenómenos geográficos: los sismos, los ciclones, tornados, cambios de temperatura, maremotos, volcanes en erupción e incendios forestales, entre otros.

No puede pasarse por alto que los hechos y los fenómenos geográficos tienen su origen a partir de la acción de la naturaleza, las plantas, animales y del hombre. Para clasificar el origen de los hechos y fenómenos geográficos es indispensable observar quienes actúan y como se jerarquizan sus acciones.

²⁷ Lucio Victorio Sampieri Gasperín, Geografía, (México: Editorial Nueva Imagen, S.A. de C. V., 2005), 9-30.

Origen de los hechos y fenómenos geográficos:

- a. Físico, son aquellos que se originan sin la intervención de los seres vivos, por tanto, la naturaleza es la que los realiza.
- b. Biológico, son ocasionados por la acción de los seres vivos, pero exceptuando el hombre, por tanto, son las plantas y los animales los que los producen.
- c. Humano, se presentan en virtud de la acción del hombre, quien es el ser más cambiante de la superficie terrestre. A nuestro alrededor podemos apreciar los grandes cambios que realiza el género humano, por ejemplo, al construir una carretera se altera el paisaje natural, que era un hecho físico y biológico, entonces se registra el fenómeno humano y una vez terminada aquella, estamos ante un hecho humano.

Otra definición moderna de la Geografía es que es la ciencia que explica la superficie terrestre e investiga la localización, la causalidad, la correlación y la evolución a través del tiempo de los elementos naturales y humanos que en ella existen, así como la influencia que los mismos tienen sobre el hombre.

El conocimiento geográfico se divide en dos grandes ramas:

- a. Geografía física, que es la encargada del estudio de la materia en la superficie terrestre, en cualquiera de sus tres estados físicos, sólido en la litosfera (esfera de piedra), líquido en la hidrosfera (esfera líquida) y gaseosa en la atmósfera (esfera gaseosa).
Otra definición, es que la geografía física estudia la distribución de los principales elementos del medio natural sobre la superficie terrestre, así como determinar sus causas. Esta disciplina estudia todos los elementos del medio natural en forma integral, considerando que éstos se relacionan y actúan entre sí y dan lugar a procesos ambientales. Se subdivide en Geomorfología, Climatología, Hidrología y Biogeografía.
Dentro de esta podemos considerar a la geografía biológica que es la que comprende el estudio de las interrelaciones de plantas y animales, agrupados sobre la superficie terrestre en las regiones fito geográficas (plantas) y zoo geográficos (animales).
- b. Geografía humana, su objeto de estudio es el hombre en sus tres principales aspectos: el de la geografía social, política y económica.

Otra definición es que la geográfica humana estudia la relación e influencia mutua entre las actividades de los seres humanos y su medio geográfico; esta se subdivide en geografía social, geografía económica y geografía política.

La Geografía Física y la Geografía Humana, ambas se subdividen en ramas más específicas conocidas como ciencias auxiliares, tal como se muestra en la tabla 2.1.

Ramas	Sub ramas	Objeto de estudio	Ciencias auxiliares
Geografía Física	Geomorfología Climatología Hidrografía Biogeografía	Formas del relieve Climas y su distribución Cuerpos de agua Distribución de plantas y animales	Geología, Meteorología Oceanografía Biología (CIENCIAS NATURALES)
Geografía Humana	Social Económica Política	Distribución de la Población Relación entre los recursos naturales y el proceso económico Expresiones espaciales de la acción política	Demografía Economía Ciencia política (CIENCIAS NATURALES)

Tabla 2.1. Ramas de la Geografía ²⁸

La geografía por sí sola no puede estudiar por completo la superficie de la tierra, de manera que se auxilia de ciencias que facilitan el conocimiento específico y reciben el nombre de ciencias auxiliares de la geografía. Algunas de ellas están muy ligadas al conocimiento

²⁸ Pineda Carmen Samano, Geografía, (México: Editorial Santillana, 2003), 23.

geográfico, como es el caso de la geología, química, física, matemáticas, biología y antropología, entre otras muchas.

Otras ciencias no colaboran en forma tan directa con la ciencia geográfica, pero no por ello dejen de ser auxiliares valiosos; así se puede afirmar, que los conocimientos científicos constituyen un auxilio importante de la geografía para el estudio de la superficie del planeta.

La labor de esta ciencia es la exploración y el conocimiento de los fenómenos y procesos que han contribuido a configurar de muy diversas formas la superficie terrestre. Identifica e interpreta todas las modificaciones que sufre la Tierra e indaga los procesos naturales y humanos que estas originan.

La metodología que sigue la geografía para estudiar los fenómenos de su interés se basan en lo expuesto por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI)²⁹. La geografía es una ciencia porque su fin es la búsqueda de la verdad y se basa en los PRINCIPIOS fundamentales de: causalidad, localización, temporalidad, generalización, extensión, relación o conexión y manejo de escalas; estos forman parte del método que utiliza la geografía para estudiar sus casos.

La **causalidad** permite conocer los factores que actúan sobre todas y cada una de las partes del sistema, con sus correspondientes consecuencias.

Así la **localización** nos servirá no solo para conocer el lugar ocupado por un elemento en el sistema, sino que nos dice la posición que ocupa en el mismo en relación a los otros elementos y al entorno del sistema.

La **generalización** o comparación nos permite conocer las semejanzas, analogías y diferencias, existentes entre los elementos, características y relaciones del sistema, así como con otros sistemas.

La **distribución** nos lleva a analizar el alcance, extensión o magnitud del elemento y sus características, las probables influencias, las repercusiones en el sistema y su entorno, tanto en los aspectos estructurales como funcionales.

El principio de **actividad o evolución**, nos permite trabajar en los procesos dinámicos, en los cambios y transformaciones, en las variables más significativas que, a lo largo del tiempo han afectado a los diferentes estados del sistema.

²⁹ Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), "Definición, aplicación de la geografía y representaciones de la tierra", Dirección de Capacitación INEGI, www.inegi.gob.mx, (Consultado Junio, 2009).

El principio de **temporalidad**, nos permite trabajar en los procesos dinámicos, en los cambios y transformaciones, en las variables más significativas que, a lo largo del tiempo han afectado a los diferentes estados del sistema.

Para plasmar en papel cualquier hecho o fenómeno geográfico es necesario utilizar la **escala** adecuada de acuerdo con rasgo que se desee representar y el nivel de detalle que requiera.

Por otra parte, estos principios son tenidos en cuenta a la hora de trabajar con sistemas de redes y nodos, de gran importancia actualmente en los planteamientos ambientales y territoriales.

En este sentido el reconocimiento de los flujos, movimientos e intercambios que se producen en un espacio concreto, materializándose en redes de diversas características, con la presencia de nudos o puntos de máxima confluencia de los flujos, con su correspondiente jerarquización, sus áreas de extensión e influencia, y los procesos de difusión y de relaciones con entornos y sistemas, adquieren un papel relevante en los estudios de estructuras territoriales y de los diferentes sistemas espaciales.

El conocimiento de las estructuras territoriales nos permite conocer los asentamientos, los lugares, los sitios singulares, los paisajes, las ciudades, etc., con sus interrelaciones y jerarquías, con sus potencialidades y deficiencias, con su aptitud o vacación para determinadas actividades y sus impactos, su fragilidad, su capacidad para la implantación de diferentes usos, etc., para deducir consecuencias sociales y económicas, para comercializar, y para establecer criterios racionales en la planificación y gestión, que nos permita trabajar con unidades verdaderamente significativas y relevantes, en una perspectiva integrada.

En cuanto a las relaciones conviene tener en cuenta que pueden ser de dos tipos: las que se establecen entre los elementos, que podemos denominar subsecuentes, con flujos de todo tipo; y las que se producen entre las características de cada uno de los elementos, que determinan el papel que desempeña cada uno en el conjunto del sistema, que denominamos consecuentes.

Con todo lo anterior nos incluimos claramente en los enfoques sistémicos, al objeto de superar los trabajos sectoriales y tratar de ofrecer panorámicas integradas del conjunto de las problemáticas ambientales y territoriales.

También diremos que el análisis geográfico ofrece la posibilidad de orientarse según las necesidades de los estudios que se estén realizando.

Un esquema del método geográfico en el cual se aplican los principios geográficos se muestra en la figura 2.1.

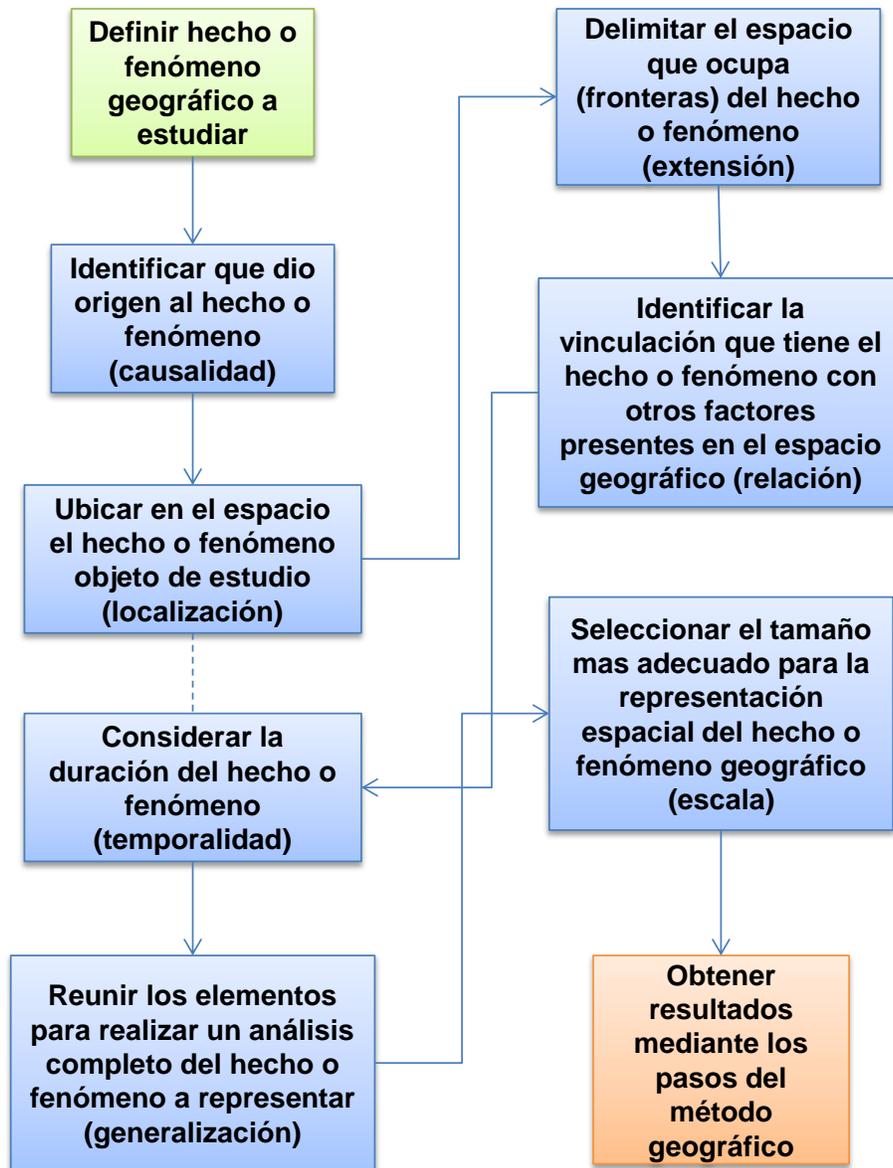


Figura 2.1. Método geográfico.³⁰

En esta investigación el problema de los accidentes de tránsito se estudian utilizando los pasos del método geográfico, para conocer su comportamiento y sus proyecciones se siguen cada uno de los pasos descritos anteriormente.

³⁰ Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), "Definición, aplicación de la geografía y representaciones de la tierra", Dirección de Capacitación INEGI, www.inegi.gob.mx, (Consultado Junio, 2009).

2.1.2. La geografía económica y del transporte.

Dentro de la geografía humana encontramos la geografía económica, que desde el punto de vista de sus nuevas tendencias, es la que trata de proporcionar alguna explicación a la formación de una gran variedad de formas de aglomeración (o de concentración) económica en espacios geográficos. La aglomeración o agrupación (clustering) de la actividad económica tiene lugar a distintos niveles geográficos y tiene una variedad de formas distintas. Tomando un ejemplo, un tipo determinado de aglomeración surge con la agrupación de pequeñas tiendas y restaurantes en un barrio. Otro tipo de aglomeraciones lo encontramos en el proceso de formación de las ciudades, donde todas adquieren tamaños distintos, desde Nueva York hasta Little Rock; en la emergencia de una variedad de distritos industriales; o en la existencia de fuertes desigualdades regionales dentro de un país.

En el otro extremo del espectro se encuentra la estructura centro-periferia de la economía global, correspondiente al dualismo norte-sur. Es asimismo importante señalar que todos estos tipos distintos de aglomeración, a diversos niveles, están a su vez insertos en una economía mayor, formando en su conjunto un complejo sistema.³¹

La geografía económica al intentar establecer y dotarla de una definición y contenidos temáticos específicos ha provocado, a lo largo del tiempo, enconados debates entre las diferentes escuelas geográficas y, por extensión, entre aquellos geógrafos interesados en el estudio espacial de los sistemas y actividades socioeconómicas. Esta situación, paulatinamente se agrava en la medida que es más profunda la tendencia a segmentar la geografía económica en disciplinas autónomas, cuya especialización conlleva a reducir substancialmente la visión de conjunto que el geógrafo e investigador, de manera general, debe tener al observar, interpretar y analizar cualquier sistema u organización territorial.

De hecho la geografía económica cada vez tiende a fragmentarse, lo que ha inducido a que en su seno se desarrollen distintas disciplinas dedicadas a tareas muy concretas, de carácter geográfico, social y económicas, ligadas al estudio de la población (geografía de la población), el espacio rural (geografía rural), la actividad de las industrias (geografía de las industrias), el transporte (geografía del transporte), los servicios (geografía de los servicios) y el comercio (geografía del comercio). Este fraccionamiento dentro de la geografía económica, ha provocado

³¹ Fujita Masahisa y Krugman Paul, "La nueva geografía económica: pasado, presente y futuro", Investigaciones Regionales, número 004, (España, 2004)177-206.

modificaciones en cuanto a objetivos, y un importante movimiento renovador de los contenidos temáticos ahora mucho más atentos a los cambios que ocurren en el escenario internacional (globalización), y que afectan a la organización y localización espacial de la actividad económica y social.³²

Por otra parte la Geografía del Transporte es una sub disciplina de la geografía económica, que le compete el estudio espacial de los transportes, en cuanto a los movimientos de mercancías, personas y de información. Se trata de vincular el análisis de las limitaciones espaciales y atributos con el origen, el destino, el alcance, la naturaleza y el propósito de los movimientos.

Wolkowitsch³³, desde la perspectiva de los sistemas técnicos, define a la geografía del transporte como el conocimiento de los sistemas de transporte que hacen frente a las necesidades de desplazamiento de los hombres y sus mercancías en un espacio dado, sea la ciudad, el estado o el continente, pues como rama de la Geografía Humana se ocupa del estudio de los sistemas de transporte.

Desde estas dos concepciones se puede llegar a afirmar que el principal y máximo objetivo del transporte es superar el espacio que existe entre un origen y un destino para lograr trasladar personas, mercancías y/o información; espacio formado por una variedad de restricciones humanas y físicas tales como la distancia, el tiempo, la topografía y las divisiones administrativas. Conjuntamente estos movimientos generan una fricción, comúnmente, conocida como la fricción de la distancia; sin embargo, estas limitaciones y la fricción que se crea puede tan sólo reducirse parcialmente, en la medida en que ello tiene un costo que varía enormemente según los factores involucrados, tales como la distancia y la naturaleza de lo que es transportado. El análisis de estos factores, enfatiza lo expresado sobre que “no habría ningún transporte sin geografía y no habría geografía sin transporte”.

El objetivo del transporte es por tanto, transformar los atributos geográficos del traslado de mercancías, personas o información a través de una distancia, desde un origen a un destino, de tal forma que les confiera un valor añadido en el proceso. El transporte vive de satisfacer una demanda de movilidad, lo que genera en que éste por sí solo no puede existir; si en los lugares se

³² Segrelles Serrano José Antonio, “Geografía Humana, fundamentos, métodos y conceptos”, *Departamento de Geografía Humana, Universidad de Alicante*, (Enero, 2002): 42-56, <http://www.editorial-club-universitario.es/pdf/457.pdf> , (Consultado Febrero, 2011).

³³ Wolkowitsch Maurice, “Géographie des transports”, *Coll. Cursus*, (1992): 191, http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/noroi_0029-182x_1993_num_158_1_6488_t1_0342_0000_1# , (Consultado Mayo, 2010).

mueven las personas, las mercancías y la información ahí vive el transporte; de lo contrario no tiene finalidad. De esto los planificadores han deducido por años, que el transporte predominantemente es el resultado de una demanda derivada, pues su accionar depende de la demanda de mercancías por transportar y de la necesidad de las personas para moverse.

Rodríguez, Comtois y Slack³⁴, denomina a esa distancia como “distancia logística”; donde se realizan un completo conjunto de tareas, de forma tal que esta pueda ser superada. Cualquier movimiento que se realice, por tanto, debe considerar su configuración geográfica, que a su vez vincula los flujos espaciales y sus patrones de variación. La urbanización, las empresas multinacionales, la globalización del comercio y la división internacional del trabajo, son todas las fuerzas que determinan y toman provecho del transporte a escalas diferentes, pero muy relacionadas. La globalización involucra su propio espacio de flujos, en consecuencia, en la naturaleza, el propósito fundamental del transporte es geográfico, pues facilita los movimientos entre distintas ubicaciones. Por lo tanto, el transporte desempeña un papel en la estructura y organización del espacio y los territorios, que pueden variar según el nivel de desarrollo.

Con el carácter analítico reflexivo se ve que el papel de la geografía del transporte es el de entender las relaciones espaciales que se producen por los sistemas de transporte. El tener una mejor comprensión de las relaciones espaciales es esencial para ayudar a los agentes públicos y privados involucrados en el transporte a mitigar los problemas del transporte. El transporte interesa a los Geógrafos por dos razones principales³⁵. En primer lugar porque la infraestructura de transporte, terminales, equipos y redes ocupan un lugar importante en el espacio y constituyen la base de un sistema espacial complejo. En segundo lugar, desde la geografía se trata de explicar las relaciones espaciales, las redes de transporte que tienen un interés especial porque son los principales soportes de estas interacciones.

No se puede concebir el estudio de los transportes desligándolo de su vital vinculación con el espacio en el que se inscribe y sobre el que actúan en forma simultánea factores sociales y económicos que lo condicionan. Desde 1957, Ullman³⁶ acuñó la idea de la geografía como el estudio de las interacciones espaciales entre áreas con lo que los fenómenos de transporte cobraban una importancia central y donde las regiones, diferenciadas tan solo bajo criterios

³⁴ Rodríguez J. P, Comtois C. and Slack B., *The Geography of Transport System. Transportation and Geography*, (Great Britain: Routledge, 2006), 3.

³⁵ Knowles R., Docherty I. and Shaw J., *Transport Geographies: Mobilities, Flows and Spaces*, (United States of America: Blackwell Publishing, 2008) 4.

³⁶ Ullman Edward L., “American Commodity Flow”, citado por Kenneth Gilbert en *Transport Geography* 2006, cap 4.

económicos, se especializan funcionalmente y esto genera movimientos de mercancías y personas por complementariedad. La participación de los sistemas de transporte en la dinámica social ha sido determinante, pues tanto la infraestructura como las transformaciones de uso de las necesidades han estado supeditadas a los procesos productivos, culturales y territoriales de una red de transporte. De esta forma, se abordan problemas de lugar, de redes, de regiones y transnacionales, en contraste con su escala local, regional y global.

De ahí lo encarado por Potrykowsky y Taylor en 1984³⁷, en el cual el objeto de sus estudios es el transporte tratado como fenómeno y/o proceso en el espacio considerado en su estrecha relación con las condiciones físico y económico geográficas, lo que debe priorizarse como una de las acciones de la geografía y determinarse lo imprescindible de su investigación. Luego se debe incluir en la geografía del transporte no solo los trabajos con análisis teóricos descriptivos, sino también aquellos trabajos que consideran las soluciones espacio-temporales a las problemáticas del transporte, por supuesto, en relación con el medio geográfico; por cuánto viéndolo desde todo punto de vista puede ser considerado como un “todo” en los estudios de transporte, por su condición vital de desplazamiento-movilidad que lo caracteriza.

Ahora, miremos al transporte como “sistema”; el sistema transporte presenta una serie de unidades organizativas que propician los desplazamientos de mercancías y personas de un punto a otro del espacio. Esta movilidad espacial es lo que reconocemos como flujos. Para Henri Lefebvre (1974)³⁸ “un flujo tiene un origen, un terminal y un recorrido” adicionado a que posee una dinámica que incluye fricciones que se identifican en la problemática del transporte a resolver.

Estos son esencialmente los componentes estructurales del sistema de transporte, definidos por los medios, las redes y las infraestructuras, instalaciones. Todos estos contribuyen a conocer el tipo, la dimensión y la dirección de los flujos, expresando la interacción entre espacio y transporte, así como las relaciones equilibradas y desequilibradas que se establecen, que serán diferentes en su composición según el espacio geográfico y socioeconómico territorial en que se desarrollen. De ahí que las ciudades son lugares con un alto nivel de acumulación y concentración de las actividades económicas que en su interrelación generan gran parte de los problemas que se suceden en ellas, lo que las hace ser estructuras espaciales complejas. Los

³⁷ Potrykowsky M. y Taylor, Z., *Geografía del Transporte*, (Barcelona: Editorial Ariel, 1984)12 - 30.

³⁸ Lefevre, “La producción del espacio”, <http://www.notbored.org/space.html>, (Consultado Mayo, 2010).

problemas de transporte más importantes suelen estar relacionados principalmente con las zonas urbanas y tienen lugar cuando los sistemas de transporte, por diversas razones, no pueden satisfacer las numerosas exigencias de la movilidad especialmente urbana.

Los problemas del transporte generan desigualdades en las zonas, pues la condición diferencial del acceso a determinadas infraestructuras o a medios de transporte en función de la posición geográfica, lo social, lo demográfico y de ambientes operacionales del tráfico, permite identificar desigualdades de acceso a la movilidad normativa y a las oportunidades que se le asocian (Wenglesky 2002³⁹; Berger 2004⁴⁰; Orfeuill 2005⁴¹). Esto genera que la disposición de los servicios en el territorio no sea homogénea pues se privilegian ciertos espacios y se penalizan otros.

En lo referente a la cobertura territorial de los medios de transporte de uso colectivo, esta no es igual en todo el territorio, pues sólo cubren algunas partes de este, en especial las que ofrecen aceptables condiciones topográficas y de demanda. Así, la mayor cobertura se da en las áreas más céntricas, mientras que en las periferias es deficiente e ineficiente y en varias ocasiones el transporte privado es el medio más utilizado (Newman and Kenworthy 1999⁴²). Muchas dimensiones del problema del transporte están vinculadas con el predominio y el crecimiento del automóvil privado. La lista siguiente resume los problemas de mayor incidencia de la interacción geográfica del transporte.

Problemas de la interacción geográfica del transporte

1. LA CAPACIDAD

Congestión de Tránsito. Uno de los problemas más frecuente en las grandes aglomeraciones urbanas.

³⁹ Wenglesky S, "S. Parcours effectif à l'emploi versus accès potentiel à l'emploi: une mesure des contraintes des actifs dans la métropole parisienne", Colloque annuel de l'ASRDLF, Trois-Rivières, Canada, http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/54/22/36/PDF/2003_dest_aquilera_structures_des_localisations_intraurbaines_et_mobilite_domicile_travail.pdf, (Consultado Mayo, 2010).

⁴⁰ Berger M. Les périurbains de Paris. De la ville dense à l métropole éclatée? CNRS Éditions, Paris, citado por Módenes J. Antonio en *Movilidad espacial: Uso temporal del territorio y poblaciones vinculadas*, <http://www.ced.uab.es/publicacions/PapersPDF/Text311.pdf>, (Centro de Estudios Democráticos, 2007), 2.

⁴¹ Orfeuill J.P., "La mobilité nécessaire, quelles réponses en France et à l'étranger?", (conferencia impartida en el seminario Mobilités pour l'insertion, Saint Nazaire, 6-7 octobre 2005 http://www.ville-enmouvement.com/plateforme_insertion/telechargement/Conference_JPO.pdf, (Consultado Mayo, 2010).

⁴² Newman, P. and J.R. Kenworthy, *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*, (United States of America: Island Press), 27-62, (Consultado Agosto, 2010).

Insuficiencia del transporte público. Parte de los Sistemas de transporte público, son utilizados a su máxima capacidad o subutilizados.

Las dificultades para los peatones y la pérdida del espacio público para peatones y otros usuarios.

2. LA TRANSFERENCIA.

Los impactos ambientales y el consumo de energía.

Los accidentes y la inseguridad vial.

3. LA INTEGRACIÓN

Usos del suelo

Distribución de la Demanda.

Como una rama de la geografía del transporte tenemos **la geografía de la accidentabilidad**, la cual pretende que los análisis de la interacción, variación geográfica espacio-temporal de los accidentes represente una de las temáticas de mayor investigación en la ingeniería de tránsito y transporte y de la geografía física y humana. Whitelegg (1987)⁴³ quien la denomina como **la geografía de la accidentalidad en las vías**, intenta comprender los accidentes de tráfico con referencia a una escala de análisis y establece la importancia de centrarse en esta para dar una respuesta a la reducción de los accidentes. Describe los fuertes vínculos del análisis de los accidentes de tráfico y los ámbitos geográficos, que permite reconocer y evaluar sitios, áreas y corredores inseguros y de alto riesgo, frecuencia de ocurrencias según tipo de accidente (atropellos, choques y otros), procesos de georeferenciación y establecer patrones tipo que incluyen también indicadores de accidentes según densidad de población, áreas, según densidad de red vial, además de estudiar el movimiento de los elementos que intervienen e interactúan, la distribución de los accidentes con respecto a la organización espacial, a los usos del suelo y sus mezclas, a las condiciones socioeconómicas y muchas otras interrelaciones espaciales. El movimiento de los usuarios, sea de ciclistas, peatones o conductores estará en función del uso del suelo del sistema, de los patrones residenciales, de las densidades de población, de la geometría de las calles, de la ubicación del lugar de trabajo, del centro de salud o recinto, de los centros de comercio, etc.

⁴³ Whitelegg J., "A Geography of Road Traffic Accidents", Department of Geography, Transactions of the Institute of British Geographers, New Series, Vol. 12, No. 2, (2010) 161-176.

Son numerosos los temas que depara el futuro de las investigaciones de accidentes están dados en el ámbito geográfico y es el inicio de la comprensión del análisis espacial de los accidentes; es allí donde radica la importancia estadística de tener “datos” precisos y confiables, que son los que al comienzo proporcionan las entidades en sus bases de datos de acuerdo con lo que le permite su logística y conocimiento sobre el tema, para luego en el proceso de investigación convertirlos en “información”, con un alto contenido de análisis y posteriormente volverlos “información inteligente” que además de contener un alto grado de análisis posee un alto grado de aplicabilidad con un valioso poder para solucionar problemas en los sistemas de planeación y operación del transporte.⁴⁴

2.2. Concepto de accidente de tránsito.

Desde un **enfoque sistemático** un accidente de tránsito se define como:

Una colisión en las vías de tránsito, resultado de una combinación de factores relacionados con los componentes del sistema vial, que incluyen las calles y caminos, el entorno vial, los vehículos y los usuarios de la vía pública, y la manera en que interactúan. Algunos factores contribuyen a las colisiones y, por lo tanto, son parte de la causalidad de estas. Otros factores agravan los efectos de la colisión y de esa forma influyen en la gravedad de las lesiones resultantes. Otros no parecerían estar directamente relacionados con los traumatismos causados por el tránsito. Algunas causas son inmediatas, pero en algunos casos pueden deberse a razones estructurales de mediano y largo plazo. La identificación de los factores de riesgo que contribuyen a las colisiones en la vía pública es importante para reconocer las intervenciones que pueden reducir los riesgos asociados con esos factores.⁴⁵

Las lesiones de tránsito son una de las principales causas de deterioros en la salud, no exclusivamente en los países desarrollados sino también en los países en vías de desarrollo, como es el caso de los países de América Latina, Asia y África. Situación debida en parte a factores sociales, económicos y culturales de estas regiones como son el crecimiento demográfico, la urbanización, la industrialización de las ciudades y el aumento en el número de vehículos de

⁴⁴ Cerquera Escobar Ángela, La configuración espacial geográfica, contexto esencial de estudio del transporte y la accidentalidad, Revista Geográfica de América Central, número especial Egal (Junio 2011): 1-24.

⁴⁵ Organización Mundial De La Salud (OMS), *Factores de riesgo de las colisiones, Prevención de Lesiones Causadas por el Tránsito*, Manual de Capacitación, (Suiza, 2009): 22.

motor, aunados a lentos o nulos procesos de legislación en materia de tránsito, educación vial de conductores y peatones, seguridad de vehículos y caminos, así como el mantenimiento de los mismos.⁴⁶

2.3. Perspectivas de estudio de los accidentes de tránsito.

Pueden utilizarse diversos marcos analíticos para identificar los factores de riesgo que intervienen en los accidentes de tránsito así como de su estudio. Se presentan en esta sección tres marcos o enfoques desde los cuales tratan de comprenderlos para posteriormente desarrollar acciones para reducirlos, estos son: el enfoque de salud pública, la matriz de Haddon y el enfoque sistémico.⁴⁷

Enfoque de salud pública

El enfoque de salud pública es un marco analítico genérico que puede aplicarse a diferentes campos de la salud pública para responder a una gama amplia de problemas de salud y enfermedades, incluidas las lesiones y la violencia. Este enfoque no solo resulta de utilidad en el análisis de los factores de riesgo, sino que también proporciona un marco que orienta la toma de decisiones a lo largo de todo el proceso, desde la identificación de un problema hasta la puesta en práctica de una intervención. El análisis de los factores de riesgo es uno de los componentes de este enfoque.

El enfoque de salud pública comprende cuatro pasos interrelacionados (figura 2.2):

- El primer paso consiste en determinar la magnitud, el alcance y las características del problema. La definición del problema va más allá del simple cómputo de casos: incluye describir a grandes rasgos la mortalidad y la morbilidad y el comportamiento imprudente. En el caso de los traumatismos causados por el tránsito, en este paso corresponde obtener información sobre las particularidades demográficas de las personas implicadas, y determinar las características temporales y geográficas del incidente, las circunstancias en que ocurrió, y la gravedad y el costo de las lesiones. Los métodos de investigación cuantitativa (por ejemplo, las encuestas) y

⁴⁶ Departamento de Salud Pública, "Accidentes de tránsito por vehículo de motor", <http://www.facmed.unam.mx/deptos/salud/portadas/accidtrans/index.html>, (Consultado Octubre, 2010).

⁴⁷ Organización Mundial de la Salud (OMS), Informe mundial sobre prevención de los traumatismos causados por el tránsito: resumen, (Ginebra, 2004): 5 -9.

cualitativa (por ejemplo, las discusiones grupales) tomados de las ciencias sociales y del comportamiento se están empleando cada vez más para identificar y caracterizar los problemas.

- El segundo paso es identificar los factores que aumentan el riesgo de enfermedades, lesiones o discapacidad, y determinar cuáles son potencialmente modificables. Mientras que en el primer paso se busca responder a las preguntas “quién, cuándo, dónde, qué y cómo”, el segundo se centra en la pregunta “por qué”. Esta etapa también puede ayudar a definir las poblaciones de alto riesgo en cuanto a las lesiones y la violencia, y para sugerir intervenciones específicas.

- El tercer paso es determinar las medidas que pueden adoptarse para prevenir el problema, utilizando para ello la información referida a las causas y los factores de riesgo para el diseño, la realización de pruebas piloto, y la evaluación final de las intervenciones. Este paso apunta a desarrollar intervenciones basadas en la información obtenida en los pasos anteriores, y ponerlas a prueba, comparando sus resultados con los de otras aplicadas previamente. Los métodos de prueba incluyen ensayos controlados aleatorios, comparaciones controladas entre poblaciones sobre frecuencia de resultados de salud, análisis de series temporales de tendencias en distintas áreas, y estudios observacionales como los de casos y controles. Un componente fundamental de este paso es documentar los procesos que contribuyen al éxito o al fracaso de una intervención, además de examinar las consecuencias de las intervenciones sobre los resultados de salud.

- El paso final es la ejecución de intervenciones que han demostrado ser eficaces a gran escala o que tienen muchas probabilidades de serlo. En ambos casos es importante reunir datos que permitan evaluar la efectividad del programa para reducir las lesiones y defunciones causadas por el tránsito, en especial porque una intervención que ha demostrado ser eficaz en un ensayo clínico o en un estudio pequeño, puede tener un desempeño diferente en el ámbito comunitario o cuando se aplica en poblaciones más numerosas o en zonas geográficas más extensas. Otro componente importante es la determinación de la rentabilidad de tales programas. Evaluar los costos de un programa en relación con los casos evitados gracias a su aplicación, puede ayudar a quienes toman las decisiones a determinar las prácticas de salud pública más beneficiosas. La ejecución de las intervenciones también incluye otros componentes, como la comunicación para la salud, la formación de asociaciones y alianzas, y el diseño de metodologías para la planificación de programas comunitarios.

Aunque cada uno de los cuatro pasos se presenta por separado, es importante recordar que en la realidad, al ejecutarlos, algunos pasos pueden superponerse en el tiempo.⁴⁸



Figura 2.2. Enfoque de salud pública.⁴⁹

Este enfoque es el que normalmente se utiliza en los modelos de tipo estático o tradicionales, en donde los elementos que intervienen durante la generación del accidente son estáticos y la reducción de estos se hace de forma correctiva y no preventiva.

Matriz de Haddon.

William Haddon⁵⁰ creó una matriz que identifica los factores de riesgo antes del choque, durante el choque y después del choque, en relación con la persona, el vehículo y el ambiente (Figura 2.3). Haddon describió el transporte por carretera como un sistema “hombre-máquina” mal concebido que requería un tratamiento sistémico integral. Cada fase de la secuencia temporal de un choque —la fase previa, el choque, y la fase posterior— puede analizarse sistemáticamente en relación con tres componentes: el factor humano, el vehículo y el ambiente. La matriz de

⁴⁸ Paul A. Longley and Michael Batty, *Advanced Spatial Analysis: The CASA Book of GIS*, (New York: Centre for Advanced Spatial Analysis, 2013): 61-80.

⁴⁹Organización Mundial De La Salud (OMS), *Factores de riesgo de las colisiones, Prevención de Lesiones Causadas por el Tránsito*, Manual de Capacitación, (Suiza, 2009): 23.

⁵⁰Haddon JR W., *Advances in the epidemiology of injuries as a basis for public policy*, Public Health Report 1980, (Ginebra 1980):411-421.

Haddon es una herramienta analítica que ayuda a identificar todos los factores asociados con un choque. Una vez que se identifican y analizan los diversos factores, se pueden adoptar y priorizar contramedidas adecuadas para aplicarlas tanto en el corto como en el largo plazo. En la fase previa al choque es necesario adoptar todas las contramedidas posibles para evitar que se produzcan choques. La fase del choque está asociada con contramedidas para evitar que alguien resulte herido o para disminuir la gravedad de las lesiones. Por último, la fase posterior al choque incluye todas las actividades que reducen las consecuencias adversas del choque una vez que éste ha ocurrido.

FASE		FACTORES		
		HUMANO	DEL VEHÍCULO Y EL EQUIPO	DEL ENTORNO
Antes del choque	Prevención de los choques	Información Actitudes Disminución de las facultades Aplicación de la ley	Condiciones mecánicas Luces Frenos Dirección Control de la velocidad	Diseño y trazado del camino Límites de velocidad Elementos de seguridad peatonal
Choque	Prevención de traumatismos durante el choque	Uso de dispositivos de protección Disminución de las facultades	Cinturones de seguridad Otros dispositivos de seguridad Diseño vehicular antichoques	Elementos protectores a los lados del camino
Después del choque	Preservación de la vida	Nociones de primeros auxilios Acceso a la atención médica	Facilidad de acceso Riesgo de incendio	Equipamiento de socorro Congestión

Figura 2.3. Matriz de Haddon.⁵¹

Enfoque sistémico.

Por lo habitual, los análisis de riesgo han estudiado en forma separada al usuario de la vía pública, el vehículo y el entorno vial. Es más, los investigadores y los profesionales tienden a considerar un solo factor, o unos pocos, cuando en realidad deberían analizar múltiples factores. Enriquecido por las apreciaciones de Haddon, el enfoque sistémico (que toma en cuenta las interacciones entre los distintos componentes) procura identificar y remediar las principales fuentes de error o deficiencias del trazado vial que contribuyen a las colisiones causantes de muertes o lesiones graves, así como a mitigar la gravedad y las consecuencias de los traumatismos. La particularidad de este enfoque es que no solo toma en cuenta los factores

⁵¹ Organización Mundial de la Salud (OMS), Informe mundial sobre prevención de los traumatismos causados por el tránsito: resumen, (Ginebra, 2004): 6.

básicos sino también el papel que desempeñan los distintos organismos y actores en materia de prevención. Los traumatismos causados por el tránsito constituyen un problema multidimensional que requiere un enfoque integral de los factores determinantes, las consecuencias y las soluciones. Todos los sistemas de tránsito son altamente complejos y entrañan riesgos para la salud humana. Los elementos de estos sistemas son los vehículos motorizados, la vía pública y sus usuarios, así como su entorno físico, social y económico. Para que un sistema de tránsito sea menos peligroso es necesario adoptar un enfoque sistémico, esto es, entender el sistema en su conjunto y en la interacción de sus componentes, e identificar las posibilidades de intervención. En particular, es necesario reconocer que el cuerpo humano es muy vulnerable a los traumatismos y que las personas cometen errores. Un sistema de tránsito seguro tiene en cuenta la vulnerabilidad y la falibilidad humana, y las compensa. Cada choque y sus consecuencias pueden representarse como un sistema de factores entrelazados (figura 2.4). La interacción entre los componentes del sistema vial y de transporte permite vincular los factores relacionados con el choque y los traumatismos. Por ejemplo, algunas características del sistema vial o del vehículo pueden haber influido en determinados aspectos del comportamiento de los usuarios de la vía pública, y los efectos de algunas fallas del vehículo quizás hayan sido potenciados por determinadas características del sistema vial. Para planificar medidas destinadas a evitar los choques vehiculares resulta fundamental comprender la totalidad del complejo proceso causal, ya que suministra información indispensable y suele brindar un amplio panorama de las áreas donde podrán aplicarse las medidas preventivas. Todos los aspectos del sistema de transporte y los sistemas relacionados ofrecen oportunidades para la aplicación de intervenciones dirigidas a reducir el riesgo de lesiones y defunciones causadas por el tránsito. El mensaje clave que puede extraerse de la figura 2.4, es que una colisión en las vías de tránsito es el resultado de la interacción entre diversos factores y subsistemas.

Si las colisiones se reducen a una “causa”, es obvio que los componentes del sistema —los factores humanos, de la infraestructura y del vehículo— se consideran necesariamente independientes. En consecuencia, las medidas que afectan a cualquier componente específico pueden aplicarse separadamente, lo que facilita las cosas puesto que los responsables de adoptar las decisiones en cada área de intervención no tienen en este caso que coordinar sus acciones con los demás. Pero las oportunidades de influir en forma indirecta sobre algún factor (por ejemplo, mejorar el comportamiento de los conductores mediante cambios en el trazado de los caminos) se

perderían por completo. Para pasar de un modelo simplificado de acciones de seguridad vial a un enfoque sistémico se necesita realizar un gran esfuerzo orientado a adquirir conocimientos sobre la naturaleza de los choques vehiculares. No obstante, este esfuerzo se verá recompensado por la gran variedad de oportunidades que se abrirán para las acciones preventivas y por un diseño de medidas más apropiado. La adquisición de conocimientos suficientes acerca de los factores que generan riesgos en el sistema vial y de transporte supone el análisis de la cadena de acontecimientos que dieron lugar a colisiones y traumatismos. Puesto que los factores que aumentan el riesgo de colisiones se relacionan tanto con el comportamiento humano como con los componentes físicos y técnicos del sistema vial y de transporte, el análisis detallado de los choques puede requerir un abordaje multidisciplinario.

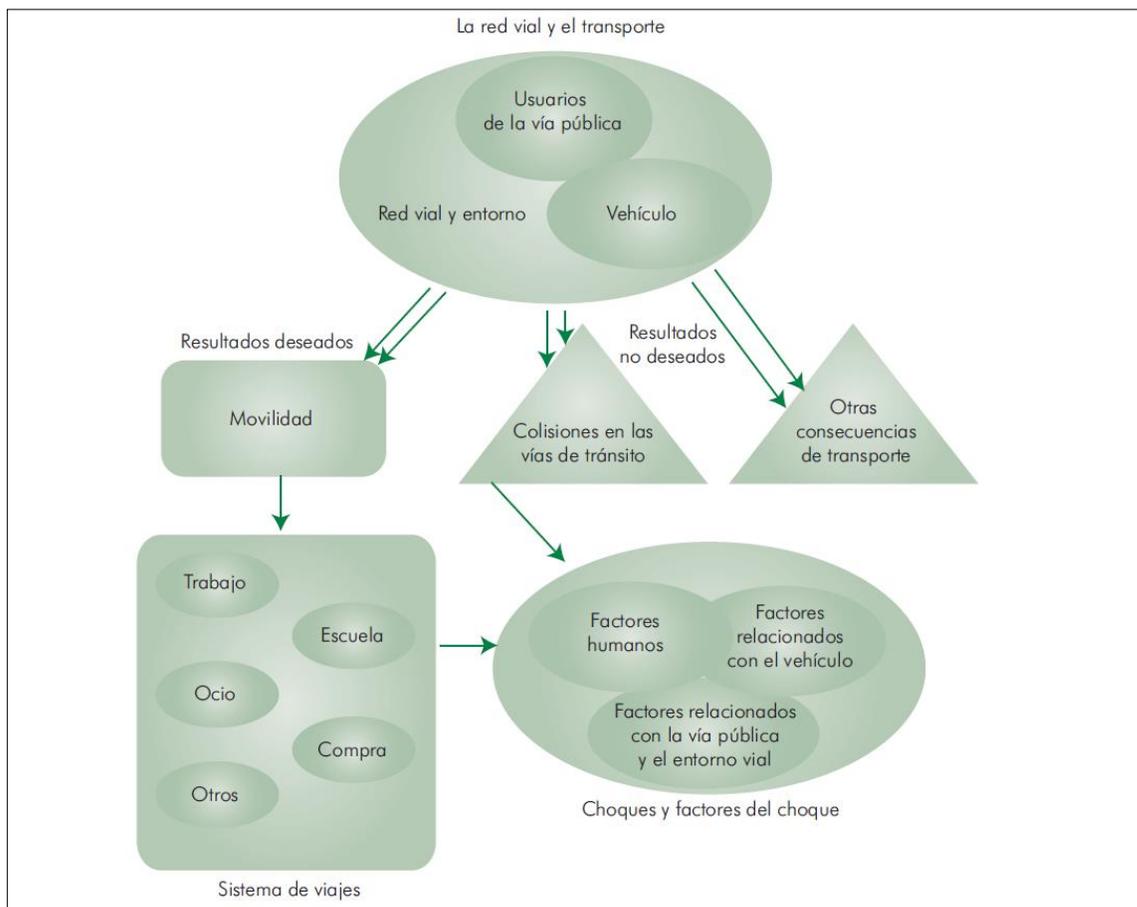


Figura 2.4. Enfoque sistémico.⁵²

⁵² Organización Mundial De La Salud (OMS), *Factores de riesgo de las colisiones, Prevención de Lesiones Causadas por el Tránsito*, Manual de Capacitación, (Suiza, 2009): 26.

El enfoque que se consideró en el diseño del modelo fue el sistémico, en donde se considera la generación de los accidentes como una combinación compleja de factores interactuando al mismo tiempo; este enfoque es la justificación que soporta el desarrollo de modelos dinámicos, tema central de este trabajo, al mostrarnos que dada la complejidad de estos, no es posible poderlos entender y predecir con la ayuda de modelos tradicionales estáticos.

El enfoque sistémico es el que consideramos aceptable y es la perspectiva que se utilizó en el diseño e interpretación del modelo.

2.4. Situación en América Latina.

El objetivo de esta revisión en torno a las estadísticas y situaciones que guardan los accidentes de tránsito en América Latina y México, es conocer más a fondo las variables y situaciones que los originan y que debemos de incluir en nuestro modelo dinámico.

Para tener una visión, con respecto a la situación de los accidentes de tránsito en América Latina y en México, consultamos el informe publicado por la Organización Mundial de la Salud en el 2008 sobre la situación en la Región de las Américas de la Seguridad Vial,⁵³ con el objeto de evaluar qué tanto los países miembros han implementado las recomendaciones del informe, sobre prevención de los traumatismos causados por el tránsito. La información obtenida para este documento fue recolectada a través de un cuestionario conteniendo datos sobre mortalidad, morbilidad, factores de riesgo como velocidad y alcohol, los factores protectores como el uso de cascos, cinturón de seguridad y sillas porta-infantes y los planes y políticas de seguridad vial en diferentes naciones.

En esta sección estamos incluyendo la información que consideramos más relevante sobre este reporte que nos da una visión de la situación real sobre la seguridad vial en el continente Americano, así como conocer las principales variables que los originan.

El cuestionario fue aplicado a representantes de los sectores: salud, transporte, justicia, educación y organizaciones no gubernamentales.

⁵³ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009):13-47.

Esta publicación presenta resultados de 30 países de la Región de las Américas, un miembro asociado (Puerto Rico) y un país invitado (Islas Vírgenes Británicas) que para efecto del análisis han sido considerados 32 países, lo que representa el 99% de la población de la Región.

Los traumatismos causados por el tránsito son una de las primeras causas de mortalidad en la región, sobre todo en el grupo de 5 a 44 años, responsable anualmente de 142,252 muertes y un número estimado de lesionados de más de 5 millones.

Se calculó en la región una tasa ajustada de mortalidad de 15.8 por cada 100,000 habitantes, pero hay una gran diferencia entre los países, con variaciones que van de 4.3 hasta 21.8 por 100,000 habitantes. Hay 11 países que tienen una tasa mayor que el promedio de la Región. En los países de América del Norte las tasas han bajado de forma significativa en los últimos 30 años; en América del Sur apenas un país presenta disminución de la tasa de mortalidad en los últimos 10 años y otros dos países del Caribe reportan tendencias similares en períodos más recientes.

Según el informe que acaba de publicar la Organización Panamericana de la Salud (OPS), solo un puñado de países de América Latina y el Caribe han logrado reducir la tasa de mortalidad por accidentes de tránsito en la última década. Mientras que en Estados Unidos y Canadá la cantidad de defunciones por tránsito vehicular ha estado en constante baja en los últimos 30 años.

Como se puede observar en la tabla 2.2, las muertes relacionadas al tránsito vehicular en la región ocupan los primeros lugares de defunción prácticamente en todos los grupos de edad, pero principalmente entre los de 5 a 44 años. En 2004, este problema de salud pública se constituye como la novena causa de mortalidad general en la región. En las Américas y el Caribe, cada año fallecieron alrededor de 130,000 personas, más de 1.2 millones sufrieron traumatismos, y cientos de miles resultan discapacitadas como consecuencia de colisiones, choques, volcaduras o atropellamientos en las vías de tránsito. En 2002, la tasa media de mortalidad por lesiones en el tránsito fue de 16 por 100,000 habitantes, oscilando desde 6.8 por 100,000 en Bolivia a 24.0 por 100,000 en Guatemala.

Datos de varios países sobre la distribución de las muertes según usuarios de las vías, muestran la vulnerabilidad de los peatones en América Latina y el Caribe, mientras que el problema en Canadá y los Estados Unidos gira, en gran parte, en torno a los ocupantes de los vehículos. De conformidad con las tendencias mundiales, las colisiones en el tránsito afectan desproporcionadamente más a los hombres que a las mujeres en toda América y el Caribe: en el

último decenio, entre 75% y 80% de las defunciones correspondieron a hombres, y entre 20% a 25% a mujeres. Según grupos de edad en 2002, las personas de 15 a 29 años representaron 32% de la carga de la mortalidad vial, seguidos de los adultos de 30 a 44 años de edad, con un 25%.

En la tabla 2.2 se muestran las principales causas de muerte en la región de las Américas.

NO.	0-4 AÑOS	5-14	15-29	30-44	45-69	70+	TODAS
1	Causas perinatales	Lesiones causadas por el tránsito vial	Violencia	Violencia	Cardiopatía isquémica	Cardiopatía isquémica	Cardiopatía isquémica
2	Enfermedades diarreicas	Leucemia	Lesiones causadas por el tránsito vial	Lesiones causadas por el tránsito vial	Enfermedad cerebrovascular	Enfermedad cerebrovascular	Enfermedad cerebrovascular
3	Infecciones respiratorias bajas	Ahogamiento	Lesiones autoinfligidas	VIH/SIDA	Cáncer de pulmón, tráquea y bronquios	Enfermedad pulmonar obstructiva crónica	Diabetes mellitus
4	Malformaciones congénitas	Infecciones respiratorias bajas	VIH/SIDA	Cardiopatía isquémica	Diabetes mellitus	Infecciones respiratorias bajas	Infecciones respiratorias bajas
5	Desnutrición energética proteica	Violencia	Ahogamientos	Lesiones autoinfligidas	Cirrosis hepática	Alzheimer y otras demencias	Cáncer de pulmón, tráquea y bronquios
6	Meningitis	Malformaciones congénitas	Tuberculosis	Cirrosis hepática	Enfermedad pulmonar obstructiva crónica	Diabetes mellitus	Enfermedad pulmonar obstructiva crónica
7	Trastornos endócrinos	Dengue	Infecciones respiratorias bajas	Enfermedad cerebrovascular	Cáncer de mama	Cáncer de pulmón, tráquea y bronquios	Violencia
8	Tos ferina (Whooping cough)	Trastornos endócrinos	Leucemia	Envenenamiento	Cardiopatía hipertensiva	Cardiopatía hipertensiva	Alzheimer y otras demencias
9	Lesiones causadas por el tránsito vial	Meningitis	Envenenamiento	Cáncer de mama	Lesiones causadas por el tránsito vial	Nefritis y nefrosis	Lesiones causadas por el tránsito vial
10	VIH/SIDA	Lesiones autoinfligidas	Guerra y conflictos armados	Diabetes mellitus	Cáncer de colon y recto	Cáncer de próstata	Cardiopatía hipertensiva
11	Ahogamiento	Linfomas, mieloma múltiple	Enfermedad cerebrovascular	Infecciones respiratorias bajas	Infecciones respiratorias bajas	Cáncer de colon y recto	Causas perinatales
12	Anemia por deficiencia de hierro	Malaria	Trastornos endócrinos	Tuberculosis	Cáncer gástrico	Cáncer de mama	Nefritis y nefrosis
13	Violencia	Nefritis y nefrosis	Nefritis y nefrosis	Trastornos en el uso de alcohol	Nefritis y nefrosis	Cáncer gástrico	Cirrosis hepática
14	Enfermedades inflamatorias cardíacas	Desnutrición energética proteica	Enfermedad isquémica cardíaca	Cáncer de pulmón, tráquea y bronquios	Linfomas, mieloma múltiple	Enfermedades cardíacas inflamatorias	Cáncer de colon y recto
15	Nefritis y nefrosis	Quemaduras (Fires)	Malformaciones congénitas	Nefritis y nefrosis	Violencia	Linfomas, mieloma múltiple	Cáncer de mama
16	Malaria	Enfermedad cerebrovascular	Linfomas, mieloma múltiple	Cardiopatía hipertensiva	Cáncer de páncreas	Trastornos endócrinos	Cáncer de próstata
17	Infecciones respiratorias altas	Anemia por deficiencia de hierro	Trastornos hipertensivos*	Trastornos endócrinos	Lesiones autoinfligidas	Cáncer de páncreas	Cáncer gástrico
18	Leucemia	VIH/SIDA	Caldas	Enfermedades cardíacas inflamatorias	Enfermedades cardíacas inflamatorias	Cirrosis hepática	VIH/SIDA

Tabla 2.2. Principales causas de muerte en la región de las Américas.⁵⁴

Lo anterior se ha vinculado a un crecimiento urbano que no se ha acompañado de una adecuada planificación y provisión de transporte público accesible, sino que por el contrario promueve la utilización de transporte individual —automóviles— por parte de un grupo

⁵⁴ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 2.

privilegiado que comparte los mismos espacios con grupos que se desplazan a pie, en bicicletas, en la parte trasera de camionetas y, de forma cada vez más frecuente en las Américas y el Caribe, en motocicletas. La convivencia de estos distintos modos de transporte, sin una infraestructura vial que garantice seguridad, genera choques, colisiones, atropellamientos y, en consecuencia, muertos, heridos y discapacitados. Los más afectados son, generalmente, los más vulnerables (peatones, motociclistas y ciclistas) y, en la mayoría de las veces, los más pobres. Estas víctimas, con mayor frecuencia hombres y jóvenes, tienen más dificultad de acceso a la atención de los servicios de salud cuando resultan lesionados y, por lo tanto, menos probabilidad de recuperación y de retornar al trabajo o la escuela.

Sólo ocho países informaron estar invirtiendo en seguridad vial, observándose dentro de éstos marcadas diferencias en términos de gasto per-cápita, donde Costa Rica es el país que más invierte en seguridad vial (US\$7.38 por habitante), seguido por Estados Unidos (US\$2.74 por habitante).

2.4.1. Estado actual de los traumatismos causados por el tránsito en la región de las Américas.

El 39% de las personas que fallecen en la región por lesiones causadas por el tránsito son usuarios vulnerables (peatones, ciclistas o motociclistas), mientras que el 47% son ocupantes de vehículos automotores. Al evaluar los datos por subregión se observan diferencias significativas. En las subregiones Andina y la del Cono Sur persiste una alta incidencia de muertes entre usuarios vulnerables (53% y 50%, respectivamente), mientras que en América del Norte es del 23%. En cuanto a los peatones fallecidos, el promedio regional es 23%, pero para la subregión Andina representa el 43%; en América del Norte el 12% de los muertos son peatones. En cuanto a las muertes del grupo de ocupantes de vehículos automotores la subregión de América del Norte presenta el porcentaje más alto (74%) mientras que en el Cono Sur son el 20%.

Tan sólo el proyecto de la Carga Mundial de la Enfermedad de la OMS, actualizado en el 2004, ha calculado —mediante el uso de registros vitales— un aproximado de 152,000 muertes anuales. Esto representa cerca del 12% del total de defunciones por el tránsito vehicular en el mundo.

Mortalidad

Existen aún algunos problemas en términos de registro de la mortalidad, que impiden conocer a ciencia cierta la magnitud del problema y que limitan la comparabilidad de los datos al interior de la región. Tan solo una tercera parte de los países siguen actualmente la recomendación de la OMS, de definir la muerte como aquella que ocurre en los primeros 30 días posteriores al evento (Figura 2.5). Por otro lado, existen grandes diferencias en la calidad y cobertura de la información, que se traducen principalmente en problemas de sub registro. Durante su elaboración, el informe sobre la situación mundial de la seguridad vial, buscó ajustar estas diferencias con el objetivo de hacer comparables las estadísticas de mortalidad al interior de la región. De esta manera, se sumaron en la encuesta un total de 131,942 muertes por año en la Región. Sin embargo, cuando se ajustaron estas cifras, el número de personas fallecidas ascendió a un total de 142,252, cifra 7.8% mayor a la informada originalmente por los países. Poco más del 32% de los fallecimientos corresponden a la subregión de América del Norte, 31% al Cono Sur y 20% a Mesoamérica (Figura 2.6). No obstante, es importante observar que la cifra total es 6.4% menor que lo calculado por la Organización Mundial de la Salud en el proyecto de la Carga Mundial de la Enfermedad del 2004. La Figura 2.7, muestra a los países aplicando la tasa cruda de mortalidad y su distribución regional. La Figura 2.8, muestra la tasa de mortalidad una vez hecho el ajuste. En algunos países, se puede observar variaciones entre lo que informan y lo que se calcula. Un ejemplo es Guyana, una vez que se ajusta la tasa, representa una disminución del 29%. Otros países que posterior al ajuste destacan por su alta tasa de mortalidad son Perú, Paraguay y República Dominicana. Las mayores variaciones con el ajuste las presentaron Guatemala, con un incremento de 239% y Perú, cuya tasa aumentó en un 71%. En sentido opuesto, las tasas de mortalidad de Uruguay y El Salvador fueron las que más disminuyeron: 66% y 42% respectivamente. Es importante considerar las limitaciones de interpretación de las tasas en los países con pocos habitantes y un reducido número de muertes, como las Islas Vírgenes Británicas, donde puede haber fluctuaciones importantes en las tasas de mortalidad de un año a otro. La figura 2.9 muestra el análisis por subregiones de la tasa ajustada de mortalidad. Se calculó en la región una tasa de mortalidad de 15.8 por 100,000 habitantes, lo que es ligeramente mayor a la tasa indicada inicialmente por los países (14.6 por 100,000 habitantes). En la figura 2.9 se diferencian claramente los países que tuvieron cifras menores y los que presentaron mayor tasa de mortalidad que la registrada en la región.

Más del 39% de las personas que fallecen en la región son usuarios viales vulnerables (peatones, ciclistas o motociclistas). Mientras que en la Región de América del Norte los ocupantes de vehículo de motor representan el 74% de los que fallecen, en el Cono Sur son tan solo 20% (figura 2.10). Por su parte, los peatones son el grupo más afectado en el área Andina con 43% del total de fallecidos. Un grupo de datos a destacar sobre la Región desde la perspectiva de género es, que poco más del 76% de las personas que fallecen por lesiones causadas por el tránsito son hombres, con variaciones al interior de las subregiones: de 69% en América del Norte a 81.1% en el Caribe Latino, como lo muestra la figura 2.11. La metodología aplicada en este Informe no permitió hacer el análisis de todos los factores de riesgo desde esta perspectiva.

Lesiones de tránsito no fatales.

En América 5, 054,980 personas sufrieron lesiones no fatales para el año 2006/2007 lo que equivale a 35.5 lesionados por cada fallecido, eso sin olvidar que son una importante causa de discapacidad.

El problema de las lesiones causadas por el tránsito no se conforma únicamente por el alto número de personas que fallecen por esta causa. La OMS calculó, en el informe mundial sobre prevención de los traumatismos causados por el tránsito, del 2004, que por cada persona que muere por el tránsito en el mundo, al menos 15 individuos son hospitalizados y 70 atendidos en las salas de urgencias. Sin embargo, lo estudiado en esta encuesta hace suponer grandes problemas en los sistemas de información en materia de sub registro de lesiones no fatales. Como lo muestra la figura 2.12, tan sólo cuatro países —todos de altos ingresos según la categorización del Banco Mundial—, reportan 50 lesionados o más por cada fallecimiento. Aunque al momento no se sabe cuál es la magnitud del sub registro por país, difícilmente se podría pensar que los países que documentan menos de 15 lesionados por cada deceso tienen sistemas de información que capten a todos los lesionados no fatales. De cualquier manera, se documentó para toda la región un total de 5, 054,980 lesionados no fatales por año, lo que equivaldría a 35.5 lesionados por cada fallecido.

En atención pre hospitalaria, el 75% de los países cuenta con un sistema estructurado de atención pre hospitalaria a disposición de las víctimas de lesiones en el tránsito. Los países que aún no cuentan con dicho sistema son: Guatemala, El Salvador, Ecuador, Jamaica, Perú, Uruguay

y San Vicente y las Granadinas. De los 24 países que informaron que cuentan con un sistema estructurado de atención pre hospitalario, 17 (70.8%) tienen además un servicio telefónico de acceso universal, es decir, con un único número de teléfono de urgencias para todo el país. Los seis países que negaron tener dicho servicio de acceso universal fueron: Argentina, Guyana, Honduras, México, Panamá, y Paraguay. Sin embargo, con excepción de Honduras que no contestó, todos ellos señalaron que operan servicios telefónicos con números de acceso regional o local.

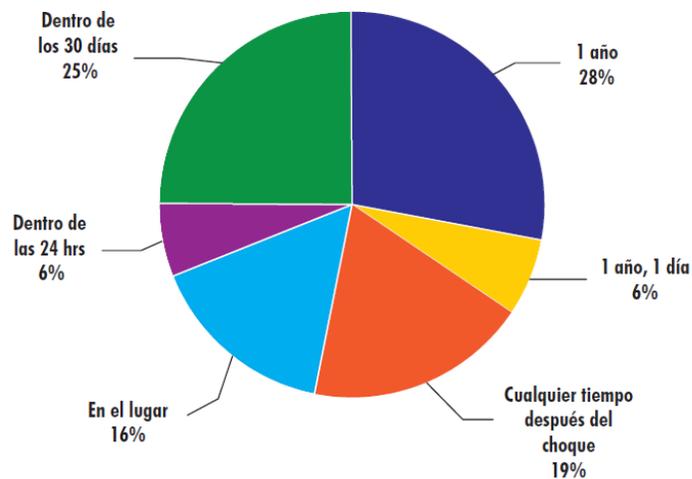
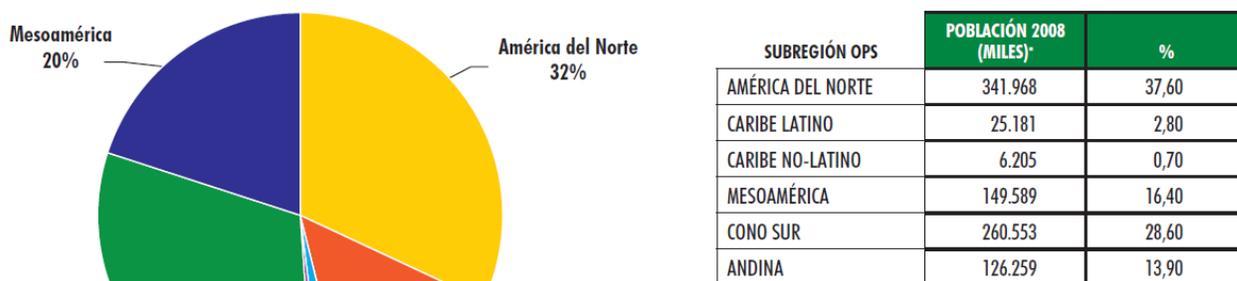


Figura 2.5. Definición de muerte por lesiones causadas por el tránsito, según tiempo transcurrido entre el evento y la defunción, Región de las Américas, 2006–2007.⁵⁵

⁵⁵ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 14.



* Tomado de las bases de datos de la OPS, disponibles en: www.paho.org.

Figura 2.6. Distribución de las muertes por lesiones causadas por el tránsito, Región de las Américas, 2006–2007.⁵⁶

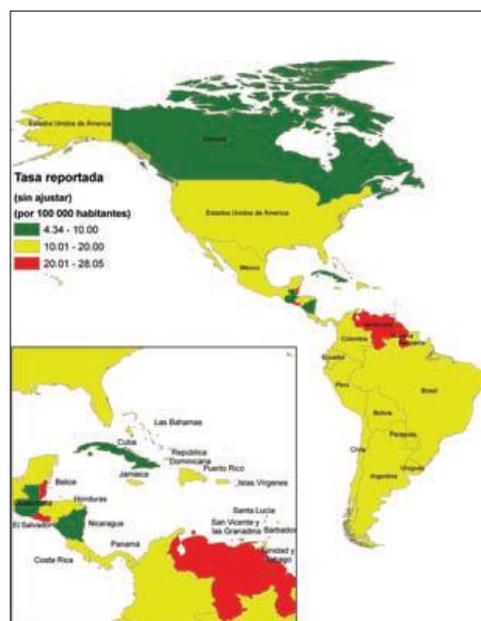


Figura 2.7. Distribución de la tasa reportada de mortalidad por lesiones causadas por el tránsito, Región de las Américas, 2006–2007.⁵⁷

⁵⁶ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 14.

⁵⁷ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 16.

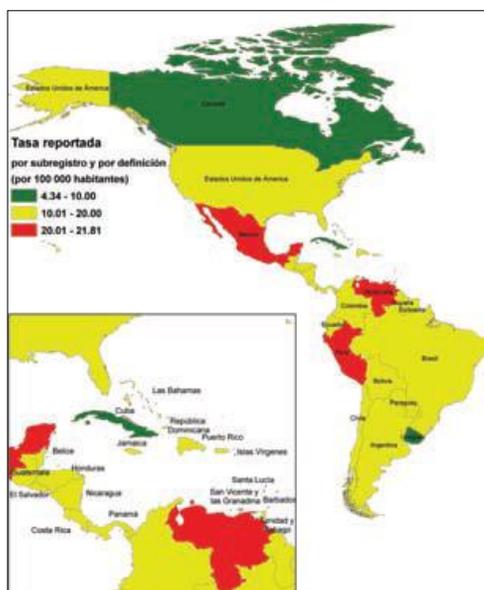


Figura 2.8. Distribución de la tasa de mortalidad por lesiones causadas por el tránsito, ajustada por la definición de muerte y sub registro, Región de las Américas, 2006–2007.⁵⁸

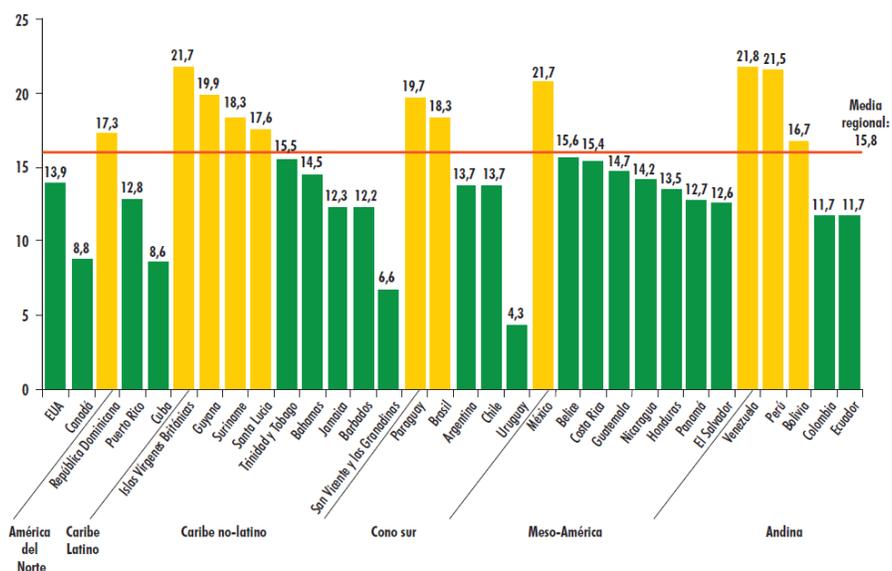


Figura 2.9. Tasa ajustada de mortalidad por tránsito vehicular, según subregión de la OPS, 2006–2007.⁵⁹

⁵⁸ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 16.

⁵⁹ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 17.

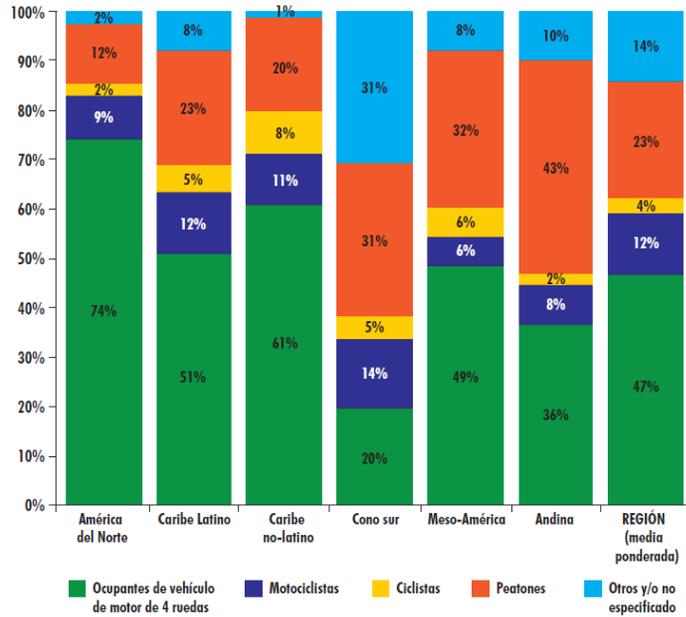


Figura 2.10. Muertes por lesiones causadas por el tránsito por tipo de usuario, según la sub región de las Américas, 2006–2007.⁶⁰

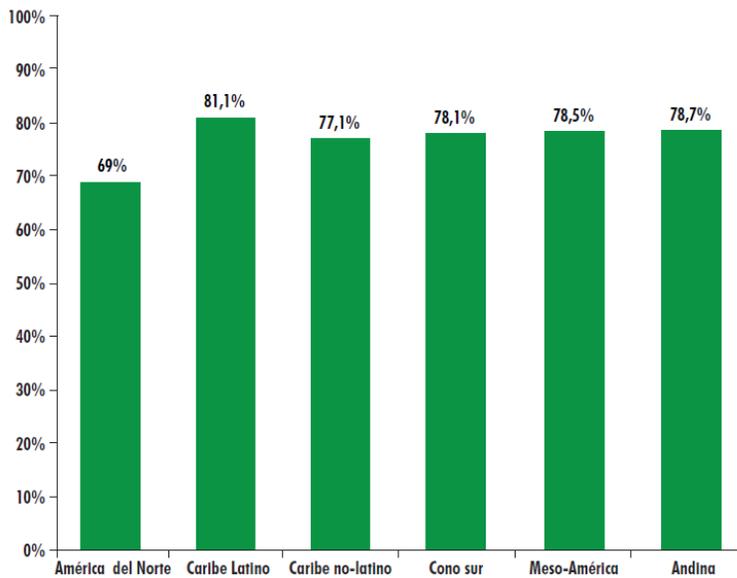


Figura 2.11. Porcentaje del total de personas fallecidas a causa de lesiones de tránsito que son hombres, según subregión de las Américas, 2006–2007.⁶¹

⁶⁰ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 18.

⁶¹ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 18.

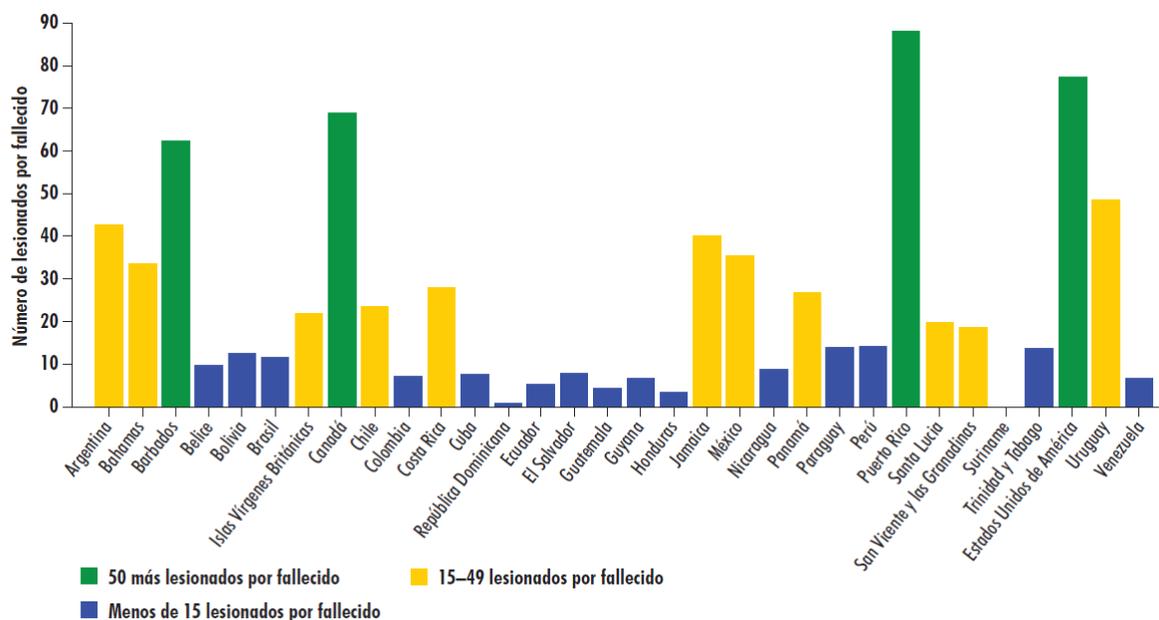


Figura 2.12. Lesionados no fatales por cada fallecido por lesiones en el tránsito, Región de las Américas, 2006–2007.⁶²

Como puede observarse en la figura 2.13, menos de la mitad de los países de la Región notificaron el porcentaje de muertes por lesiones causadas en el tránsito atribuidas al consumo de alcohol. De éstos, Uruguay, Estados Unidos y Puerto Rico refirieron cifras de más del 30%. Otros países como Colombia, El Salvador, Islas Vírgenes Británicas, Bahamas, Honduras y Ecuador presentaron cifras de menos del 10%.

Con respecto al uso de dispositivos de seguridad, en la figura 2.14 se incluyen los 17 países que informaron sobre las prevalencias de uso del cinturón. Solamente 12 de ellos presentan una prevalencia de uso por arriba de 60% para todos los ocupantes. Preocupa el número de países que aún no han documentado la prevalencia de uso del cinturón de seguridad (n =15). Se debe observar con cautela la comparabilidad de los datos entre los países, considerando que la calidad de la información es distinta.

⁶² Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 19.

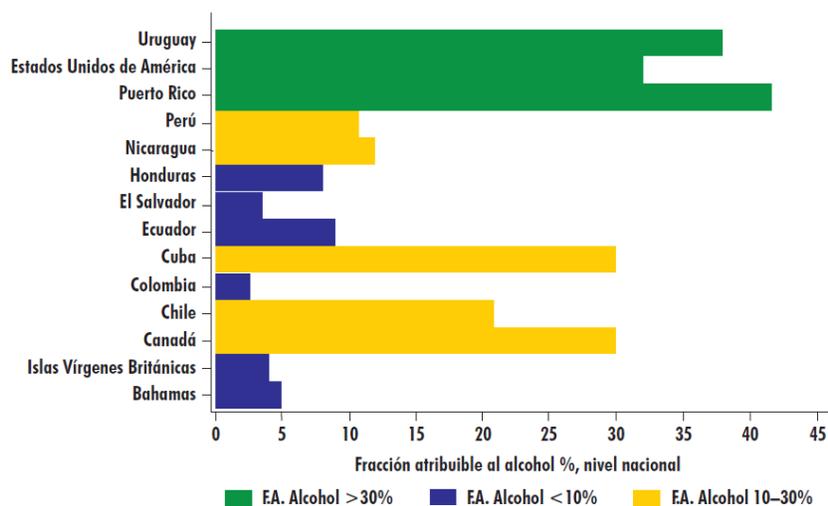


Figura 2.13. Porcentaje de muertes en el tránsito atribuidas al consumo de alcohol, Región de las Américas, 2006–2007.⁶³

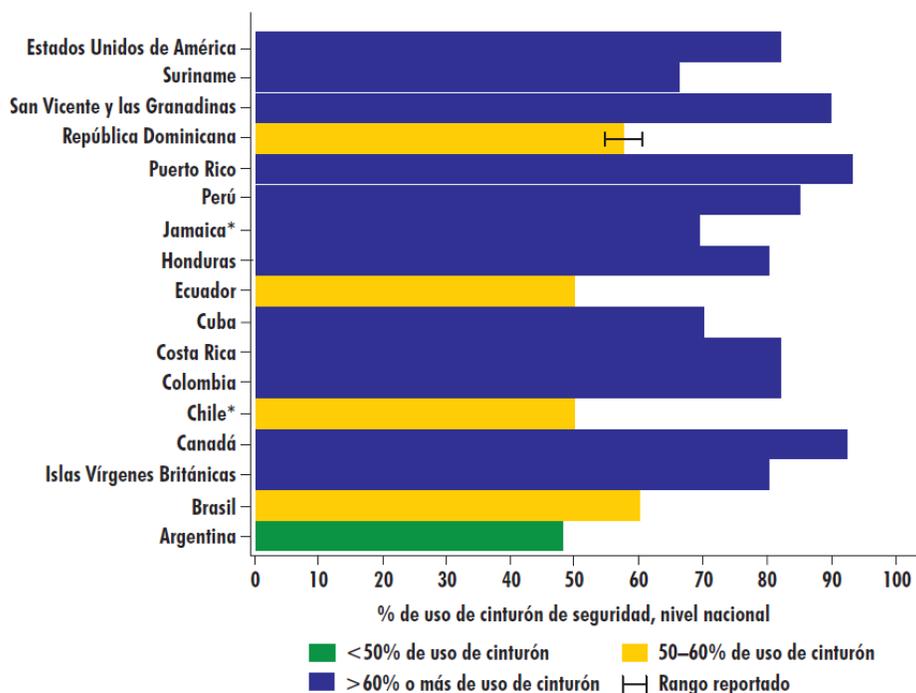


Figura 2.14. Prevalencia de uso de cinturón de seguridad, Región de las Américas, 2006–2007.⁶⁴

⁶³ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 20.

⁶⁴ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 21.

Tasa de motorización.

La motorización puede ser definida como la transición de medios de transporte no motorizados a medios de transporte motorizados: aquellos que utilizan combustibles (gasolina, electricidad, gas, etc.). Uno de los indicadores más utilizados para evaluar el grado de transición es la tasa de motorización, esto es, el número de vehículos de motor por 1,000 habitantes. La calidad de este indicador, sin embargo, puede tener algunos problemas debido al sub registro y/o clandestinidad de vehículos y a la falta de registro de las bajas como cuando, por ejemplo, los vehículos de motor son robados y llevados a otros países. El número de vehículos registrados en la región asciende a más de 387 millones, de los cuales, poco más del 70% pertenece a la subregión de América del Norte. Sin embargo, como lo muestra la figura 2.15, existen algunas variaciones al interior de la región en cuanto a los tipos de vehículos registrados. Ahí se puede apreciar que en el Caribe Latino y en el Cono Sur, las motocicletas representan un porcentaje más alto cuando se comparan con las demás subregiones. La tasa de motorización en la región, de acuerdo con la información proporcionada por los encuestados, se estimó en 430.45 vehículos de motor por 1,000 habitantes. Sin embargo, países como los Estados Unidos, Puerto Rico, Islas Vírgenes Británicas y Canadá notificaron cifras muy superiores al resto (figura 2.16). Por el contrario, Perú, Cuba, Nicaragua, Ecuador, Bolivia, Bahamas, El Salvador y Paraguay documentan menos de 100 vehículos por 1,000 habitantes.

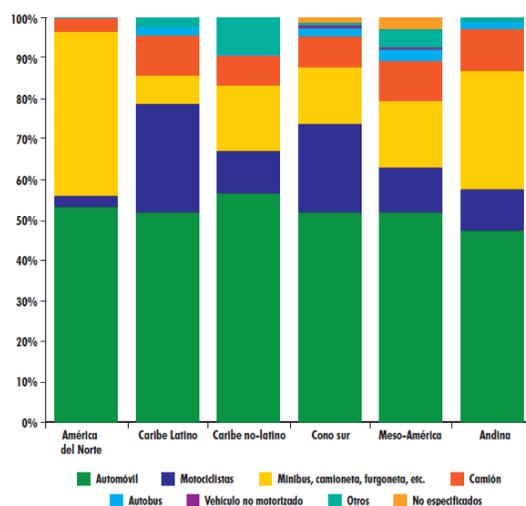


Figura 2.15. Tipos de vehículos registrados, subregiones de las Américas, 2006–2007.⁶⁵

⁶⁵ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 22.

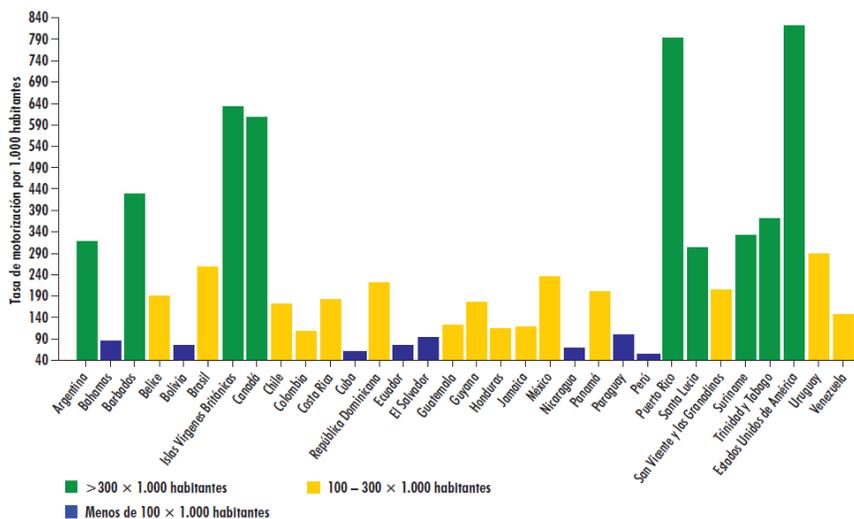


Figura 2.16. Tasa de motorización por 1,000 habitantes, Región de las Américas 2006 – 2007.⁶⁶

Al momento de la encuesta el 81% de los países refirieron tener un organismo rector dedicado a coordinar la seguridad vial al interior de los países. Barbados, Islas Vírgenes Británicas, Paraguay, República Dominicana y Surinam fueron los países que contestaron no tener organismo rector, mientras que los respondientes de Trinidad y Tobago expresaron desconocer la existencia de dicho organismo. De los organismos rectores, el 53% pertenece a un ministerio gubernamental y el 84.5% cuenta con financiamiento público. Sin embargo, tan solo Canadá, Colombia, Costa Rica, Estados Unidos, Jamaica, Bahamas, México y Nicaragua (25% del total) notificaron tener una estrategia nacional de seguridad vial aprobada oficialmente por el gobierno, que establece objetivos nacionales mensurables y que cuenta con financiamiento específico para aplicarla en parte o en su totalidad. Es importante notar la ausencia de estrategia en las subregiones del Caribe Latino y del Cono Sur.

⁶⁶ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 22.

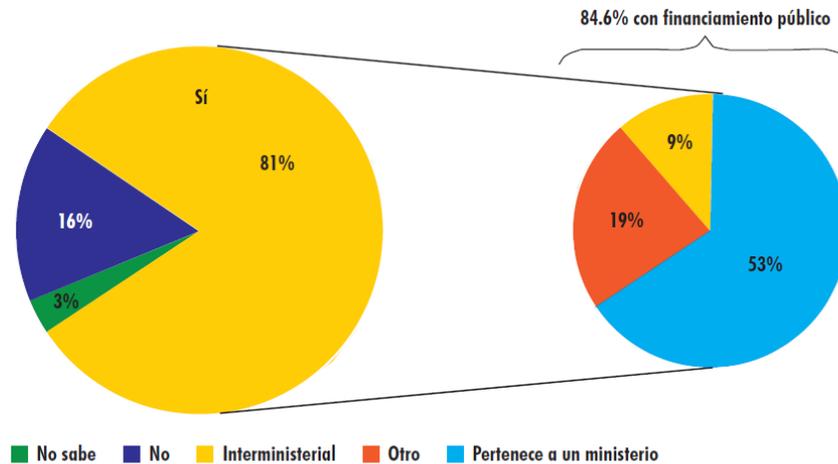


Figura 2.17. Existencia de un organismo rector de la seguridad vial, Región de las Américas, 2006–2007.⁶⁷

De esta primera parte se tomaron las siguientes consideraciones, en el diseño del modelo y la representación de los comportamientos de sus elementos:

- Existe un problema en el subregistros de los datos, por lo que debemos de tener cuidado al momento de calibrar el modelo, esto nos podría dar resultados erróneos.
- Debemos de tener un modelo para cada región, en donde se vaya a aplicar, ya que los tipos de víctimas dependen de cada país, en el caso de México, se deben de tratar de reflejar los comportamientos, principalmente de los peatones, que son la mayor parte de las víctimas.
- Tipo de dispositivos de seguridad que usa el conductor, como el uso del cinturón de seguridad y el alcoholismo, debemos de buscar representarlo tanto en su uso frecuente como en la falta de este, esto afectara en la predicción de los accidentes.
- La cantidad de vehículos existentes en las zonas representadas del modelo, será un factor de suma importancia, al momento de tratar de predecir los accidentes. Debemos de poder modelar, de manera muy exacta, la cantidad de vehículos que se presentan, ya que es uno de los principales factores que influyen en la generación de estos.

⁶⁷ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 23.

2.4.2. Legislación y vigilancia de la aplicación.

Un alto porcentaje de los países (26 de 32) reportaron tener un organismo rector dedicado a coordinar la seguridad vial, pero solamente el 25% de ellos (Canadá, Colombia, Costa Rica, Estados Unidos, Jamaica, las Bahamas, México y Nicaragua) dijeron tener una estrategia nacional de seguridad vial aprobada oficialmente por el gobierno, con objetivos nacionales y financiamiento.

Legislaciones “claras e integrales”, acompañadas de la aplicación de sanciones y campañas de prevención, inciden directamente en la reducción de lesiones y muertes asociadas a la alta velocidad y al consumo de alcohol, así como a la falta de medidas de protección como uso de cascos, sillas porta-infantes y cinturón de seguridad.

Todos los países tienen legislación en materia de control de velocidad, ingesta de alcohol antes de conducir, y uso de casco protector. También, con excepción de Bolivia, prácticamente todos los países tienen legislación sobre el uso obligatorio de cinturón de seguridad. Sin embargo, sólo 21 de los 32 países estudiados cuenta con leyes que obligan a usar sillas de seguridad para menores y, salvo en Canadá y Estados Unidos, las legislaciones son a nivel nacional. Los países que aún no han legislado a este respecto son: Argentina, Belice, Bolivia, Cuba, Ecuador, Guatemala, Honduras, Paraguay, Perú, República Dominicana y Santa Lucía.

Más de la mitad de los países de la Región (18) carecen aún de políticas nacionales que apoyen la inversión en transporte público y promoción de transportes no motorizados tales como el uso de la bicicleta.

Poco menos de la mitad de los países (15) dispone de información relativa a los costos de lesiones y muertes causadas por el tráfico vehicular, destacándose los países de América del Norte y de la Región Andina.

La revisión de la legislación sugiere que los países que integran la Región de las Américas se encuentran en distintas etapas en materia de legislación integral, en donde si bien todos cuentan ya con leyes en materia de seguridad vial, en la mayoría de ellos aún no se ha concretado la vigilancia en observancia de la efectividad de las mismas. Dos tercios de los países (20) legislan sobre los cinco factores analizados en el informe.

Velocidad.

Al desagregar por cada factor de riesgo se observa que el control de la velocidad y el uso de cinturón aparecen como las medidas más ampliamente implementadas en la región. La obligatoriedad en el uso de casco para motociclistas muestra aún algunos vacíos legales, como incluir a todos los pasajeros y los diferentes tipos de vías.

Los resultados de la encuesta indican que la regulación de la velocidad es aún desatendida en muchos países de la región, pues solo 21 de ellos comunicaron que cuenta con regulaciones referentes al límite de velocidad urbana menor a 50 km/hora, mientras que menos de la tercera parte (nueve países) tienen gobiernos federalizados que permiten modificar localmente los límites de velocidad establecidos a nivel nacional. La tabla 2.3 indica que la Región se encuentra aún lejos de establecer políticas integrales en materia de velocidad.

SUBREGIÓN		PORCENTAJE	TOTAL DE PAÍSES
AMÉRICA DEL NORTE	0	0%	2
CARIBE LATINO	3	100%	3
CARIBE NO-LATINO	8	89%	9
CONO SUR	1	20%	5
MESOAMÉRICA	5	63%	8
ANDINA	3	60%	5
TOTAL	20	63%	32

Tabla 2.3. Países con límite de velocidad en vías urbanas menor o igual a 50 Km/hr, según subregión de las Américas, 2006-2007.⁶⁸

Conducción bajo efectos del alcohol.

Los datos obtenidos sobre el control del consumo de alcohol presentan grandes variaciones entre países y dentro de algunas naciones con respecto al uso de un corte de la referencia de alcoholemia menor o igual a 0.05 g/dl.

La totalidad de los países incluidos en la encuesta cuenta con una legislación nacional o sub nacional que regula la conducción de vehículos bajo los efectos del alcohol. Sin embargo,

⁶⁸ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 27.

únicamente 10 países (31%) cuentan con una legislación que estipule la conducción de vehículos bajo la referencia BAC* menor o igual a 0.05 g/dl. Estos países son: Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, El Salvador, Nicaragua, Panamá, Perú y Surinam. Por su parte, Honduras maneja un límite de BAC de 0.07 g/dl mientras que países como Belice, Islas Vírgenes Británicas, Bahamas, Canadá, Ecuador, Guyana, Jamaica, Puerto Rico, Santa Lucía, Trinidad y Tobago, Uruguay, Venezuela y los Estados Unidos tienen un límite de BAC de 0.08 g/dl. Países como Barbados, Bolivia, Cuba, República Dominicana y San Vicente y las Granadinas aplican otros parámetros para definir la presencia del alcohol en la sangre, como por ejemplo: certificado médico o nivel de alcohol contenido en el aire exhalado. (Tabla 2.4).

SUBREGIÓN		PORCENTAJE	TOTAL DE PAÍSES
AMÉRICA DEL NORTE	0	0%	2
CARIBE LATINO	0	0%	3
CARIBE NO-LATINO	1	11%	9
CONO SUR	3	60%	5
MESOAMÉRICA	4	50%	8
ANDINA	2	40%	5
TOTAL	10	31%	32

Tabla 2.4. Países con leyes de conducción bajo efectos del alcohol, que aplican como referencia alcoholemia menor o igual a 0.5 g/dl, según subregión de las Américas, 2006-2007.⁶⁹

Uso de casco.

Todos los países consultados (32) en la Región de las Américas expresaron contar con leyes nacionales o sub nacionales que obligan el uso de casco para motociclistas. Sin embargo, en muchos de los países la legislación es “incompleta” o de “estrecho alcance”: hacen excepciones para determinados pasajeros, tipos de motocicletas, de acuerdo con tipo de vías, o carece de definiciones adecuadas sobre lo que significa un casco estándar de seguridad con certificación internacional. Ver tabla 2.5.

⁶⁹ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 27.

La obligatoriedad del uso de casco para todos los ocupantes, en todo tipo de vías y para todo tipo de vehículos de dos o tres ruedas, es aplicada en 22 países de la Región, siendo el Cono Sur, la subregión que notifica una mayor aplicación de legislaciones integrales. En América del Norte, Canadá cuenta con una legislación nacional, pero no Estados Unidos. Los resultados no son halagadores con relación a la adopción de legislaciones que exigen el cumplimiento de una norma estándar para cascos, ya que la mitad de los países (16) reporta no tenerla. Los dos indicadores interpretados juntos informan que poco más de la tercera parte (12 países) cuentan con leyes integrales y factibles de aplicar: Barbados, Brasil, Canadá, Chile, Jamaica, Bahamas, México, Perú, Puerto Rico, San Vicente y las Granadinas, Trinidad y Tobago y Venezuela.

SUBREGIÓN	APLICA PARA TODOS LOS OCUPANTES, TODOS LOS TIPOS DE VÍAS Y TODOS LOS TIPOS DE MOTORES SIN EXCEPCIÓN		USO DE CASCO Y REQUERIMIENTO DE ESTANDARES ESPECÍFICOS DEL CASCO		TOTAL DE PAÍSES
AMÉRICA DEL NORTE	1	50%	1	50%	2
CARIBE LATINO	2	67%	1	33%	3
CARIBE NO-LATINO	6	67%	5	56%	9
CONO SUR	4	80%	2	40%	5
MESOAMÉRICA	6	75%	1	13%	8
ANDINA	3	60%	2	40%	5
TOTAL	22	69%	12	38%	32

Tabla 2.5. Legislación sobre el uso de casco, según subregión de las Américas, 2006-2007.⁷⁰

Uso de cinturón de seguridad.

La encuesta muestra un uso extendido del cinturón de seguridad en la Región de las Américas. Con excepción de Bolivia, los países participantes cuentan con leyes nacionales o sub nacionales para el uso obligatorio del cinturón de seguridad. Sin embargo, los porcentajes bajan a un 63% cuando se especifica que dicha reglamentación está estipulada para todos los ocupantes. Analizando este indicador por subregión, observamos que únicamente los países del Cono Sur cumplen con una legislación incluyente para todos los ocupantes del vehículo, mientras que en el

⁷⁰ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 31.

Caribe Latino sólo un tercio de sus países dijeron tener una legislación incluyente en esta materia. Ver tabla 2.6.

Considerando que alrededor de las dos terceras partes de los países cuentan con legislaciones en materia de uso de cinturón (estipulada ya sea para todos o algunos de los ocupantes), la evaluación del cumplimiento de la ley no parece ser tan negativa, porque 18 países evalúa la observancia de la ley por arriba de 6 (en una escala del 0 al 10).

SUBREGIÓN		PORCENTAJE	TOTAL DE PAÍSES
AMÉRICA DEL NORTE	1	50%	2
CARIBE LATINO	1	33%	3
CARIBE NO-LATINO	5	56%	9
CONO SUR	5	100%	5
MESOAMÉRICA	4	50%	8
ANDINA	4	80%	5
TOTAL	20	63%	32

Tabla 2.6. Países en los que todos los ocupantes del automóvil deben de utilizar cinturón de seguridad, según subregión de las Américas, 2006-2007.⁷¹

Sillas de seguridad para niños y niñas.

Finalmente, con respecto al uso de sillas de seguridad para niños no ha habido avances importantes en la Región en materia legislativa dirigida a obligar a los usuarios de vehículos a portar y usar las sillas protectoras para menores.

Los datos de la Región indican que 11 países participantes en la encuesta carecen de una legislación que obligue a los usuarios de vehículo utilizar sillas protectoras para menores. La Tabla 2.7 muestra una aplicación débil de la ley en la Región: sólo cinco países evalúan su aplicación con 6 o más (en una escala del 0 al 10). La posibilidad de contar con una ley integral que incluya la reglamentación en la materia y una observancia de 6 o más es muy baja, ya que únicamente es compartida por cinco países participantes en el estudio (Barbados, Canadá, Costa Rica, San Vicente y las Granadinas y Trinidad y Tobago). Por subregión, el Caribe Latino, el

⁷¹ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 32.

Cono Sur y la subregión Andina aún no han avanzado en este tema. Es importante considerar que esta medida preventiva está centrada en los niños que se transportan en vehículos privados, esto es, solo una parte de la población.

Subregión		Porcentaje	Total de países
AMÉRICA DEL NORTE	1	50%	2
CARIBE LATINO	0	0%	3
CARIBE NO-LATINO	3	33%	9
CONO SUR	0	0%	5
MESOAMÉRICA	1	13%	8
ANDINA	0	0%	5
Total	5	16%	32

Tabla 2.8. Observancia de la ley sobre sillas de seguridad para niños y niñas, según subregión de las Américas, 2006-2007.⁷²

En este informe queda claro que la mayoría de los países de la Región han iniciado — en distintos momentos y empleando diversas estrategias — la aplicación de medidas para mejorar la seguridad vial a nivel nacional. En el contexto regional, la mayoría de las intervenciones se han centrado en el conductor y en los ocupantes de vehículos de motor. Sin embargo, se observa que en países de América Latina y el Caribe es — hasta fechas recientes — cuando se han comenzado a actividades dirigidas a proteger a los usuarios más vulnerables con el fin de disminuir la desigualdad entre éstos. Se torna entonces imperativo el esfuerzo de seguir impulsando intervenciones en movilidad integral incluyentes y seguras para todos.

La geosimulación puede ser una herramienta muy importante para evaluar el efecto de la aplicación de la legislación sobre la cantidad de accidentes de tránsito generados. Es decir a través del cambio de sus parámetros, los cuales estarán relacionados con la variable a regular, podremos determinar el efecto que tendrá sobre la generación de estos, por ejemplo al regular la

⁷² Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 33.

velocidad de los automotores, podemos estimar el efecto que se tendrá sobre la reducción de los accidentes.

Las leyes que se aplican en cada elemento que buscan regular, como por ejemplo la velocidad y el alcoholismo, nos ayudaron a determinar los elementos a incluir dentro del modelo, ya que nos dice que son los principales factores que provocan los accidentes de tránsito. El uso del cinturón de seguridad y su no uso deben de ser considerados en el diseño del modelo.

2.4.3. Intervenciones para el diseño de un sistema de tránsito seguro y sostenible.

Las legislaciones tendientes a modificar comportamientos individuales de riesgo son insuficientes cuando no van acompañadas de medidas correctivas que ataquen directamente el problema. La OMS recomienda el uso de un enfoque sistémico que contemple al usuario, los vehículos y la infraestructura para mejorar la seguridad vial. Este enfoque incluye proporcionar redes viales eficientes, y fomentar el uso de medios de transporte más seguros, sustentables y de precio accesible. En este tipo de acciones destaca la promoción de medidas que estimulen el desplazamiento a pie o en bicicleta, el uso de transporte público masivo seguro y de calidad, el control y la verificación de la seguridad de vehículos particulares, además de la aplicación de auditorías o inspecciones periódicas de las vías existentes. Dichas intervenciones no sólo requieren una implementación simultánea sino de una firme voluntad política y una estrecha colaboración con los distintos sectores involucrados. Para contextualizar la situación de la región, es importante mencionar que con excepción de América del Norte, la urbanización que ha presentado por décadas ha tendido hacia la expansión periférica de las ciudades. Esta desmedida e irregular urbanización, ha ido acompañada de una política de infraestructura urbana enfocada hacia el uso de vehículo particular, y ha mantenido un transporte público deficiente, inseguro y focalizado hacia las poblaciones más pobres. No ha sido sino hasta décadas recientes que se aplicaron en la Región iniciativas significativas en ciudades como Bogotá, Medellín, Curitiba, Santiago de Chile y la Ciudad de México mediante la adopción del transporte multimodal como una de las políticas exitosas en el impulso al transporte público masivo. El informe regional analizó tres tipos de intervenciones orientadas al diseño de un sistema de tránsito seguro: i) la promoción del desplazamiento a pie o en bicicleta, ii) la promoción del transporte público y, iii) el control e inspección de vehículos y vías.

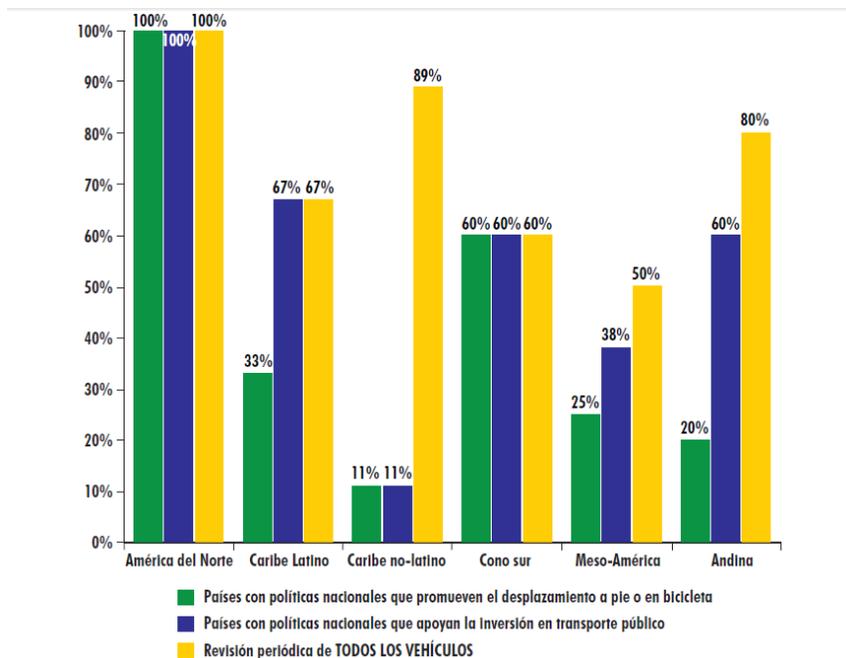


Figura 2.19. Políticas para el diseño de un sistema de tránsito seguro y sostenible, Región de las Américas, 2006–2007.⁷³

De acuerdo a los datos estadísticos mostrados podemos resumir que las condiciones de la seguridad vial en la región de Centroamérica y Sudamérica son las siguientes:

- a. Es la primera causa de mortalidad en el grupo entre 5 a 44 años.
- b. Solo Estados Unidos y Canadá han mostrado reducción en el número de muertes por accidentes de tránsito en los últimos 30 años.
- c. La mayor parte de las muertes son de peatones y en Estados Unidos y Canadá los conductores de vehículos.
- d. Se promueve el uso y compra de nuevos vehículos en lugar de promocionar el transporte público.
- e. La mayor parte es gente con altos niveles de pobreza que carecen de asistencia social, razón por la cual su recuperación es más lenta o incompleta.
- f. Solo ocho países invierten en seguridad vial, resaltando Costa Rica y Estados Unidos.

⁷³ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 44.

- g. En la mayor parte de estos no se tiene legislación sobre el uso de dispositivos de seguridad, sobre la velocidad, el control de velocidad y uso de caso, son estrechas o incompletas y sobre el uso de sillas de seguridad para los niños no hay avances.
- h. Solo el 25% tienen una estrategia de seguridad vial nacional.
- i. La geosimulación puede ser una herramienta de suma importancia para cuantificar el efecto del cambio de cada una de estas variables y su efecto sobre la reducción de estos.

2.4.4. Recomendaciones de la OMS sobre seguridad vial.

Las recomendaciones que hace la OMS sobre como incrementar la seguridad vial, son las siguientes:

- a. Ubicar el tema de la Seguridad Vial como una prioridad de salud pública, lo que hace necesario asegurar recursos humanos y financieros para implementar las acciones intersectoriales en este tema.
- b. Utilizar los resultados plasmados en este informe como una herramienta que sirva para posicionar el tema de la seguridad vial como una política pública para fortalecer (y/o implementar) las capacidades de los gobiernos para garantizar e impulsar la movilidad de una forma segura, equitativa, saludable y sustentable.
- c. Favorecer el establecimiento de estrategias integrales e indicadores de monitoreo, específicamente para grupos vulnerables.
- d. Promover el avance de leyes integrales en la región, sobre todo en aquellos países donde ya existe la normatividad para el ejercicio de su cumplimiento. En la mayoría de los países la vigilancia del cumplimiento es la clave para contar con verdaderas leyes integrales.
- e. Promover que tanto los gobiernos como la sociedad civil establezcan los vínculos y coaliciones necesarias para mitigar el problema de inseguridad vial, sus costos económicos, sociales y humanos.

Tabla 2.9. Distribución de países participantes por subregión.⁷⁴

AMÉRICA DEL NORTE: Canadá, Estados Unidos de América.

CARIBE LATINO: Cuba, Puerto Rico, República Dominicana.

CARIBE NO-LATINO: Barbados, Guyana, Islas Vírgenes Británicas, Jamaica, Bahamas, San Vicente y las Granadinas, Santa Lucía, Surinam, Trinidad y Tobago.

CONO SUR: Argentina, Brasil, Chile, Paraguay, Uruguay.

MESOAMÉRICA: Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, México, Nicaragua, Panamá.

ANDINA: Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela

2.4.5. ¿Cómo se previenen los accidentes de tránsito?

Según la OMS hay cinco medidas que si son implementadas en el mundo, podemos salvar cientos de miles de vidas cada año. Estos son: el uso de cinturones de seguridad, uso de cascos de ciclistas y motociclistas, control de la velocidad y del consumo de alcohol y visibilidad de los peatones.

También es necesario un mayor fortalecimiento de las leyes contra los conductores que beben alcohol. Pero quizás lo más importante, afirma la OMS, son las campañas de educación para cambiar las actitudes de los usuarios jóvenes en carreteras y caminos.

Se señala que el principal responsable en la producción de accidentes es el ser humano, del análisis de los incidentes de tránsito en el último año, se obtuvo el siguiente ranking de desencadenantes:

- Invasión de carril. Esta maniobra es una de las causas más comunes y encabeza el ranking de accidentes graves con el 38% de los casos. El error humano se suma a las rutas colapsadas y al estado de los caminos. El 68 % de los siniestros se produce en sectores rectos de las rutas, lo que implica que la mayoría de los accidentes se ocasionan en las maniobras de sobrepaso.
- Distracción y celular. Fumar, tomar mate, cambiar el CD o hablar por teléfono ocasiona el 21% de los incidentes. Hablar por celular cuando se maneja constituye el factor de mayor

⁷⁴ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009): 8.

distracción al volante. Es más: esta acción encabeza el ranking de distracciones (54%) y es la quinta infracción más penalizada en la Ciudad. Le siguen carteles de publicidad (14%), viajar con niños (10%), hablar con los acompañantes (9%) y prender la radio (4%).

- Velocidad inadecuada. Representa el 14,5% de los siniestros y es la acción más repetida en los conductores. Según estudios realizados en España, la velocidad es el principal factor que propicia accidentes, porque aumenta el riesgo siete veces. En el país, apenas el 23% lo considera una falta grave.
- No respetar la señalización. La falta de atención a la cartelera que indica detención, a los semáforos o la falta de respeto a las indicaciones de velocidad máxima son las que a diario se ven en los accidentes de tránsito y representan el 8%.

Factores como cansancio (6%), no respetar la prioridad de paso (5%), distancia de seguimiento inadecuada (5%), alcohol (1%) y luces deficientes (0,6%) tienen una incidencia menor en los choques.

¿Por qué se producen los accidentes de tránsito?

*Ineptitud psicofísica/psicosensométrica

*Fatiga del conductor

*Ingesta de alcohol

*Percepción inadecuada del riesgo o de la exposición al riesgo

*Cultura preventiva subdesarrollada o inadecuada

*Conducción ofensiva o conducta sub estándar

*Inadaptación/desadaptación al trabajo nocturno

*Desconocimiento de las normas de circulación de vehículos en las vías.

*Imprudencia temeraria del conductor

Esta información sobre los factores que ocasionan los accidentes de tránsito fueron incluidos en el modelo propuesto, aprovechando las ventajas que nos da la programación orientada a objetos, el programa de cómputo que se utilizó llamado Traffx ya incluye algunos de los comportamientos antes mencionados y los restantes se programaron, como el módulo de accidentes de tráfico. Existen algunos elementos que es difícil estimar como la distracción de los conductores, en el caso del modelo es posible incluir un porcentaje, aunque no es del todo

certero, este influirá en la generación de estos. La revisión de esta parte teórica nos permitió poder tener un modelo más apegado a la realidad.

2.5. Situación de la seguridad vial en México.

Con el fin de conocer la situación de la seguridad vial en México se analizó la información de los tres principales organismos que la generan: la Organización Mundial de la Salud, el Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes (CONAPRA) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), las cuales se muestran a continuación.

Información de la Organización Mundial de la Salud.

Continuando con el informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas, con el fin de dar un panorama de la situación en México se incluyen los siguientes cuadros en los cuales se miden las variables de la seguridad vial, que utiliza la OMS para describir la situación de cualquier región.⁷⁵

México

Población: 106 534 880

Nivel de ingreso: Mediano

Ingreso nacional bruto por habitante: \$8 340

MARCO INSTITUCIONAL	
Organismo rector: Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes (CONAPRA)	
Financiado en el presupuesto nacional	Sí
Estrategia nacional de seguridad vial	Sí
Objetivos mensurables	Sí
Financiado	Sí

⁷⁵ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009):70.

LEGISLACIÓN NACIONAL	
Límites de velocidad establecidos con carácter nacional	Sí
Las autoridades locales pueden establecer límites más bajos	Sí
Límite máximo en tramos urbanos	40–80 km/h
Aplicación ^a	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Leyes sobre consumo de alcohol y conducción	Sí
Límite de CAS – población general	n/a ^b
Límite de CAS – conductores jóvenes o noveles	n/a ^b
Pruebas aleatorias de alcoholemia y/o controles policiales	Sí
Víctimas mortales por accidentes de tránsito bajo los efectos del alcohol	—
Aplicación ^a	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Ley sobre uso del casco en motocicletas	Sí
Se aplica a todos los ocupantes	Sí
Criterios de uso obligatorio del casco	Sí
Tasa de uso del casco	—
Aplicación ^a	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Ley sobre uso del cinturón de seguridad	Sí
Se aplica a todos los ocupantes	Sí
Tasa de uso del cinturón de seguridad	—
Aplicación ^a	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Ley sobre uso de sistemas de retención para niños	Sí
Aplicación ^a	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

^a La calificación de la aplicación de la legislación representa el consenso basado en la opinión profesional de los encuestados según una escala de 0 a 10, en la que 0 es ineficaz y 10 muy eficaz.

^b Los límites máximos de alcoholemia están establecidos a nivel subnacional (0,08 g/dl en el Distrito Federal y en la mayoría de las ciudades).

CALIDAD DE LOS VEHÍCULOS	
Se exige que los fabricantes de automóviles cumplan criterios sobre	
Consumo de combustible	Sí
Instalación de cinturones de seguridad en todos los asientos	Sí
AUDITORÍAS DE SEGURIDAD VIAL	
Se exigen auditorías formales en los proyectos de construcción de nuevas vías de tránsito importantes	No
Auditorías periódicas de la infraestructura vial existente	Sí
PROMOCIÓN DEL TRANSPORTE ALTERNATIVO	
Políticas nacionales para promover los desplazamientos a pie o en bicicleta	No (Subnacional)
Políticas nacionales para promover el transporte público	No (Subnacional)

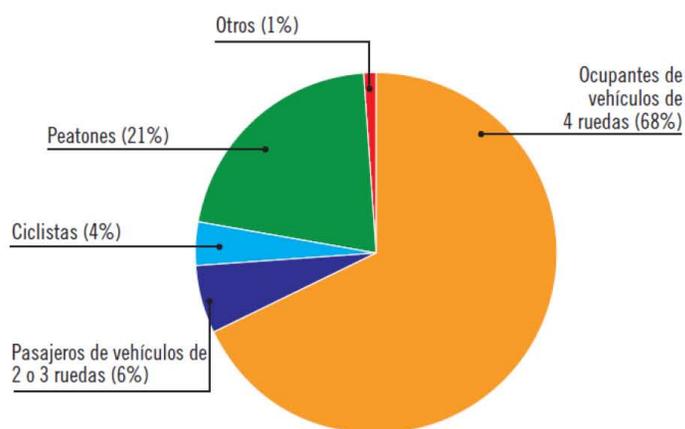
ATENCIÓN POSTERIOR A LOS ACCIDENTES	
Sistema de atención prehospitalaria, formal y a disposición del público	Sí
Número telefónico nacional de acceso universal	No

DATOS
Notificación de víctimas mortales por accidentes de tránsito (2006) 17 003^c (78% Hombres, 22% Mujeres)
Notificación de traumatismos no mortales por accidentes de tránsito (2006) 603 541^d
Estudio de costos disponible No

^c Datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática; definición de mortalidad: defunciones ocurridas en el lugar del siniestro.

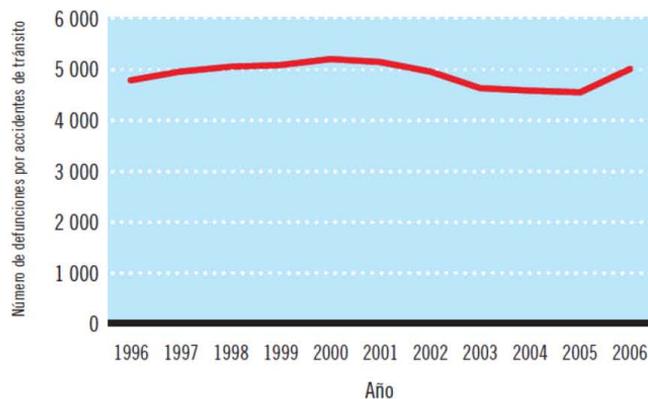
^d Datos de Sanidad.

VÍCTIMAS MORTALES POR CATEGORÍA DE USUARIO DE LAS VÍAS DE TRÁNSITO



Fuente: 2006, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática

TENDENCIAS EN LA MORTALIDAD POR ACCIDENTES DE TRÁNSITO



Fuente: Red federal de carreteras solamente (no se incluyen las zonas urbanas)

VEHÍCULOS REGISTRADOS	
24 970 879 total (2006)	
Automóviles	66%
Vehículos de motor de 2 y 3 ruedas	3%
Camiones	30%
Autobuses	1%

Tabla 2.8. Situación de la seguridad vial en México.⁷⁶

La información que nos proporciona la OMS no incluye un histórico de los datos, estos se pueden comparar contra los de otros países, pero no nos ayuda a determinar cómo se ha avanzado en esta materia en México.

Información del Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes (CONAPRA).

La información sobre la situación de la seguridad vial en México la obtuvimos del reporte que publico el Secretariado Técnico del Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes en el año 2010, llamado "Situación de la Seguridad Vial en México", del cual se muestran los siguientes datos, que nos dan un panorama de la situación en México.

De acuerdo con el Informe mundial sobre la seguridad vial publicado en el año 2009, el 62 % de las muertes por accidentes de tráfico en el mundo ocurre en tan solo 10 países, siendo México el país que ocupa el séptimo lugar.

Las cifras oficiales (INEGI) de nuestro país señalan que, en el año 2008, fallecieron a consecuencia de los accidentes de tráfico de vehículo de motor 17,062 personas. Sin embargo, de acuerdo con estudios científicos relacionados con el sub registro de información en México, calculamos que cada año fallecen más de 24 mil personas. Este sub registro de información principalmente se debe a que en muchas ocasiones el registro no es realizado de manera adecuada por lo que se pierde mucha información por codificaciones y diagnósticos inadecuados.⁷⁷

En el año 2008, las bases de datos oficiales registran en la categoría "otros accidentes" la cantidad de 15,086 casos; en esta se registran todos aquellos diagnósticos imprecisos que por

⁷⁶ Organización Panamericana De La Salud, Oficina Regional De La Organización Mundial De La Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, (Washington, D.C.: OMS, 2009):70.

⁷⁷ Secretariado Técnico Del Consejo Nacional Para La Prevención de Accidentes, *Situación de la seguridad vial en México, Reporte Estadístico*, Publicaciones del ST del CONAPRA, (México: 2010): 5.

diferentes factores no fueron considerados en las categorías adecuadas ya sea por falta de capacitación, tiempo o desconocimiento de la causa real de muerte.

El Secretariado Técnico del Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes considera que el 49% de los casos ubicados en la categoría “otros accidentes” corresponde a accidentes de tráfico de vehículo de motor. Esto significa que, 8,006 casos están mal clasificados, por ello, en la gráfica 1 se representa un comparativo entre los datos oficiales y las estimaciones. En total estamos hablando de 21,121 accidentes de tráfico de vehículo de motor.

Por lo anterior, es preciso contar con un sistema de recogida de información eficaz que permita conocer la magnitud y características del problema de la seguridad vial, para que con base en la información generada se convierta en una herramienta indispensable para diseñar políticas, programas e intervenciones eficaces además de conocer con mayor precisión y confiabilidad la magnitud real del problema en nuestro país.

Como se comentó anteriormente, se tuvo cuidado en determinar la información con la cual se calibro el modelo, una de las debilidades en cualquier sistema de simulación es que si no es alimentado con la información correcta, el resultado no podrá servir para tomar decisiones correctas o las decisiones que se tomen en función de esta serán erróneas.

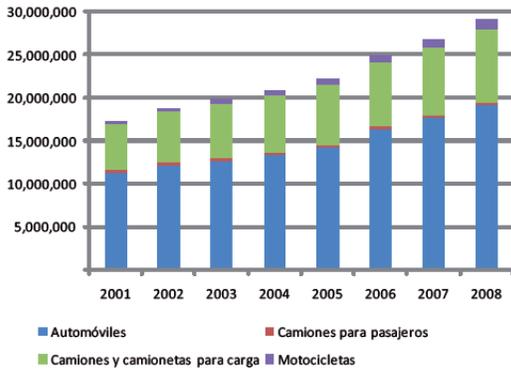
De acuerdo al INEGI en el año 2008 hubo 17,058 muertos por accidentes de tránsito y de acuerdo con CENAPRA fueron 24,000 muertos.

En este contexto, una las estrategias descritas en el Programa de Seguridad Vial 2007-2012 y aprobada por el Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes, es facilitar el acceso a la información confiable y oportuna así como el desarrollo de indicadores para accidentes de tráfico de vehículo de motor a través del impulso para la creación de observatorios estatales de lesiones causadas por el tránsito. En el mismo sentido, lo anterior permitirá publicar documentos de capacitación, investigación científica y técnica en materia de seguridad vial y documentar el análisis espacial de la ocurrencia de accidentes de tráfico mediante publicaciones cartográficas.

Con el objeto de crear un modelo de recogida de información se implementan los observatorios de lesiones causadas por el tránsito, a través de la vigilancia epidemiológica de las lesiones, la cual se entiende como un método para dar seguimiento continuo, oportuno y ordenado de factores causantes de lesiones en accidentes de tránsito con el objeto de establecer soluciones y bases para la toma de decisiones adecuadas para evitar la ocurrencia de los mismos.

Algunas de las principales estadísticas sobre los accidentes de tránsito obtenidas del documento "Situación de la seguridad vial en México" son mostradas en la tabla 2.10.

Parque vehicular, 2008



+68% en los últimos 8 años

Año	Total	Automóviles	Camiones para pasajeros	Camiones y camionetas para carga	Motocicletas
2001	17,300,530	11,351,982	273,536	5,394,206	280,806
2002	18,784,594	12,254,910	299,365	5,860,797	369,522
2003	19,806,960	12,742,049	308,101	6,317,293	439,517
2004	20,878,438	13,388,011	264,585	6,707,535	518,307
2005	22,138,478	14,300,380	268,817	6,980,738	588,543
2006	24,907,229	16,411,813	310,189	7,462,918	722,309
2007	26,747,197	17,696,623	322,076	7,849,491	879,005
2008	29,114,072	19,248,236	333,810	8,453,051	1,078,975

Tasa de motorización, 2008

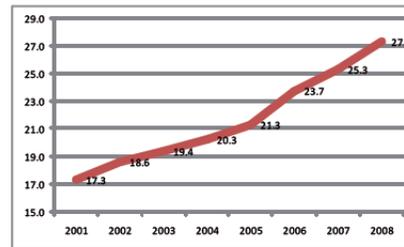
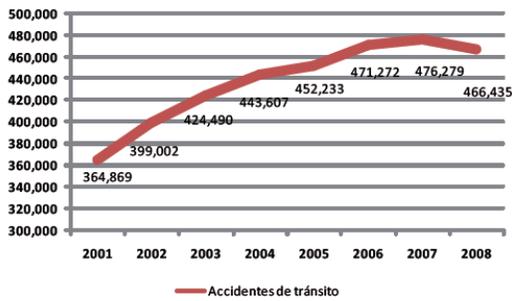
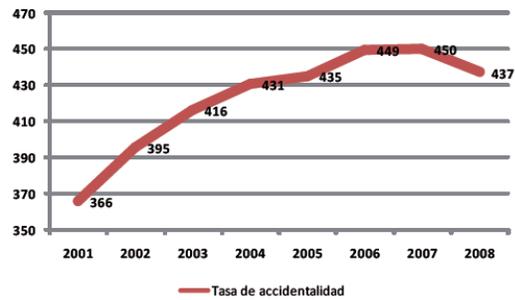


Tabla 2.10. Estadísticas sobre la motorización en México.⁷⁸

Los accidentes de tránsito



Tasa de accidentalidad por cada 100,000 habitantes

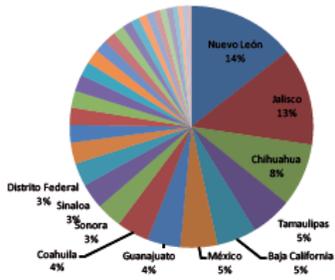


-2.8% en el último año

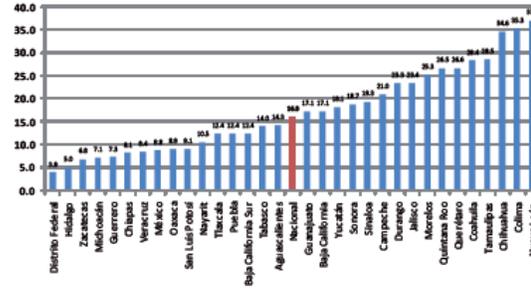
Elaborado por el Observatorio Nacional de Lesiones, CENAPRA 2010.

⁷⁸ Secretariado Técnico Del Consejo Nacional Para La Prevención de Accidentes, *Situación de la seguridad vial en México, Reporte Estadístico*, Publicaciones del ST del CONAPRA, (México: 2010): 12.

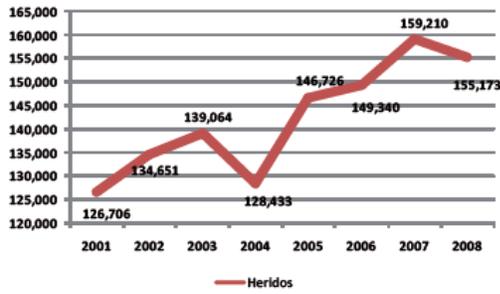
Localización de los accidentes, 2008.



Tasa de accidentalidad por cada 1,000 vehículos, 2008

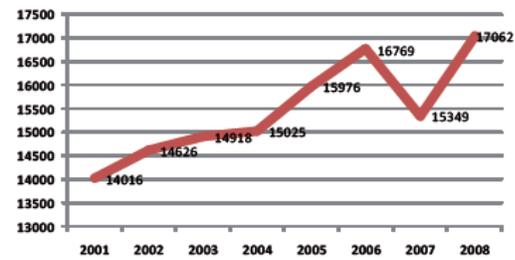


Heridos por accidentes de tránsito



-2.5% en el último año

Muertos por accidentes de tránsito



+11.1% en el último año

Tabla 2.11. Estadísticas sobre accidentes de tránsito en México.⁷⁹

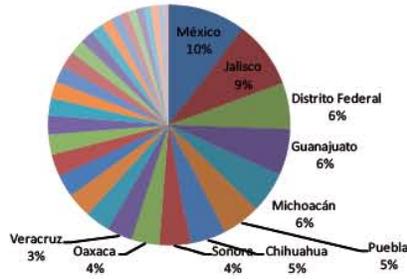
⁷⁹ Secretariado Técnico Del Consejo Nacional Para La Prevención de Accidentes, *Situación de la seguridad vial en México, Reporte Estadístico*, Publicaciones del ST del CONAPRA, (México: 2010): 13.

Tasa de mortalidad por 100,000 habitantes



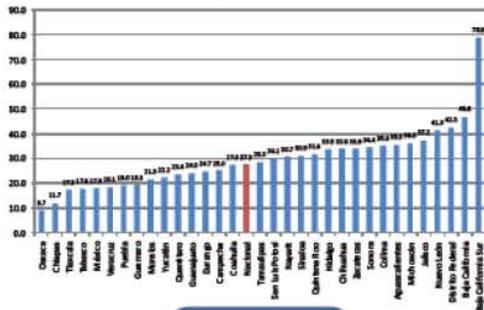
+10.3% en el último año

Distribución de los muertos por accidentes, 2008



58% de los muertos se localizan en 10 Estados

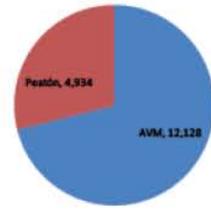
Tasas de motorización por 100 habitantes, 2008.



27.3% de la población utiliza un vehículo

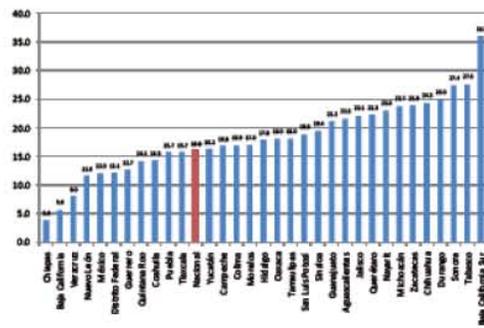
SALUD

Distribución de los ATVM, 2008.

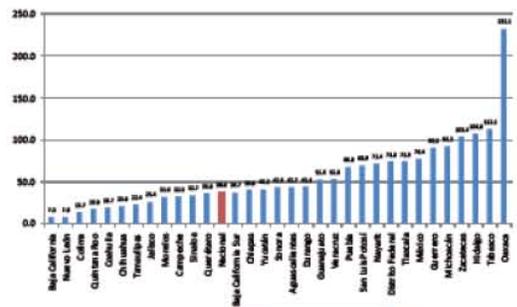


Total 17,062 muertos

Tasas de mortalidad por 100,000 habitantes, 2008.



Tasas de letalidad por 1,000 accidentes, 2008.



De cada 1,000 accidentes 36.6 personas fallecen

Distribución por edad de los ATVM, 2008.

Tabla 2.12. Estadísticas sobre accidentes de tránsito en México.⁸⁰

⁸⁰ Secretariado Técnico Del Consejo Nacional Para La Prevención de Accidentes, *Situación de la seguridad vial en México, Reporte Estadístico*, Publicaciones del ST del CONAPRA, (México: 2010): 14.

Dentro de los trabajos de investigación que ha realizado el CENAPRA en coordinación con el Instituto de Geografía de la UNAM se generó un documento llamado “Diagnostico Espacial de los Accidentes de Tránsito en el Distrito Federal” en este se hace un análisis de los accidentes de tránsito en el año 2005 por Delegación y por intersección, así como una proyección en cada uno de estos utilizando herramientas de geo estadística, este es el documento más completo que se ha realizado en nuestro país y nos muestra la información con un mayor nivel de desagregación⁸¹.

Entre la información que se analizó y se tomó, del documento mencionado, para el diseño de nuestro modelo fue la siguiente:

- Densidades viales de algunos cruces importantes de la Ciudad de México, y con esta información pudimos validarla, contra la que se recopiló en campo.
- La información sobre los desplazamientos residencia-trabajo nos permitió conocer el sentido en donde se presenta la mayor cantidad de densidad de flujos vehiculares.
- Tasa de motorización y su incremento a través del tiempo y lo más importante la relación directa entre el número de vehículos por delegación, el número de accidentes registrados y la población, los cuales son directamente proporcionales.
- De la información analizada dedujimos que los accidentes de tránsito no son influenciados por el mes del año, es decir, no tienen una estacionalidad.
- La mayor cantidad de accidentes son por colisión, lo que tuvimos en cuenta al programar las características principales de los conductores y especificar los tipos de vehículos.
- Se tiene información georeferenciada en un 70% de los accidentes de tránsito y las principales características de estos, la cual podría ser utilizada para alimentar el modelo de geosimulación.
- En la mayor parte de los accidentes las perdidas únicamente son daños, por lo que son colisiones.
- El mayor valor que nos da este documento es que nos muestra la información a nivel de cruce, que nos permite identificar en donde se presenta la mayor cantidad de accidentes y son lugares en donde sería factible, por los resultados que nos podría arrojar, en donde se podría aplicar la metodología de geosimulación.

⁸¹ Luis Chías Becerril. “Diagnostico Espacial de los Accidentes de Tránsito en el DF”, CENAPRA, http://www.cenapra.salud.gob.mx/interior/Materiales_CONAPRA/Publicaciones_Especializadas/4_Diagnstico_espacial_de_los_accidentes_de_trxnsito_en_el_DF_-_PRELIMINAR.pdf, (Consultado Abril 2011).

Información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

El INEGI cuenta dentro de su sitio web (www.inegi.org.mx) con información sobre los accidentes de tránsito, se puede realizar consultas interactivas a través de la selección de diferentes variables, algunas de las consultas que realizamos, que consideramos de las más importantes son las mostradas en las tablas de la 2.20 a la 2.22⁸².

Número de accidentes por zona. En el año 2010 se registraron 427,267 accidentes de los cuales 398,091 (93%) correspondieron a zonas urbanas y 29,176 (7%) a zonas suburbanas.

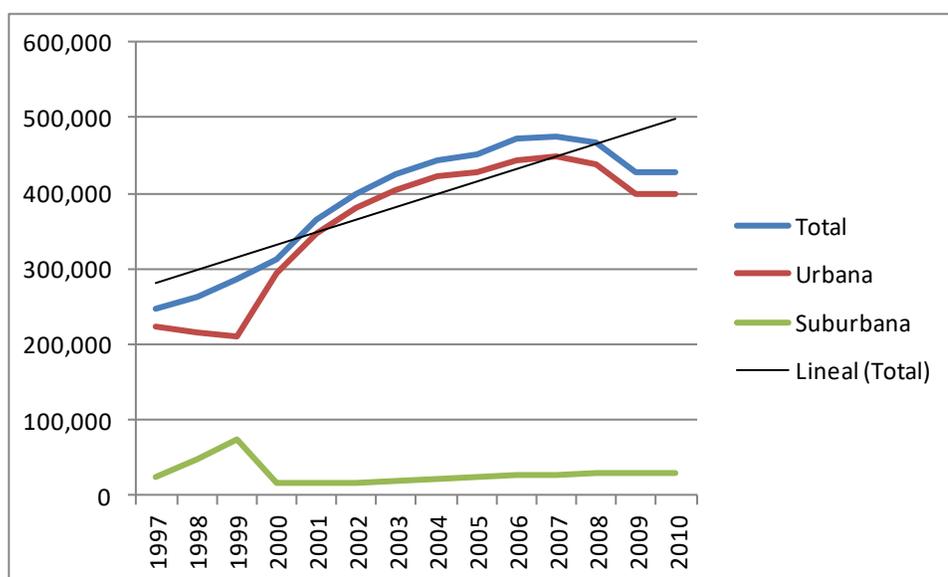


Figura 2.20. Número de accidentes por zona.⁸³

Causa del accidente. En el año 2010 se registraron 427,267 accidentes de los cuales 304,764 (71%) correspondió a colisión con vehículo automotor.

⁸²Instituto Nacional de Estadística y Geografía, "Estadística Accidentes de Tránsito", INEGI, http://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/proyectos/bd/continuas/transporte/accidentes.asp?s=est&c=13159&proy=atus_accidentes , (Consultado Marzo, 2012).

⁸³ Elaboración propia con información del INEGI.

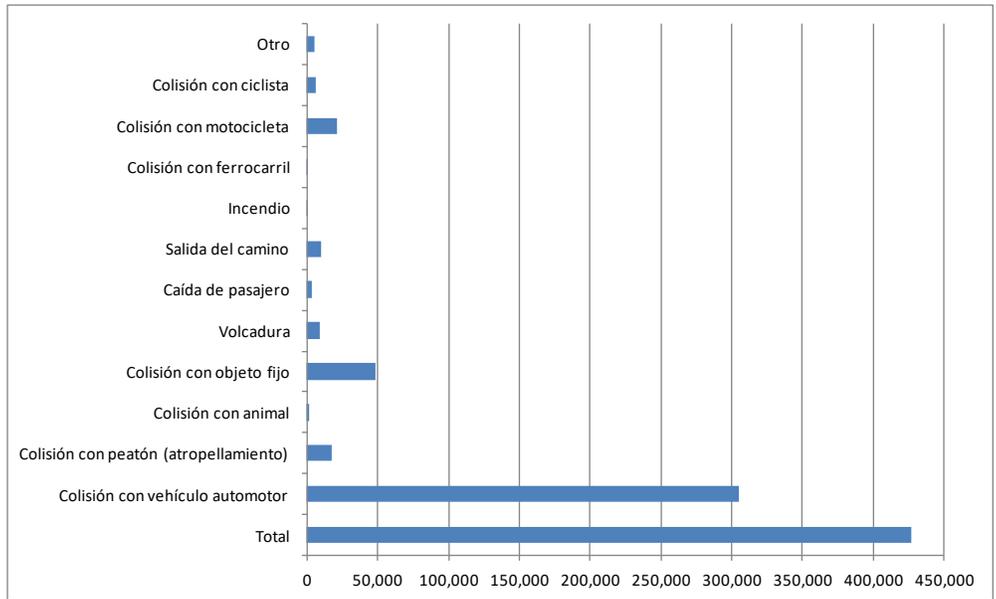


Figura 2.21. Causas de accidentes.⁸⁴

Tipo de accidente. De los 427,267 accidentes reportados en el año 2010, 327,262 (77%) fueron solo daños, 94,334 (22%) no fatales y 5,671(1%) fatales.

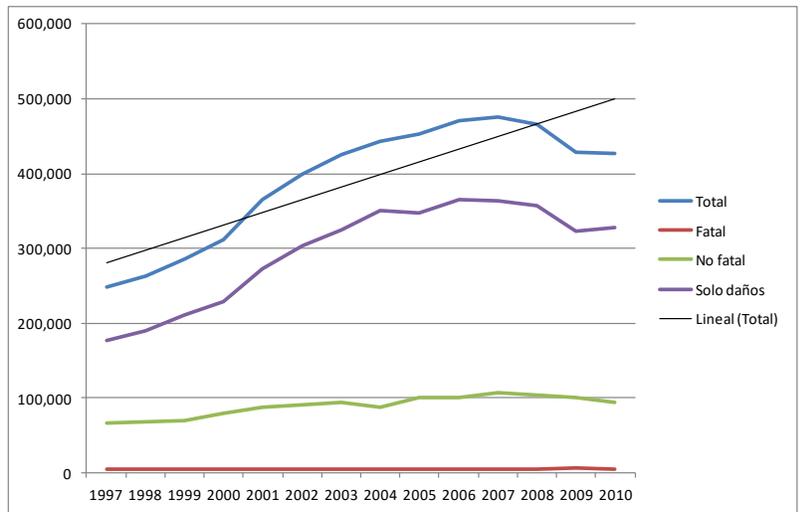


Figura 2.22. Tipos de accidentes.⁸⁵

⁸⁴ Elaboración propia con información del INEGI.

⁸⁵ Elaboración propia con información del INEGI.

Como podemos ver en las gráficas elaboradas, con información del INEGI, en las cuales se involucra la variable tiempo, en todas vemos una tendencia siempre a la alza. La situación vial que plantea la OMS es que en México existe un organismo enfocado a resolver este problema con presupuesto además de que cuenta con leyes para asegurar su reducción, entre otras cosas, pero si vemos la información de la CENAPRA y del INEGI, vemos que la tendencia de los accidentes es a la alza, con lo cual podemos inferir que el organismo y las leyes con que se cuentan, no han tenido un impacto significativo en la reducción de los accidentes.

Estrategia Nacional de Seguridad Vial 2011-2020.

En la Ciudad de México, en el mes de Mayo de 2011, se firmó una Estrategia Nacional, con la cual se pretenden reducir los accidentes de tránsito, en el periodo del 2011 al 2020, en un 50%, las bases de esta se mencionan en los párrafos siguientes.

En el portal de la Presidencia de la Republica se hizo el siguiente anuncio:

Ciudad de México, 12 de mayo del 2011.- El día de hoy el Presidente Felipe Calderón encabezó la cena con motivo del Lanzamiento de la Estrategia Nacional de Seguridad Vial 2011-2020, que se realizó en el Alcázar del Castillo de Chapultepec.

La Organización de las Naciones Unidas proclamó el periodo 2011-2020, como el “Decenio de Acción para la Seguridad Vial”, en un esfuerzo por reducir las cifras de víctimas de accidentes.

México se suma a esta iniciativa firmando un acuerdo entre las secretarías de Comunicaciones y Transportes y de Salud para la Estrategia Nacional de Seguridad Vial 2011-2020.

El acuerdo busca avanzar en ejes tan importantes como la gestión de la seguridad vial, el desarrollo de infraestructura y vehículos más seguros, la concientización de los usuarios y la mejora en la atención médica a quienes sufren accidentes.⁸⁶

⁸⁶ Presidencia de la República, “Lanzamiento de la Estrategia de Seguridad Vial 2011”, *Sitio Oficial de la Presidencia de la Republica*, <http://www.presidencia.gob.mx/2011/05/lanzamiento-de-la-estrategia-nacional-de-seguridad-vial-2011-2020/> , (Consultado Marzo, 2012).

En el portal del CENAPRA se hizo el siguiente anuncio con respecto a la Estrategia Nacional de Seguridad Vial:

El pasado lunes 6 de junio de este año, se dio a conocer la Estrategia Nacional de Seguridad Vial a través del Diario Oficial de la Federación. Esta estrategia tiene como objetivo la reducción en un 50% de las muertes ocasionadas por accidentes de tránsito, con esto, el gobierno mexicano capitaliza su adhesión al llamado internacional del Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020 convocado por las Naciones Unidas a través de la Organización Mundial de la Salud y la Organización Panamericana de la Salud.

La Estrategia propone 5 puntos de acción para la reducción de accidentes viales: mejor gestión de la seguridad vial mediante una serie de acciones multisectoriales en los diferentes órdenes de gobierno; evaluación y mejoramiento de la infraestructura vial y de transportes más segura; además, la verificación de vehículos más seguros; cambio de comportamiento de los usuarios de las vías de tránsito; y promover la mejora de los servicios de atención médica pre-hospitalaria e intra-hospitalaria, derivados de accidentes de tránsito. La Estrategia entró en vigor el martes 7 de junio de 2011.⁸⁷

En los siguientes párrafos hacemos un resumen de los puntos que consideramos más importantes que incluye la Estrategia Nacional de Seguridad Vial:⁸⁸

PRIMERA.- Coadyuvar en el fortalecimiento de la capacidad de gestión de la seguridad vial, a través de las siguientes actividades:

1. Promover la participación que corresponda a los tres niveles de gobierno entre sí, para implementar coordinadamente políticas o programas de seguridad vial, e involucrar a la sociedad civil, empresas y usuarios de las vías, en el desarrollo de estrategias nacionales, estatales y locales de seguridad vial que contengan metas e indicadores.
2. Promover la elaboración de un marco jurídico que permita sentar las bases para el establecimiento de las acciones y programas en materia de seguridad vial, así como los protocolos de coordinación para impulsar e instrumentar las políticas nacionales.

⁸⁷ Cenapra, "Estrategia Nacional de Seguridad Vial", http://www.cenapra.salud.gob.mx/interior/estrategia_nacional_de_seguridad_vial.html, (Consultado Marzo, 2012).

⁸⁸ Cenapra, "Estrategia Nacional de Seguridad Vial", http://www.cenapra.salud.gob.mx/descargas/estrategia_nacional_de_seguridad_vial/Estrategia_Nacional_06jun11.pdf, (Consultado Marzo, 2012).

3. Mejorar la calidad de los datos recolectados sobre la seguridad vial, a través de la operación del Observatorio Nacional de Seguridad Vial y de Observatorios Estatales y Municipales.
4. Fortalecer la capacitación e investigación en seguridad vial.

SEGUNDA.- Participar en la revisión de la modernización de la infraestructura vial y de transporte más segura, a fin de impulsar:

1. La creación y/o mejora de la normatividad relacionada con el establecimiento de los criterios de seguridad vial en la infraestructura para las etapas de planeación, diseño y construcción de nuevos proyectos y vías en funcionamiento tanto en carreteras como en vialidades urbanas.
2. La mejora de la seguridad de la infraestructura vial urbana e interurbana.
3. La aplicación de tecnología para la mejora de la gestión del tránsito en vías urbanas e interurbanas.
4. El desarrollo de una movilidad segura y equitativa para los usuarios vulnerables.

TERCERA.- Fomentar el uso de vehículos más seguros, para lo cual se plantean las siguientes acciones:

1. Incorporar las normas mínimas de seguridad de los vehículos de motor desarrolladas en el Foro Mundial de la Organización de las Naciones Unidas, para la Armonización de Reglamentos sobre Vehículos (WP 29), de forma que éstos logren al menos ajustarse a las normas internacionales mínimas.
2. Promover la elaboración y adecuación de marcos normativos que aseguren que los vehículos que circulan y se comercialicen en el país (construcción, ensamblaje e importación) cuenten con los elementos mínimos de seguridad.
3. Mejorar los esquemas operativos para la renovación del parque vehicular del servicio público federal de carga y pasaje.

CUARTA.- Mejorar el comportamiento de los usuarios de las vialidades incidiendo en los factores de riesgo que propician la ocurrencia de accidentes de tránsito, para lo cual se plantean las siguientes acciones:

1. Asegurar que la normatividad para la regulación de la movilidad y el tránsito considere la aplicación de medidas y programas para el control de los factores de riesgo.
2. Realizar campañas de comunicación que permitan sensibilizar e informar a la población sobre cada factor de riesgo contextualizadas a los diferentes grupos poblacionales y a las prioridades locales.
3. Promover el fortalecimiento de la imagen policial de tránsito, mediante la capacitación y programas de mejora continua además de su incorporación a las campañas informativas.
4. Asegurar el efectivo cumplimiento de la legislación por parte de los usuarios de las vías mediante la aplicación de intervenciones y controles basados en evidencia científica sobre cada uno de los principales factores de riesgo (no uso de cinturón de seguridad en todos los ocupantes, no uso de sistemas de retención infantil, conducción bajo la influencia de alcohol, no uso de casco de seguridad en motocicletas y bicicletas, conducción a velocidades inadecuadas y uso de distractores al conducir).

QUINTA.- Fortalecer la atención del trauma y de los padecimientos agudos mediante la mejora de los servicios de atención médica pre-hospitalaria y hospitalaria a través de:

1. La revisión y en su caso adecuación del marco normativo, en materia de atención pre-hospitalaria.
2. La elaboración e implementación de guías de práctica clínica y protocolos de manejo que permitan mejorar la calidad de la atención médica pre-hospitalaria y hospitalaria.
3. El desarrollo, promoción e implantación de programas de capacitación para el personal de salud, responsable de la atención médica pre-hospitalaria y hospitalaria.
4. Analizar, proponer y en su caso implantar esquemas innovadores que permitan apoyar el financiamiento de la atención, rehabilitación e integración de las víctimas derivadas de accidentes de tránsito.
5. Fortalecer las acciones del Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes, promoviendo la participación de autoridades de los tres niveles de gobierno, así como de

la sociedad civil, organizaciones no gubernamentales y usuarios de la red carretera federal y vialidades urbanas.

Si comparamos las recomendaciones que hace la OMS con la Estrategia Nacional para la Prevención de Accidentes, los cinco puntos de esta última coinciden con las recomendaciones de la OMS, por lo que a partir del surgimiento de esta Estrategia se deberán de tomar las medidas necesarias para que se reduzcan los accidentes de tránsito, ya que el seguimiento de las recomendaciones de la OMS que se han dado no han ayudado a reducir el número de accidentes de tránsito en México. Con respecto a este punto y dado que no hay avances, en México, en la reducción de los accidentes, la estrategia vial muy probablemente no será implementada y como consecuencia no habrá avance en esta materia.

Algunas notas publicadas por algunos organismos y medios de comunicación se muestran en los siguientes párrafos, las cuales nos proporcionan datos adicionales sobre el estado de la seguridad vial en México.

“Las aseguradoras estiman que al año suceden 4 millones de siniestros viales, es decir, 457 cada hora, esto también representa 40 mil discapacitados, más de 3 millones de lesionados al año y 5 mil peatones arrollados”, dijo Arturo Cervantes, titular del Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes. Cervantes aseguró que de no revertirse esta situación, en menos de una década los decesos se elevarán a 35 mil al año". Por lo que si no se toman medidas preventivas la tendencia es a la alza.

“En 2009 ya se registraban 17 mil decesos, en 2010 se elevó a 24 mil, en menos de una década aumentarán a 35 mil; esto en términos económicos significa pasar de gastar 126 mil millones a 350 mil millones de pesos”, sostuvo.

Cervantes comentó que, a pesar de que México será sede de la iniciativa mundial Década de Acciones por la Seguridad Vial, que se llevará a cabo el 11 mayo de 2011, el Poder Legislativo aprobó, únicamente a la prevención de “esta epidemia”, alrededor de 50 millones de pesos, es decir, menos de 40 centavos por mexicano.

Ante Ángel J. Martínez, director general del Centro de Experimentación y Seguridad Vial, Cervantes explicó que dos de cada tres muertes por estos percances en el mundo ocurren en 10 países, y México ocupa el séptimo lugar debido al poco interés de fortalecer los presupuestos: “Estados Unidos invierte de 3 a 4 dólares per cápita, Canadá de 7 a 8 dólares, y en Europa llega

hasta los 40 dólares”. Pero además, destacó, recientes estudios efectuados en 2 mil 500 municipios revelan que en 130 se concentra 80% de los accidentes y muertes como consecuencia de conducir bajo los efectos del alcohol, sobre todo las noches de jueves a sábado, a partir de las 6 de la tarde.

Además de los costos directos, Cervantes destacó que “cada persona que muere en el país deja de producir más de 4 millones de pesos; multipliquen esto por los 24 mil muertos, cuyas edades oscilan entre 15 y 20 años, principalmente, aunque también se considera a los miles de niños que no son adecuadamente protegidos con cinturón de seguridad”. Al firmar la iniciativa mundial, México espera reducir 50% los accidentes y muertes, para evitar un gasto de 350 mil millones de pesos, “que pueden destinarse a alimentar y educar a la población pobre por más de un año”, concluyó Cervantes.

Los 10 países con mayor índice de siniestros y muertes son China, Estados Unidos, India, Rusia, Brasil, Irán, México, Indonesia, Sudáfrica y Egipto. En México las 10 entidades donde se concentra la mayoría de las lesiones por accidente son Baja California, Tamaulipas, Quintana Roo, Aguascalientes, Nayarit, Sonora, Colima, Distrito Federal, Jalisco e Hidalgo.⁸⁹

Se estima que al año se gastan 120 mil millones de pesos como consecuencia de estos accidentes.

A partir de 2011 arranca la década de seguridad vial decretada por la OMS. México adquirió el compromiso de reducir en 50 por ciento la siniestralidad en vialidades.

Una de las medidas clave es la alcoholimetría, "si observamos de un año para otro, 15, 16 hasta 24 por ciento menos choques esto nos hace darnos cuenta que aplicando este tipo de medidas, podríamos alcanzar la meta del 50 por ciento de reducción mucho antes" dijo, Arturo Cervantes, secretario técnico del Consejo Nacional para la prevención de accidentes.⁹⁰

Con el fin de evitar accidentes de tránsito provocados por el abuso en el consumo de bebidas alcohólicas, se han invertido más de 80 millones de pesos en el Programa Nacional de Alcoholimetría.

⁸⁹ Milenio Diario, “Accidentes viales causan 24 mil fallecimientos al año en México”, *Milenio Diario*, <http://www.milenio.com/node/580099>, (Consultado Noviembre, 2010).

⁹⁰ Noticieros Televisa, “Gasta México 120 mil mdp al año por accidentes de tránsito”, *Noticieros Televisa*, <http://www2.esmas.com/noticierostelevisa/investigaciones-especiales/...>, (Consultado Diciembre, 2010).

México disminuirá 60 mil muertes por accidentes de tránsito en 10 años.

México está comprometido a reducir en 60 mil el número de muertes por accidentes de tránsito en un periodo de 10 años, para lo cual se han establecido actividades concretas y programadas para abatir esta epidemia en lo que se denomina “Una década de acciones por la seguridad vial 2011-2020”.

Durante la inauguración del Primer Foro Nacional de Buenas Prácticas en Seguridad Vial en la ciudad de Acapulco, Guerrero, el subsecretario de Prevención y Promoción de la Salud, Dr. Mauricio Hernández Ávila, señaló que “la obesidad, los problemas asociados al consumo del alcohol y las lesiones por accidentes de tránsito y demás lesiones de causa externa, representan temas en salud prioritarios en México, que la Secretaría de Salud está atendiendo con acciones concretas”.

El funcionario destacó los trabajos que se exponen en este evento como “muestra de la labor que realizan los tres niveles de gobierno (federal, estatal y municipal), las organizaciones no gubernamentales (ONGs) y la sociedad civil en general para contribuir en la prevención de accidentes de tránsito, los cuales tienen un origen multifactorial y, por lo tanto, su prevención debe realizarse desde todos los ámbitos de nuestra sociedad”.

Organizado por la Secretaría de Salud, en coordinación con la Organización Panamericana de la Salud y la Secretaría de Salud de Guerrero, este foro tiene el propósito de integrar un banco de acciones documentadas y probadas que contribuyan en la prevención de los accidentes de tránsito.

Durante dos días (30 de septiembre y primero de octubre), representantes de los tres niveles de gobierno, organizaciones no gubernamentales y sociedad civil, exponen en el puerto de Acapulco las 24 mejores iniciativas en seguridad vial que se realizan en México.

“El objetivo de este foro es exponer, identificar y seleccionar aquellas acciones en seguridad vial que se ejecutan en nuestro país, facilitar el intercambio de experiencias y lecciones aprendidas y crear un banco de buenas prácticas en seguridad vial, con el propósito de que, luego de haberse comprobado su eficacia y documentado sus procesos, sean replicables por otras entidades”, explicó Hernández Ávila.⁹¹

⁹¹ Cenapra, “México disminuirá 60 mil muertes por accidentes de tránsito en 10 años”, *Cenapra*, http://www.cenapra.salud.gob.mx/CENAPRA_2010/buenas_practicas/menos_60_mil_muertes.html, (Consultado Septiembre, 2011).

El secretario de Salud, Salomón Chertorivski, alertó que en la temporada de fiestas decembrinas los accidentes automovilísticos y muertes aumentan entre 10 y 15 por ciento, en especial por consumo de alcohol y distractores como contestar el celular. Expuso que cada año se registran casi dos millones 600 mil choques, que van de leves a mortales, por lo que llamó a la población a tomar precauciones y acatar los consejos para prevenir estos lamentables hechos.

De acuerdo con datos oficiales, indicó, en promedio mueren cada año alrededor de 20 mil personas en las calles, avenidas y carreteras de México, de las cuales más de 12 mil 673 viajaban dentro de un vehículo automotor como ocupantes, mientras que 5 mil 500 fallecieron por atropellamiento. Acompañado por el secretario técnico del Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes (Conapra), Arturo Cervantes, y el director general de la Asociación Mexicana de Instituciones de Seguros (AMIS), Recaredo Arias, el funcionario anunció que en el año 2012 se pondrá en marcha el Semáforo de Siniestros, que coordinarán estos organismos. Al detallar que por primera vez en México se tendrá un seguimiento certero de los accidentes automovilísticos cada trimestre a través de este semáforo, enfatizó que las causas de los accidentes se pueden evitar ciento por ciento pues todos son prevenibles. Citó como ejemplo que se previene si se utiliza el cinturón de seguridad, no se contesta el celular cuando se maneja y no se consumen bebidas alcohólicas, pero no sólo para conducir sino también para caminar, pues el beber quita sensibilidad para el peligro, provoca caídas y las personas tienen accidentes en la vía pública. Informó que de acuerdo con datos del CENAPRA, 53 por ciento de los 32 millones de conductores de vehículos en circulación usan cinturón, 15 por ciento guían bajo la influencia del alcohol, 26 por ciento usan silla porta infante, y sólo 69 por ciento de los motociclistas usan casco de seguridad.

Chertorivski detalló que del total del parque vehicular que reporta el INEGI, sólo 8 millones están asegurados, casi 700 mil sufren un siniestro y 94 por ciento de los accidentes ocurren en las zonas urbanas y semiurbanas.

Al referir que México ocupa el séptimo lugar en accidentes en el mundo y el segundo en América Latina, indicó que debido a los accidentes en las calles, avenidas y carreteras, mueren cerca de 18 mil personas, 40 mil quedan con discapacidades permanentes y el costo que le representa al país es entre 1.3 y 1.5 por ciento del PIB.

El compromiso internacional de México es lograr reducir los accidentes 50 por ciento en los próximos 10 años, meta que han fijado las Naciones Unidas, pues se considera a los accidentes

como una epidemia, ya que al año mueren más de un millón 300 mil personas y más de 50 millones sufren heridas o discapacidad.⁹²

De acuerdo a la información que nos proporcionan los tres organismos oficiales, la situación de la seguridad vial en México es la siguiente:

De acuerdo a la información presentada previamente, las condiciones que se han tomado, en México, con el fin de reducir los accidentes de tránsito son las siguientes:

1. Existe un órgano rector, con presupuesto financiado por el gobierno, encargado de recopilar la información en relación a la seguridad vial y lo más importante tomar acciones que propicien su reducción.
2. Existe una estrategia nacional de seguridad vial, mencionada anteriormente, financiada por el gobierno y con objetivos medibles, la cual busca disminuir en 60 mil muertes por accidentes de tránsito en 10 años, lo que representa el 50 por ciento la siniestralidad en las vialidades.
3. Existe legislación sobre velocidades establecidas, consumo de alcohol y conducción, uso del casco en motocicletas, cinturón de seguridad y uso de sistemas de retención para niños, pero su aplicación está por debajo de la media de la severidad con que se debería de aplicar.
4. A los fabricantes de autos se les exige ciertas normas en la fabricación de autos, que ofrecen mayor seguridad, en caso de accidentes, a sus ocupantes.
5. Existen auditorias de la infraestructura vial existente.
6. Sistema de atención pre hospitalario, formal y a disposición del público.

⁹² Periódico Zócalo, "Alerta SSA sobre aumento de accidentes en fiestas decembrinas", <http://www.zocalo.com.mx/seccion/articulo/alerta-ssa-sobre-aumento-de...>, Periódico Zócalo, (Consultado Diciembre, 2011).

Los resultados que se han conseguido en la reducción de los accidentes de tránsito, con estas medidas son los siguientes:

1. México ocupa el séptimo lugar en número de accidentes de tránsito en el mundo.
2. Los datos oficiales son diferentes de los estimados, por lo que se requiere tener un sistema de información que reporte realmente la severidad del problema.
3. En el 2010 se registraron 24 mil decesos con un gasto de 126 mil millones.
4. No hay promoción del transporte alternativo.
5. Motorización con tendencia a la alza, el 66% son automóviles particulares.
6. La tasa de accidentabilidad va al alza, así como los heridos y el número de muertos hasta el año 2010.
7. La mayor parte de los accidentes son en zonas urbanas (93%).
8. El 77% de los accidentes son daños.
9. La mayor cantidad de víctimas mortales son los ocupantes de vehículos de 4 ruedas, un 68%.
10. El Estado con mayor cantidad de accidentes es Nuevo León.
11. La mayor parte de los accidentes suceden en las zonas urbanas (97%).
12. El 1% de los accidentes son fatales.

De acuerdo a las cifras anteriores vemos que los esfuerzos por parte de las autoridades en el incremento de la seguridad vial en nuestro país no ha tenido el efecto que se pudiera esperar.

¿Cómo ayudaría la geosimulación en el logro de la meta de reducir los 60 mil muertos en 10 años?

El modelo dinámico basado en la geosimulación, presentado en este trabajo, podría ayudar a lograr este objetivo de la siguiente manera:

1. A través de este se podría evaluar el efecto de cada uno de los factores sobre la generación de los accidentes de tránsito, y de esta manera poder poner énfasis en la legislación que lo regule.
2. Se pueden hacer un simulaciones, en zonas y vías en donde se tengan registrados la mayor cantidad de accidentes, con el fin de conocer las causas que los originan y poder tomar medidas para su reducción, esto es posible realizarlo con las herramientas tradicionales que se han mencionado, pero no de manera directa, como lo sería con la geosimulación.
3. La ventaja de esta técnica es que se considera el aspecto espacial, se guardan las relaciones de tamaño y forma y el hacerlo con la técnica basada en agentes, nos permite que se apegue a la realidad.
4. Es posible simular grandes extensiones, como una Delegación completa, lo que permitirá que se incluya la mayor cantidad de factores que influyen en la generación de los accidentes.

Las acciones realizadas en los últimos meses fue el lanzamiento de un programa con el fin de fortalecer una cultura vial lo que se publicó en los principales diarios de la Ciudad de México el Viernes 17 de Agosto del 2012 fue lo siguiente:

“ACUERDO. Chertorivski, titular de Salud; Fernando Suinaga, presidente de Cruz Roja Mexicana; Carlos Slim Domit, presidente de Escudería Telmex, y José Abed, presidente de la FIA México, firmaron un compromiso de seguridad vial para 2011-2020.

En México 16 mil personas mueren anualmente por accidentes de tránsito, lo que ubica al país como el séptimo en el mundo con esa problemática. Salomón Chertorivski Woldenberg, secretario de Salud, explicó que este fenómeno deja un millón de lesionados y 40 mil personas con discapacidad permanente, con un costo de 150 mil millones de pesos, entre gastos directos e

indirectos. Durante el arranque de la campaña “Pilotos por la seguridad vial”, en el Autódromo Hermanos Rodríguez, el responsable de la Secretaría de Salud (SSA) dijo que también representa la primera causa de muerte y orfandad entre los menores entre 5 y 14 años. Además, aclaró, 90% de estas cifras se podrán evitar con “medidas sencillas”. El presidente Felipe Calderón Hinojosa, quien encabezó la ceremonia, refrendó el compromiso de su gobierno para disminuir los accidentes viales, y adelantó que buscan reducir los decesos anuales a 3 mil. Indicó que, para aminorar el fenómeno, se han mejorado las carreteras del país; se invirtió en 280 unidades de revisión de autos en carreteras; entregó 500 equipos de alcoholímetro a los estados; promueve el uso de radares para detectar altas velocidades y mantiene operativos de la Policía Federal Preventiva, con 10 mil elementos. La iniciativa de “Pilotos por la seguridad” cuenta con el apoyo de la Fundación Carlos Slim, la Escudería Telmex y la Cruz Roja Mexicana; y contempla que pilotos mexicanos, como Checo Pérez, Benito Guerra, Leslie Gómez, Luis Chapulín Díaz, Memo Rojas y Esteban Gutiérrez orienten a jóvenes en universidades, además de que se transmitirán campañas en medios de comunicación que promuevan conductas responsables. Así, Salomón Chertorivski; Fernando Suinaga Cárdenas, presidente nacional de Cruz Roja Mexicana; Carlos Slim Domit, presidente de la Escudería Telmex y José Abed, presidente de la Federación Internacional de Automovilismo (FIA) México, firmaron la promesa 2089, “Fortaleciendo la Acción Humanitaria Local”, que los compromete a seguir el Programa de Seguridad Vial 2011-2020. En el evento, donde también manejó un auto de carreras, Calderón Hinojosa recordó las reglas a seguir para conducir con seguridad, como usar cinturón de seguridad, o casco en motocicletas y bicicletas, y no conducir bajo los efectos del alcohol o drogas. La Cruz Roja Mexicana informó que como parte de la promesa se aplicarán los cinco pilares del decenio de acción: gestión de la seguridad vial, vías de tránsito y movilidad más seguras, vehículos y usuarios más seguros y respuesta tras los accidentes.

Continuidad:

Fernando Suinaga, en entrevista con EL UNIVERSAL, dijo que con el apoyo de la benemérita institución y la iniciativa privada se garantiza que el programa siga vigente hasta 2020, cuando se espera una reducción de 50% en estos accidentes. “Nuestro primer objetivo es

salvar vidas, si logramos reducir los heridos viales, podremos invertir nuestros recursos en otras cosas para ayudar a más mexicanos”, comentó.”⁹³

De la publicidad sobre el programa de la seguridad vial se ha visto la impresión del símbolo de este programa en el recibo de pago, este se ha detectado únicamente en una caseta de pago de Atizapán de Zaragoza, este se muestra en la figura 2.23.



Figura 2.23. Recibo de pago con la impresión del símbolo del programa de seguridad vial 2011-2020.⁹⁴

2.6. Factores que originan los accidentes de tránsito.

El objetivo de esta sección es explicar algunas teorías relacionadas con la generación de los accidentes de tránsito, para incluir los comportamientos de los elementos que intervienen en los accidentes de tránsito en el modelo; esto sin perder el enfoque dinámico que sucede cuando se presentan estos.

La manera en cómo se explican cada uno de los elementos es de manera individual y la forma en cómo afectan el proceso complejo en que se generan los accidentes de tránsito. En las secciones anteriores se explicaron los elementos que intervienen en los accidentes y en esta parte se describen a detalle cada uno de estos.

En el modelo dinámico, que se diseñó en este trabajo, estas características se incluyeron en cada una de las clases que forman los elementos del modelo y posteriormente al ejecutar los

⁹³ El Universal, “Va gobierno federal por una cultura vial”, Periódico El Universal, <http://www.eluniversal.com.mx/notas/864885.html>, (Consultado Diciembre, 2011).

⁹⁴ Ticket de caseta proporcionado en la caseta de Atizapán de Zaragoza, (Agosto, 2013).

agentes, hacen que estas afecten en la generación de los accidentes. Esta es una de las ventajas que nos ofrece la modelación basada en agentes.

La mayor parte de estos conceptos se tomaron del libro: *Fundamentos de la Seguridad Vial* de Truyols Mateu y Sampredo Rodríguez⁹⁵ y *Los Accidentes de Tránsito*, por Juan Martín Hernández Mota⁹⁶, se tomó como referencia este debido a que no existen mucha literatura en torno a los factores que generan los accidentes de tránsito.

En el tránsito de vehículos los riesgos de participar en un accidente, se encuentran siempre latentes dadas las exigencias de movilidad de las personas. El problema de la inseguridad en la circulación de vehículos va más allá de la negligencia o la decisión de tomar conductas temerarias que desatiendan las normas de circulación establecidas. Y si bien es cierto, que una gran cantidad de accidentes tiene su origen en las aptitudes y actitudes de las personas, también es cierto que la vía y el vehículo aportan una importante cuota en el origen de los accidentes, además de los factores del ambiente que se presentan, por ejemplo en una cadena de colisiones producidas por la presencia de hielo y nieve en la carretera, al encontrarse reducida la visibilidad y el suelo resbaloso.

Investigaciones sobre accidentes llevadas a cabo en diversos países coinciden en que son tres los elementos fundamentales que propician los accidentes de tránsito: el hombre, el vehículo y la carretera⁹⁷. El elemento ambiental lo relacionan directamente con el estado de la vía o con las capacidades visuales de las personas, ante factores atmosféricos externos e incluso, a las variaciones de la estabilidad del vehículo debido a la presencia de factores climáticos adversos.

Existen otros elementos o factores que intervienen en la generación de los accidentes de tránsito, que de acuerdo con la literatura que se ha revisado hasta esta parte, no son tan influyentes como los mencionados en el párrafo anterior, estos son factores como: la corrupción, la no aplicación de las leyes, que se incluyó en el modelo al no establecer ningún límite para algunas variables, el clima como la lluvia, etc.

En la tabla 2.13. Se muestra un resumen de las principales causas de los accidentes de tránsito.

⁹⁵ Sebastián Truyols Mateu Y Ángel Sampredo Rodríguez, *Fundamentos de la seguridad vial*, (Madrid España: Delta Publicaciones, 2010).

⁹⁶ Juan Martín Hernández Mota, *Los Accidentes de Tránsito, Manual Básico de Investigación de Hechos de Tránsito Terrestre*, (México: Flores Editor y Distribuidor, S.A. de C.V., 2010).

⁹⁷ Juan Martín Hernández Mota, *Los Accidentes de Tránsito, Manual Básico de Investigación de Hechos de Tránsito Terrestre*, (México: Flores Editor y Distribuidor, S.A. de C.V., 2010).

Tabla 2.13. Causas de los accidentes.⁹⁸

Atribuibles al conductor	Atribuibles al vehículo	Atribuibles al camino	Atribuibles a los agentes naturales y a otras causas en general
Imprudencia. Velocidad excesiva. Invadió carril contrario. Rebaso indebidamente. No respeto señal de alto. No cedió el paso. No guardo distancia de seguridad. Mal estacionado. Estado de ebriedad. Bajo efecto de drogas. Adormilando. Deslumbramiento.	Llantas. Frenos. Dirección. Suspensión. Luces. Ejes. Transmisión. Sobrecupo o sobrecarga. Exceso de dimensiones.	Irrupción de ganado. Desperfecto del camino. Falla de señales. Mojado. Resbalado.	Lluvia. Granizo. Objetos en el camino. Nieve. Niebla o humo. Tolvanera. Vientos fuertes. Otros.

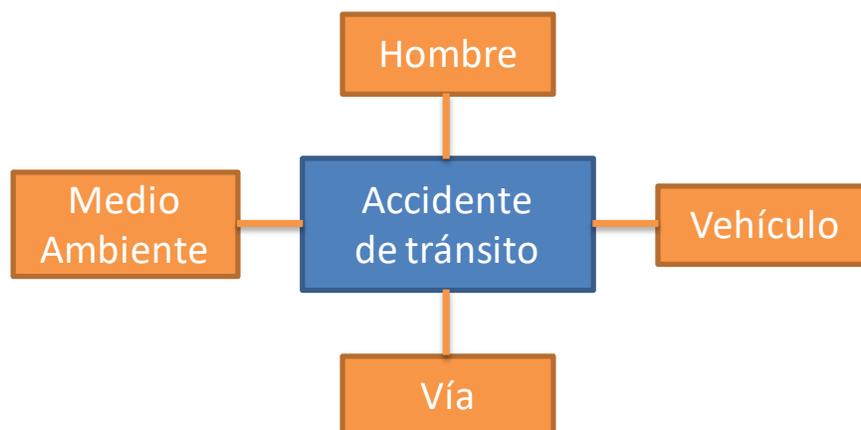


Figura 2.24. Elementos que intervienen en la generación de los accidentes de tránsito.⁹⁹

⁹⁸ Instituto Mexicano del Transporte, Anuario Estadístico de Accidentes en Carreteras Federales 1996, *IMT*, <http://www.imt.mx/Espanol/Accidentes/documento.html>, (Consultado Enero, 2011).

⁹⁹ Juan Martín Hernández Mota, Los Accidentes de Tránsito, *Manual Básico de Investigación de Hechos de Tránsito Terrestre*, (México: Flores Editor y Distribuidor, S.A. de C.V., 2010): 47.

2.6.5. El hombre.

2.6.5.1. El factor humano.

Uno de los principales y más frecuentes factores que propician el desarrollo del accidente de tránsito son las actitudes y aptitudes de las personas, que con sus decisiones generan el tan evocado error humano.

Para poder conducir un vehículo de motor es indispensable encontrarse en pleno uso de sus facultades físicas y mentales. Los conductores no deben presentar síntomas de fatiga, entendiéndose como fatiga los efectos del sueño o cansancio físico o psíquico, que impiden de alguna manera estar alerta a los imprevistos del camino. Aunado a lo anterior la conducción no debe ser negligente ni temeraria, lo que pondría en riesgo la vida de las personas y de sus bienes.

En consecuencia, dos son las causas humanas que dan origen a un accidente de tránsito: motivos por conductas asumidas y motivo mecánico sensorial.

Motivos por conductas asumidas.

El estado mental psicológico: psicosis, enfermedades congénitas y familiares, trastornos de personalidad, síndromes cerebrales crónicos, trastornos psico neuróticos, trastornos psicofisiológicos, crisis compulsivas, etc., pueden ser causa de un accidente de tránsito.

Motivo mecánico sensorial.

En el aspecto neurológico y de motricidad, que pudiera comprender: las lesiones de cráneo y conmociones cerebrales, meningitis crónica, epilepsia, temblores, falta de coordinación, espasmos, fallas en el sistema nervioso motor y motricidad, etc., también tienen que ser analizadas.

Tabla 2.14. Causas humanas que originan los accidentes de tránsito¹⁰⁰

Causas por la conducta	Causas mecánico-sensoriales
Alcoholismo	La vista
Drogas	Defectos visuales
Sueño	La agudeza visual
Enfermedades mentales	Visión periférica
Depresión, ira	Visión nocturna
Sobrevaloración de actitudes	Deslumbramiento
Inexperiencia o impericia	Juicio de distancia
	Defectos orgánicos

2.6.5.2. Alcoholismo.

El alcoholismo es uno de los estados causados por conducta que más provocan accidentes de tránsito y dependiendo del grado de alcoholemia (los miligramos de alcohol que existen en un litro de sangre) son el tipo de efecto y de accidente que puede ocasionar.¹⁰¹

Inicio de la zona de riesgo, alcoholemia de 0.3 a 0.5 g/l.

Excitabilidad emocional.

Disminución de la agudeza visual y de la capacidad de juicio.

Relajación y sensación de bienestar.

Deterioro de los movimientos oculares.

Zona de alarma, alcoholemia de 0.8 a 1.5 g/l.

Reacción general lenta.

Alteraciones de los reflejos.

Comienzo de la perturbación motriz

Euro fobia en el conductor, distención y bienestar.

Tendencia a la inhibición emocional.

Comienzo de la impulsividad y agresividad al volante.

¹⁰⁰ Álvarez F.J. Del Rio, "Causas que originan los accidentes de tránsito", Revista Española de Investigaciones Quirúrgicas, número 1, (Diciembre, 2013): 32.

¹⁰¹ Maycock G., "Drinking and Driving in Great Britain – a review", Studio TRL, (Enero, 1997): 22.

Conducción peligrosa, alcoholemia 0.8 a 1.5 g/l.

Estado de embriaguez importante

Reflejos muy perturbados y lentificación de las respuestas.

Pérdida del control preciso de los movimientos.

Problemas serios de coordinación.

Dificultades de concentración de la vista.

Disminución notable de la vigilancia y precepción del riesgo.

Conducción altamente peligrosa, alcoholemia de 1.5 a 2.5 g/l.

Embriaguez neta con posibles efectos narcóticos y confusión.

Cambios conductuales imprevistos, agitación psicomotriz

Fuertes perturbaciones psico sensoriales y notable confusión mental.

Vista doble y actitud titubeante.

Conducción imposible, alcoholemia arriba de 3.0 g/l.

Embriaguez profunda.

Estupor con analgesia y progresiva inconsciencia.

Abolición de los reflejos, parálisis e hipotermia

Puede desembocar en coma.

Las drogas más frecuentes que se asocian a la conducción son alcohol, opiáceos (heroína), cannabis, éxtasis y anfetaminas. Mientras que las drogas depresoras del sistema nervioso, el cannabis o los opiáceos, disminuyen la capacidad de reacción del conductor, su concentración y los reflejos, las sustancias estimulantes, como las anfetaminas, la cocaína o el éxtasis generan una falta de sensación de control en la conducción. El resultado es descoordinación, falta de reflejos y dificultades para ver y oír. Por otra parte, las drogas alucinógenas como el LSD cambian la percepción de la realidad y producen visiones imaginarias.

En general los principales efectos de los medicamentos en la conducción son: trastornos de somnolencia, visuales (visión borrosa o doble) y alteraciones neuromusculares y en el sentido del equilibrio. Además algunos producen un retraso en el movimiento de las extremidades. Todos estos efectos se multiplican si el conductor en tratamiento ha consumido además alcohol. Los medicamentos que más efectos tienen sobre la conducción son los antihistamínicos, los

ansiolíticos, los antidepresivos clásicos, los anti psicóticos y los indicados para la enfermedad cardiovascular.

Sin duda, los efectos de las drogas y algunos medicamentos alteran el correcto rendimiento mental, la toma adecuada de decisiones y la buena coordinación psicomotora.

En líneas generales, se estima que al menos el 80% de todos los accidentes de tráfico son atribuibles al factor humano, entre cuyas causas principales está conducir bajo efectos del alcohol y otras drogas.¹⁰²

2.6.5.3. La visión.

En lo referente a los ojos y visión: la agudeza visual, visión nocturna, campos visuales, hemianopsias, escatimas, afaquias, desalojamiento del ojo, trastornos de la movilidad palpebral, reflejos pupilares, desiguales pupilares o daltonismo, impiden la conducción del vehículo.

2.6.5.4. La vista.

En la conducción de un vehículo, la mayor parte de la información concebida es de tipo visual, lo que implica que la capacidad visual de las personas adquiera una importancia fundamental en las causas de un accidente de tránsito. En las causas de un accidente puede influir la visión periférica, la visión de los colores, la resistencia al deslumbramiento, la recuperación y el juicio de distancia o percepción de profundidad.

Agudeza visual.- Consiste en la capacidad para ver detalles finos de un objeto. Hay dos tipos de agudeza visual que son importantes en las emergencias de tránsito y de carreteras: la agudeza visual estática y la dinámica, la primera se presenta cuando ambos conductor y objeto, se encuentran inmóviles; la segunda, es la capacidad del conductor para detectar claramente los objetos que tienen un movimiento relativo, no necesariamente en su línea directa de visión (cono visual entre 3° a 12°). Los conductores verán claramente los objetos dentro de este cono, pero los que están fuera los verán borrosos.

Visión periférica.- Es la capacidad visual que permite ver más allá del cono de visión de mayor claridad y aunque la presencia del objeto se detecta, no es posible ver mayores detalles de ellos. Por ejemplo dar un vistazo al espejo retrovisor o lateral permite observar los objetos en

¹⁰² Juan Martín Hernández Mota, Los Accidentes de Tránsito, *Manual Básico de Investigación de Hechos de Tránsito Terrestre*, (México: Flores Editor y Distribuidor, S.A. de C.V., 2010): 59.

torno al vehículo, pero no sus detalles finos. Con la visión periférica el cono visual se extiende a cerca de los 160°.

Visión de los colores.- Es la capacidad para diferencia entre un color y otro, muy poco frecuente pero se pudiera presentar en personas con daltonismo que llegan a confundir la luz de un semáforo.

Resistencia al deslumbramiento.- La disminución de la visibilidad por la incidencia de una fuente luminosa directamente en el ojo. Por ejemplo las luces de un vehículo en circulación contraria, o la luz del sol a determinadas horas del día pueden provocar un accidente. El tiempo de recuperación pudiera llegar a tiempos tan prolongados dentro de un rango de 3 a 6 segundos.

Percepción de la profundidad.- La deficiencia en la estimación de la velocidad y la distancia a la que se encuentra un objeto acarrea graves problemas, por ejemplo, en una maniobra de rebase, ya que el conductor no tiene una idea clara de si podrá adelantar a un vehículo a tiempo antes de colisionar con otro que viene en sentido contrario.

2.6.6. El vehículo.

El diccionario nos dice que: vehículo, es un medio de transporte. Automóvil, vehículo movido por un motor y ruedas. Entonces, entendemos como vehículo a un motor que nos transporta de un sitio a otro, dotado de motor y ruedas, diseñado para circular por zonas preparadas para ello.

Los vehículos en la actualidad cuentan con grandes adelantos tecnológicos, son máquinas complejas que han alcanzado un elevado grado de perfección. Pocas son las diferencias esenciales entre uno y otro, prácticamente todos tienen los mismos componentes funcionales.

El estado del vehículo es una de las causas principales de accidentes debido a los siguientes factores:

- Estado de los frenos.
- Estado de los sistemas de iluminación.
- Funcionamiento del estado de los limpiadores del parabrisas.
- Estado de los neumáticos.
- Estado de espejos retrovisores.
- Estado de la suspensión.
- Dirección del vehículo.

2.6.7. La vía.

De la vía depende la estabilidad y la respuesta del vehículo y la forma de conducir de sus tripulantes. Las carreteras al igual que los vehículos han ido evolucionando con el tiempo, actualmente los diseños carreteros son ideados para determinadas velocidades, los antiguos caminos vecinales no respondían a ninguna planeación, solo eran útiles para determinados vehículos de carga y no para altas velocidades, el objetivo principal era la comunicación entre dos lugares. En la actualidad se realizan proyectos de grandes carreteras que buscan la reducción de los tiempos de recorrido, con relativa comodidad entre un sitio y otro.

Las modernas carreteras se encuentran diseñadas con ciertos topes de velocidad máxima, establecidos en función de criterios de seguridad, evitando de esta manera que la carretera sea un factor propiciador de accidentes. La estimación de los límites máximos de circulación responde primordialmente a que sobrepasa la limitación, el riesgo de accidente se incrementa. Se construyen tomando en cuenta estudios detallados sobre las características del suelo, sus propiedades mecánicas, de trazo necesario, de material disponible, de puntos obligados de conexión y del tipo de camino que se desea y por si fuera poco, considerando el impacto ambiental que genere su construcción.

Una carrera puede ser de primer orden si contiene cuatro carriles para la circulación de vehículos; de segundo orden si tiene tres carriles y de tercer orden si tiene dos carriles. Cuanto más importante es su orden, mayores suelen ser sus comodidades, tales como: superficies amplias, pendientes suaves, pocas curvas y las que se encuentran, con amplios radios de curvatura, pavimento en buenas condiciones, múltiples señalamientos horizontales y verticales.

Numerosos estudios se han realizado en este ámbito, con el objeto de determinar los efectos producidos por diferentes elementos de diseño y su importancia relativa en el origen de un accidente de tránsito, dado que la seguridad es una consideración primordial en el esquema de las carreteras, las consecuencias de este seguirán siendo un asunto de permanente interés forense.

Las carpetas de rodamiento de las carreteras contemplan factores importantes de diseño como: trazo horizontal y vertical, anchura de la corona, taludes, cunetas y acotamientos, la resistencia de su superficie a las cargas que transitaran sobre ella, adherencia aun en condiciones meteorológicas desfavorables, con buena visibilidad, y de ser posible un buen paisaje (impacto ambiental).

Por otra parte la adherencia neumática calzada, se encuentra relacionada también con los proyectos de construcción de la carretera misma que tienen que ver con las condiciones de seguridad del camino frente a situaciones imprevistas de frenado.

El diseño de una vialidad contempla elementos, tales como: volumen de tránsito vehicular, elementos para una circulación o flujo vehicular eficiente, equipamiento reglamentario de control de tránsito, sección de aceras, secciones de carriles, secciones de vegetación, velocidades de circulación, dispositivos peatonales y para personas discapacitadas, etc.

Con el fin de ver la calidad de la vía se emplea un parámetro denominado índice de riesgo, que se obtiene multiplicando el número de vehículos que circulan al día por un tramo y los accidentes ocurridos en él en un periodo de tiempo determinado, habitualmente un año.

Los tramos más peligrosos se concentran en carreteras convencionales de calzada única, con intersecciones al mismo nivel y con densidad de tráfico por debajo de los 10,000 vehículos por día.

En contraste con el hecho de que los tramos con mayor densidad de tráfico presentan índices de riesgo muchos menores, ya que suelen coincidir con vías de mayor calidad que además eliminan el riesgo de invasión del carril contrario durante los adelantamientos por tratarse de calzadas separadas por sentido.

Dentro de estos tramos con índices de accidentabilidad muy acusados, existen los llamados puntos o tramos de alta accidentabilidad, es decir, puntos kilométricos perfectamente definidos donde se producen la mayoría de los accidentes dentro de este tramo. Como causas de la elevada accidentabilidad de estos puntos, podemos señalar básicamente el ser intersecciones al mismo nivel donde se advierte la obligación de efectuar un “stop”, o bien problemas debidos a un mal diseño de la carretera en cuestión.

Para la eliminación o mejora de estos puntos de alta accidentabilidad podemos señalar en primer lugar una solución evidente, la supresión del enlace al mismo nivel por otro a distinto nivel o una mejora sustancial de las características del trazado, soluciones caras en relación a veces con la importancia de la vía. Mientras esta solución no sea llevada a cabo, existe la posibilidad de aumentar notablemente la señalización de esta zona.

2.6.7.1. Señales.

Un elemento de la vialidad importante son las señales, como todo signo que comunica algo. Las señales con sus colores, formas, diseños, letras y dibujos constituyen el lenguaje del camino por donde circula.

Las marcas en la superficie de rodamiento, los dispositivos luminosos, las señales verticales, los conos, los movimientos e instrucciones de un oficial de tránsito, son señales de atención de conducción. Dichas señales informan, previenen, advierten, dan seguridad, recuerdan, indican, restringen la circulación, guían, etc.

Las señales son un lenguaje gráfico sencillo y fácil de interpretar que sustituye al lenguaje oral, y se colocan estratégicamente a lo largo del camino.

Sin embargo hay por lo menos cinco razones por las cuales los conductores no obedecen las señales:

- Insuficiente tiempo para observarlas por realizar recorridos a elevadas velocidades.
- Deciden no respetar la señal.
- Interposición de objetos que obstruyen la visibilidad.
- Ignorancia para la interpretación de la señal.
- Falsa percepción de que desobedeciendo la señal estarán aun seguros.

2.6.7.2. Topes.

Los topes son construidos por la municipalidad por los siguientes motivos:

- Disminuir coactivamente las altas velocidades que adquieren los vehículos en un tramo de camino con restricciones.
- Proveer áreas de tránsito lento en zonas de alto flujo peatonal.
- Proteger zonas vulnerables de alta accidentabilidad.
- Suministrar temporalmente una zona de resguardo peatonal.

Construcciones que en la práctica funciona muy poco. Los topes son hijos de la mala educación en el manejo de un vehículo, ya que la función del tope es disminuir la velocidad del automóvil, pero gracias a su mal diseño y a la falta de señalizaciones para evitar accidentes, son la causa misma de ellos.

Los topes son elementos de revancha que tiene el ciudadano de a pie ante la poca o nula educación vial y más parecen trampas mortales que elementos eficientes de control de velocidad y tránsito.

2.6.8. El medio.

2.6.8.1. Las condiciones ambientales.

Las condiciones climáticas juegan un papel relevante en la producción de accidentes. El calor, el viento, la lluvia, la presencia de nieve, la neblina, la oscuridad, modifican sustancialmente condiciones tan importantes, como la adherencia de los neumáticos en la carretera o intervienen en la visibilidad del conductor o la iluminación del ambiente.

El medioambiente que circunda el flujo vial en determinado tramo del camino, también es factor en la ocurrencia de los choques. El más común es el estado del tiempo. Todas las redes viales pueden funcionar de manera óptima en condiciones soleadas, temperatura agradable y cielos despejados. Las condiciones meteorológicas adversas pueden contribuir a choques en las carreteras, por ejemplo, el pavimento mojado reduce la fricción entre el neumático y el pavimento.

Muchas colisiones graves han sido producto de la nieve, la niebla o el granizo, y que en estas circunstancias si los conductores circulan a altas velocidades cuando hay niebla en el camino, no alcanzan a distinguir a tiempo a los vehículos que están adelante; con presencia de hielo, las pequeñas irregularidades o baches son rellenas, produciendo una superficie lisa que reduce considerablemente la fricción entre el neumático y la vía.

En un medioambiente adverso, las solicitudes al neumático son extremas, todo es crítico para la circulación del vehículo.

- La velocidad debe de ser ajustada a las condiciones del camino para permitir una marcha segura y un mejor agarre de la goma del neumático.
- Si la capa de agua, nieve, granizo o lodo es gruesa, el dibujo del neumático es insuficiente para desalojar rápidamente.
- Se incrementa la probabilidad de un derrape transversal.
- La carga vertical que soportan las ruedas, se vuelve de pronto en un peligro potencial, por las propiedades inerciales de su masa y la disminución de la fricción.

2.6.8.2. La velocidad.

Para algunas personas la velocidad es una especie de adicción que los vuelve irreflexivos en la conducción. Continuamente cambian el rol vehículo-herramienta, por el de hombre-herramienta del vehículo. El auto es un ingenio creado para el beneficio de la humanidad y sin embargo en muchas ocasiones se ha vuelto su desgracia, al asumir los conductores actitudes como si fueran parte del vehículo. El hombre no gobierna, es gobernado por el vehículo, y éste decide la velocidad en que debe ser conducido.

La física demuestra que para detener un vehículo que circula a 80 km/hr con neumáticos nuevos y vía en buen estado, es necesaria una distancia de 30 metros como mínimo. Dramáticamente se observa que el hombre considera al vehículo como un apéndice más de su cuerpo que responde a su voluntad y eso no es cierto. Detener una masa de 1,500 kg que se proyecta velozmente a una velocidad de 80 km/hr, no es nada fácil, no en vano los estudiosos del fenómeno accidento lógico otorgan a la conducción a alta velocidad el primer lugar en la génesis de la producción de los accidentes.

La conducción imprudente que implica alta velocidad, repercute en los siguientes factores:

1. Aumenta considerablemente los riesgos de pérdida de control del vehículo.
2. Poca o nula detección de situaciones anormales que pueden desencadenar en un accidente debido al efecto túnel.
3. Reduce el espacio de maniobra para evitar el peligro.
4. Aumenta la distancia recorrida antes de ejecutar una maniobra evasiva.
5. Suprime drásticamente la eficiencia de los sistemas de seguridad pasiva que ofrece su auto.
6. Incrementa la gravedad de sus lesiones o daños materiales.
7. Aumenta el consumo de combustible.
8. Incrementa la probabilidad de fallo humano.
9. Incrementa los índices de accidentalidad.

2.6.8.3. Obstáculos visuales.

El obstáculo visual es un objeto físico que impide a los usuarios de la vía una correcta apreciación de las condiciones en las que circula. Árboles o vegetación, letreros de negocios, vehículos estacionados cerca de las esquinas o en las laterales del camino, quioscos de revistas, el local ambulante, etc., todos ellos representan un peligro para una adecuada visión frontal u oblicua. La incidencia alarmante de colisiones en intersecciones tiene su génesis en la deficiente visibilidad, por ejemplo, fue obstruido por la rama de un árbol el semáforo o porque se ocultó con cualquier otro objeto la señal de alto.

Los cruces o intersecciones figuran entre los sitios en donde se producen gran cantidad de accidentes de tránsito. El diseño geométrico de un cruce implica que variadas trayectorias de peatones o vehículos confluyan en un punto, pudiendo en determinado momento entrar en conflicto. En áreas urbanas de grandes concentraciones poblacionales el volumen de movimientos de tránsito en las intersecciones es caótico y se corrige con la colocación de diversas señalizaciones verticales y horizontales que guían a peatones y conductores a seguir una trayectoria segura, no obstante, la falta en la observación de una señal puede llevar a la producción de un accidente.

La distancia visual que dispone el usuario de la vía (peatón o conductor), cuando se acerca a una intersección es determinante en la evitabilidad del accidente. La habilidad para poder ver el tránsito de otra vialidad diferente a la que circula, depende de una línea de visión oblicua nítida. Cuando las edificaciones u otros objetos se interponen visualmente entre la vialidad por donde se circula y la otra que confluye en la intersección, dificultarán la maniobra para reducir la velocidad o detener el vehículo a tiempo. La visibilidad es importante en la seguridad vial.

Los obstáculos que con más frecuencia se hacen presentes en el origen del accidente de tránsito son:

- Obstrucción de la banqueta peatonal por vehículos estacionados a los laterales del camino que impiden observar posibles irrupciones intempestivas de peatones en la vía.
- Semáforos tapados por ramas de árboles.
- Tapar la señal de alto o preferencia con pintura u otro objeto.

- Interponer objetos en la trayectoria de peatones (anuncios, vehículos, vegetación, etc.) que les impiden observar la señal de siga peatonal.

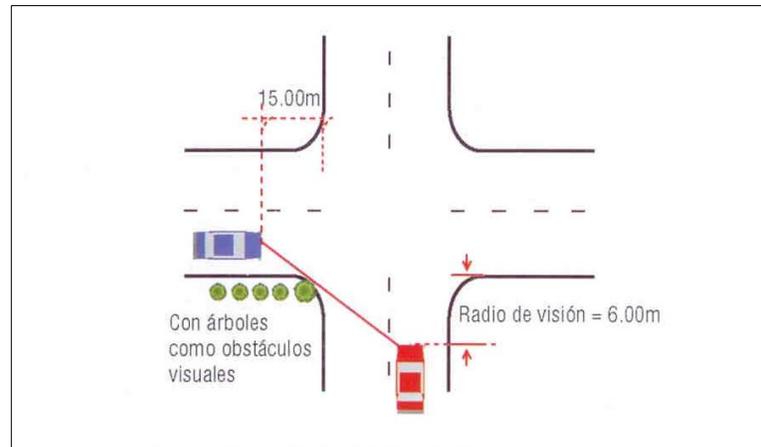


Figura 2.25. Los árboles impiden tener una visibilidad clara.¹⁰³

2.7. Teoría de la evolución de los accidentes de tránsito.

La teoría de la evolución del accidente de tránsito, parte de presupuestos de naturaleza psicológica, en donde, el aspecto conductual y habilidades de percepción del individuo determinarán su grado de participación en el fenómeno accidentó lógico.

Por si misma esta teoría no puede explicar concretamente cómo se produjo un accidente y tiene que ser complementada con el análisis de los otros factores que pudieron presentarse al momento de la colisión. También es cierto, que en una gran cantidad de casos se tienen pocos datos objetivos en los cuales soportar la investigación, aquí es donde entra en acción el modelo, mismo que define claramente las situaciones previas al accidente en donde, uno o los conductores involucrados pudieron obrar de manera diferente a como lo hicieron, y sobre todo si estuvieron vigentes esas distancias y tiempos necesarios para poder evitarlo.

Esta teoría se basa en que los accidentes de tránsito se pueden describir o suceden a través de tres variables: el espacio que es el lugar en donde sucede, el tiempo que son los tiempo en que sucede cada etapa y la posición que son los diferentes puntos en los cuales se encuentran los vehículos.

¹⁰³ Juan Martín Hernández Mota, Los Accidentes de Tránsito, *Manual Básico de Investigación de Hechos de Tránsito Terrestre*, (México: Flores Editor y Distribuidor, S.A. de C.V., 2010): 107.

Esta teoría refuerza el enfoque que estamos utilizando, de que los accidentes de tránsito no son procesos simples, los cuales no pueden ser representados por modelos que no adecuados para representar procesos complejos, que existen una serie de factores que intervienen los cuales no son simples de representar, que es lo que estamos mostrando a través de nuestro modelo dinámico basado en geosimulación.

Evolución del accidente de tránsito.

Espacio.

Es el tramo de camino donde se presenta el accidente y contempla diversas áreas que al investigador le permiten la reconstrucción del hecho, estas áreas están definidas por el momento de percepción del peligro y la reacción del conductor, el área en donde empiezan a funcionar los mecanismos de detención del vehículo, el área de la colisión, el área de las trayectorias pos colisión y el área de la posición final.

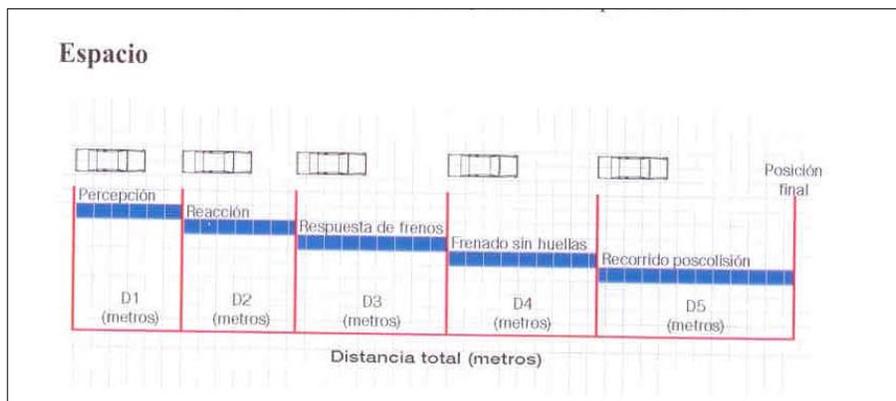


Figura 2.26. Espacio en donde sucede un accidente.¹⁰⁴

¹⁰⁴ Juan Martín Hernández Mota, Los Accidentes de Tránsito, *Manual Básico de Investigación de Hechos de Tránsito Terrestre*, (México: Flores Editor y Distribuidor, S.A. de C.V., 2010): 138.

El tiempo.

Es aquel durante el cual se desarrolla todo el accidente, abarcando los tiempos de percepción y reacción en las personas, respuesta de estímulos mecánicos en el vehículo, durante la colisión, consumo de energía de movimiento.

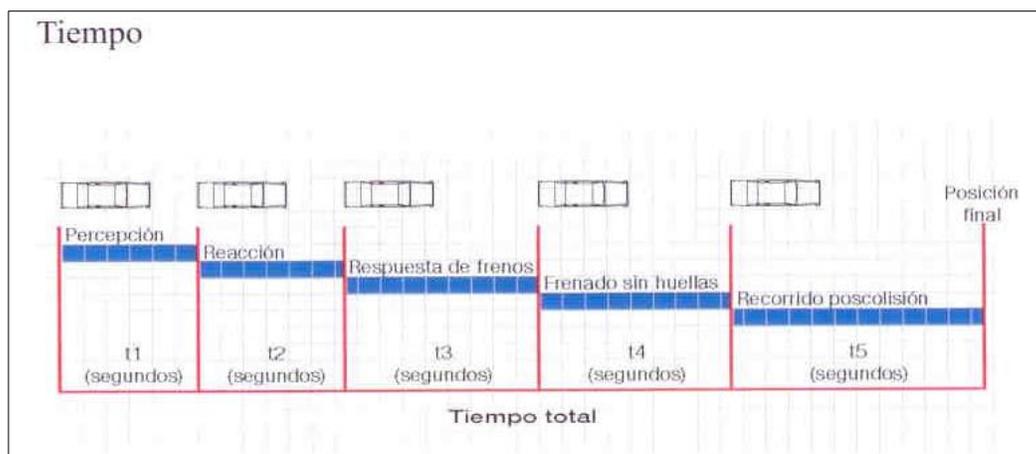


Figura 2.27. Tiempo en que sucede un accidente.¹⁰⁵

La posición (puntos).

Es el lugar en donde se encontraban los móviles durante todo el desarrollo del evento. La posición determina lugares específicos como: el punto de contacto, el punto de percepción, el de reacción, inicios de maniobras evasivas, posición final, etc.

Durante el desarrollo del accidente se presentan dos elementos muy importantes en cómo se presenta el accidente y son la atención, la percepción y la reacción.

¹⁰⁵ Juan Martín Hernández Mota, Los Accidentes de Tránsito, *Manual Básico de Investigación de Hechos de Tránsito Terrestre*, (México: Flores Editor y Distribuidor, S.A. de C.V., 2010):139.

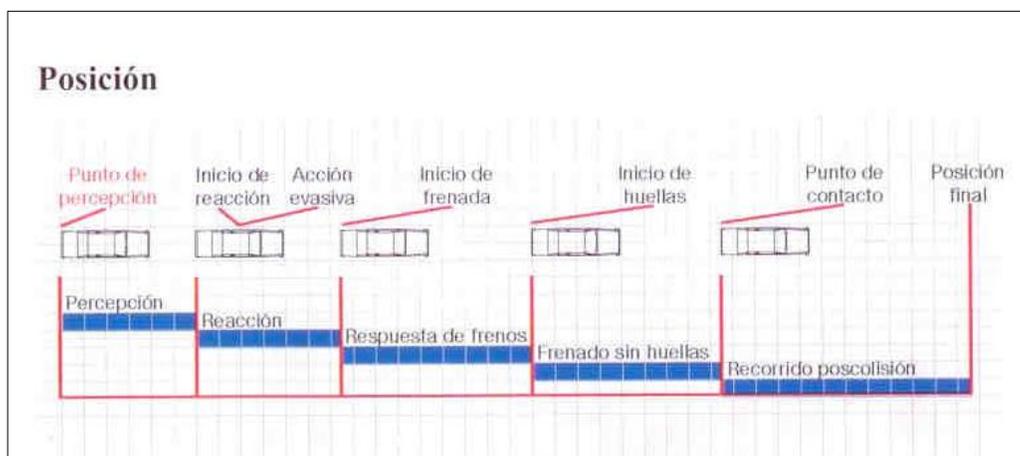


Figura 2.28. Posición en donde sucede un accidente.¹⁰⁶

La atención.

Estamos bajo un continuo bombardeo de innumerables estímulos que compiten por ganar nuestra atención. La atención es el proceso psicológico mediante el cual se elige solo una parte de los estímulos disponibles.

Percepción y reacción.

Al conducir se recibe una carga elevada de información visual que permite a los conductores interactuar con su entorno.

Durante la conducción de un vehículo se va procesando información que se evalúa continuamente con la finalidad de tomar una decisión que conlleva una respuesta.

En términos generales, se pueden distinguir tres fases principales que conforman el tiempo de respuesta al estímulo recibido:

1. La fase que corresponde concretamente al procesamiento de la información que proviene del estímulo captado.
2. La fase que corresponde al procesamiento racional de la información captada.
3. La fase de decisión que se relaciona con el criterio de respuesta de cada persona.

¹⁰⁶ Juan Martín Hernández Mota, Los Accidentes de Tránsito, *Manual Básico de Investigación de Hechos de Tránsito Terrestre*, (México: Flores Editor y Distribuidor, S.A. de C.V., 2010):139.

En la conducción de un vehículo la percepción depende de la experiencia. Evaluar un estímulo y catalogarlo como un posible evento peligroso, requiere de un adiestramiento que solo se adquiere con una cotidianidad del manejo. Una persona adulta por su experiencia en el manejo evalúa más rápidamente que una situación puede desencadenar en un hecho lamentable. Mientras que una persona novata en la conducción tarda más tiempo en valorar el riesgo. Caso contrario en la reacción, la persona adulta tarda más tiempo en reaccionar, aun cuando evaluó más rápidamente el riesgo por los desgastes naturales en la tonicidad muscular.

Una de las dificultades que se enfrenta para conocer la evolución de un accidente es determinar las habilidades y la capacidad de percepción del conductor o el peatón ante los diversos estímulos visuales que se encuentran en el camino.

Durante la percepción se presenta los siguientes puntos que forman parte del desarrollo del accidente:

1. Punto de percepción posible.

Es aquel punto en donde de acuerdo con la visibilidad disponible y las características geométricas del camino hubieran permitido a un conductor haberse dado cuenta de la presencia de un obstáculo u anomalía dentro de la carretera.

2. Punto de percepción real.

Es aquel punto donde el conductor se percata realmente de la anomalía en la circulación e inicia su reacción defensiva ante el peligro.

Tiempo de reacción.

El momento de inicio de la percepción se presenta en el instante que dentro del campo visual observamos algo que nos llama la atención y finaliza cuando tomamos conciencia de que algo puede suceder. Su duración media es de 0.25 a 0.5 segundos.

Una vez recibido el estímulo de la situación anormal en el tránsito vehicular o peatonal, la persona debe decidir una acción que le permita salir del riesgo. El tiempo empleado entre la recepción del estímulo y la implementación de la acción evasiva, recibe el nombre de tiempo de reacción y se encuentra dentro de los siguientes rangos:

Edad (años)	Día	Noche	Noche y con vehículo deslumbrador
18 – 25	0.5 s	0.8 s	1.0 s
26 – 40	1.0 s	1.3 s	1.5 s
41 – 55	1.5 s	1.8 s	2.0 s
56 - ...	2.0 s	2.3 s	2.5 s

Tabla 2.15. Tiempos de reacción en un accidente de tránsito.¹⁰⁷

Durante este tiempo se presenta el tercer punto importante durante el accidente:

3. Punto de decisión.

Pasado el tiempo de percepción-reacción, se inicia el proceso intelectual que decidirá la acción a realizar. Sumadas la percepción y la reacción podremos conocer retrospectivamente la localización del PPR.

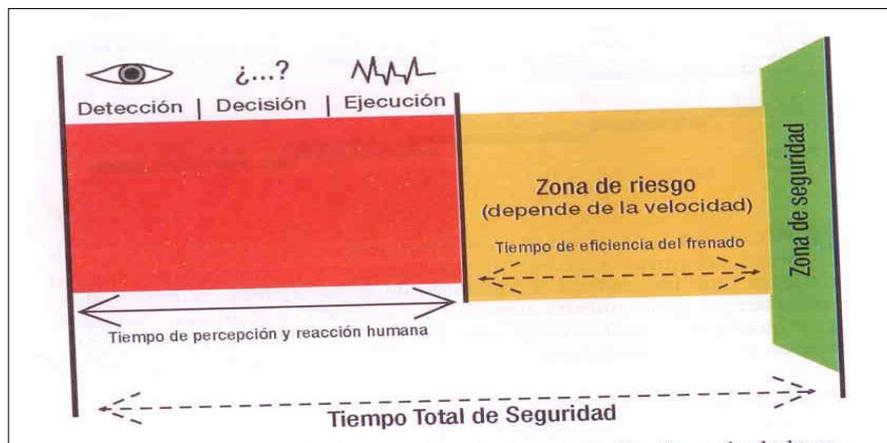


Figura 2.29. Diagrama de percepción de un accidente.¹⁰⁸

¹⁰⁷ Juan Martín Hernández Mota, Los Accidentes de Tránsito, *Manual Básico de Investigación de Hechos de Tránsito Terrestre*, (México: Flores Editor y Distribuidor, S.A. de C.V., 2010): 145.

¹⁰⁸ Juan Martín Hernández Mota, Los Accidentes de Tránsito, *Manual Básico de Investigación de Hechos de Tránsito Terrestre*, (México: Flores Editor y Distribuidor, S.A. de C.V., 2010):146.

Maniobras evasivas.

Ante la colisión inminente, los conductores o los peatones realizan acciones para evitar o aminorar los daños y las posibles lesiones, entre las que se encuentran:

- Frenado, disminución drástica de la velocidad para minimizar las consecuencias de colisión.
- El giro del volante en el conductor o el regreso del peatón a una zona que considera de seguridad, ambas maniobras pueden originar mayores daños.
- En caso de ser predecible la posible trayectoria del obstáculo, aumento de la velocidad.
- Tocar el claxon o prender las luces, dejando la realización de la evasión a la otra persona, no es recomendable en ningún momento.
- En el peatón: girar y retroceder o correr.

Áreas de maniobra.

Es la zona en donde se realiza la maniobra evasiva, donde se determinará si esta fue exitosa, disminuyo los resultados de la colisión o los magnifico.

Durante esta área se presentan los siguientes puntos del desarrollo del accidente:

1. Punto clave (PC).

En este punto cualquier maniobra que se realice no evitará la colisión.

2. Punto de colisión o de conflicto (PCO).

Lugar de relevancia primordial en la investigación, el punto de conflicto nos indicará el sitio donde los móviles se encontraron.

Los restos orgánicos, manchas hemáticas, arañazos, escurrimientos de líquidos, indicios de proyección de polvos, vidrios, metales u otros componentes de los vehículos nos permitirán inferir con cierta precisión sobre este punto, de aquí parten las diferentes mediciones que son de utilidad en la reconstrucción del accidente.

Etapas de la colisión.

- a. Inicio de contacto: es el punto donde ambos cuerpos se tocan y las fuerzas de la colisión empiezan a manifestarse.
- b. Máximo enganche: en este punto las fuerzas llegan al límite superior de su intensidad. Los materiales estructurales del vehículo ya no penetran más, las fuerzas internas contrarrestan el efecto de la fuerza principal de impacto (FPI).
- c. Desenganche: las fuerzas de la colisión cesaron, empiezan a separarse los vehículos y cada uno sigue su propio camino o quedan unidos.

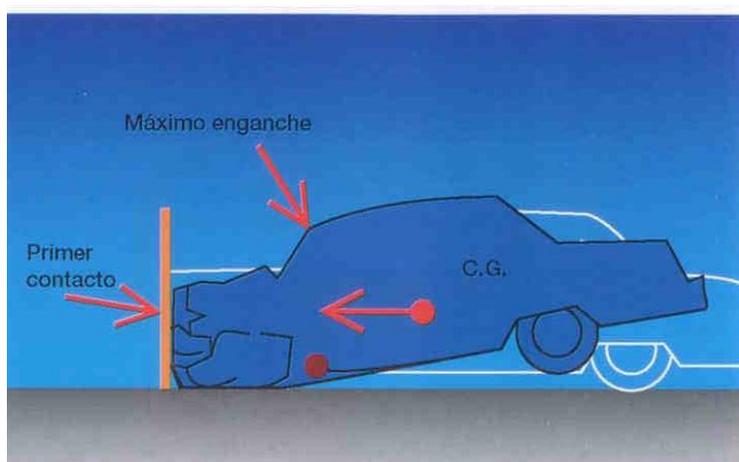


Figura 2.30. Puntos de contacto de un accidente¹⁰⁹

Trayectorias pos colisión.

Una vez que los cuerpos interactuaron en el punto de conflicto (PCO), cada uno sigue su propia trayectoria la cual responde a la intensidad de las fuerzas de impacto involucradas en la colisión. Estas trayectorias son el resultado de que la deformación de los cuerpos no fue suficiente para consumir la energía cinética de los móviles, quedando un remanente que produjo un desplazamiento después del choque hasta que la energía cesó.

¹⁰⁹ Juan Martín Hernández Mota, Los Accidentes de Tránsito, *Manual Básico de Investigación de Hechos de Tránsito Terrestre*, (México: Flores Editor y Distribuidor, S.A. de C.V., 2010): 146.

Posición final.

Es el lugar de descanso de los móviles después de la colisión. Todas las energías y fuerzas que se manifestaron en la colisión se consumieron. La dinámica de la colisión ha terminado.

Consideraciones adicionales.

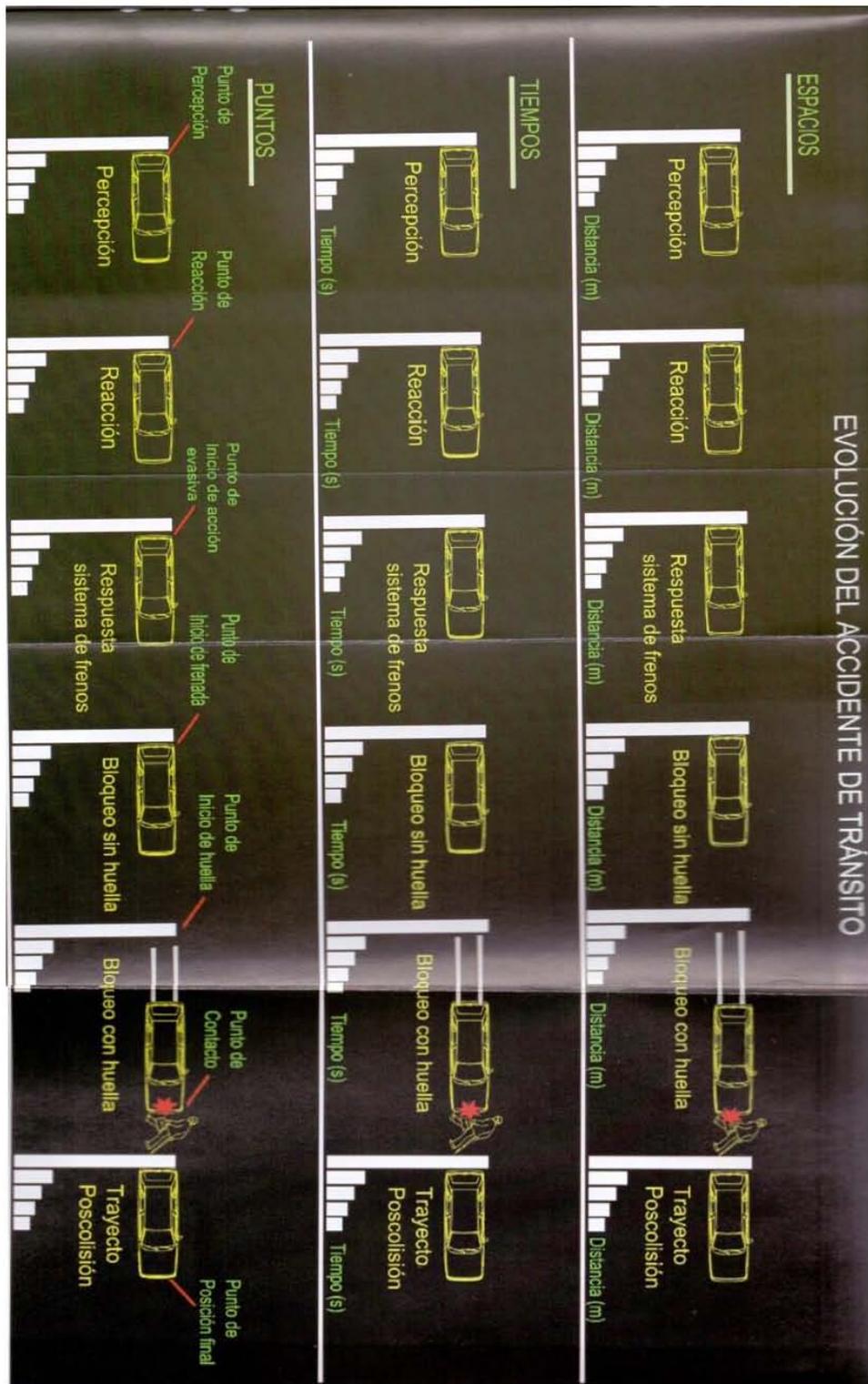
La distancia existente entre el punto de percepción posible (PPP) y el punto de percepción real (PPR), establece la deficiencia en la atención de los conductores al frente de su circulación. Entre mayor sea la distancia entre estos, más patente será la desatención o la deficiencia en la percepción.

Si el punto clave (PC) se encuentra antes del punto de percepción posible (PPP), el accidente es inevitable.

La reconstrucción del accidente y los cálculos para establecer los tiempos transcurridos y las distancias recorridas, se harán tomando en cuenta la velocidad máxima permitida en ese tramo del camino. Si los resultados son desfavorables para el conductor, podremos entonces afirmar que la velocidad antirreglamentaria fue el factor decisivo en el desarrollo del accidente.¹¹⁰

¹¹⁰Juan Martín Hernández Mota, Los Accidentes de Tránsito, *Manual Básico de Investigación de Hechos de Tránsito Terrestre*, (México: Flores Editor y Distribuidor, S.A. de C.V., 2010): 147.

Figura 2.31. Diagrama de la evolución de un accidente.¹¹¹



¹¹¹ Juan Martín Hernández Mota, Los Accidentes de Tránsito, *Manual Básico de Investigación de Hechos de Tránsito Terrestre*, (México: Flores Editor y Distribuidor, S.A. de C.V., 2010):149.

Al final de este capítulo podemos concluir lo siguiente:

- a. El problema de los accidentes de tránsito puede ser atacado utilizando la metodología de la ciencia llamada geografía a través de su sub disciplina denominada geografía de la accidentabilidad de las vías, la cual los visualiza como procesos complejos, que suceden cuando se realiza el movimiento de productos o personas de un lugar a otro, con espacio temporalidad definida no azarosa y prevenibles.
- b. La manera en cómo se deben de definir los accidentes de tránsito, es desde la perspectiva sistémica, la cual nos dice que son provocados por una serie de elementos los cuales intervienen de manera conjunta en un proceso complejo, lo que nos da el soporte para representarlos a través de un modelo dinámico, el cual basa su funcionamiento en la teoría de la complejidad.
- c. México ocupa el séptimo lugar en el mundo, por muertes provocadas por accidentes de tránsito, existe un plan a nivel nacional, presupuesto federal y una serie de legislaciones para la reducción de estos, sin embargo esto no ha dado resultado, ya que la tendencia de estos y de las lesiones que ocasionan siguen con una tendencia a la alza, la mayor parte de los accidentes se dan en las zonas urbanas y un uno por ciento son fatales. El modelo puede ayudar en el logro de los resultados, al permitirnos evaluar los diferentes efectos que se tendrían con el cambio de los parámetros de las variables consideradas en la generación de estos, por ejemplo se puede cuantificar el impacto en la reducción de los accidentes con la disminución en la velocidad de algunas vías, en donde se podría poner más énfasis en lograr esto, se pueden evaluar el efecto de las diferentes legislaciones, que tratan de regular las condiciones de los accidentes, mediante el cambio de los parámetros mencionados, entre otras cosas. Con los modelos tradicionales estáticos es posible hacer esto, pero no de manera directa.
- d. En la revisión de las teorías y de la literatura que se ha hecho hasta este punto, como el enfoque sistemático que hace la OMS sobre los accidentes de tránsito, podemos decir que los elementos que más influyen en la generación de los accidentes de tránsito y que deben de ser incluidos, en cualquier modelo de accidentes son: el conductor, la vía y el vehículo, los cuales deben de tener características diferentes y deben de operar dentro de un sistema en donde las acciones y comportamiento de estos formen un sistema complejo en donde

todos interactúen. No se debe de perder el enfoque sistémico del proceso en el cual se generan.

Esta hoja se dejó en blanco de manera intencional

Capítulo 3

La geosimulación y la modelación basada en agentes

Contenido

3.1. ¿Qué es la geomática?.....	134
3.2. ¿Qué es GIS&T?.....	135
3.3. ¿Qué es la geosimulación?.....	138
3.4. Geosimulación como modelos basados en objetos.....	143
3.5. Fundamentos de la geosimulación.....	144
3.6. Elemento base de la geosimulación: Autómata.....	165
3.7. Modelación y simulación basada en agentes.....	167
3.8. Guías para escoger una herramienta de ABM.....	204

En este Capítulo, en la primera parte se explican algunos conceptos que engloban los avances que se ha tenido la geografía, en el estudio de los fenómenos en la capa terrestre, todos estos apoyados por el avance en las ciencias de la computación, como es la geomática; con el surgimiento de nuevas capacidades en computación, la geografía se ha beneficiado de contar con nuevas herramientas tecnológicas que le facilitan la relación de los hechos y cambios, sujetos de su estudio. En la segunda parte se explica el concepto de geosimulación y sus fundamentos, entendiéndolo como el nombre que se le da a la técnica moderna de simulación espacial a nivel micro, la cual forma parte de la geomática, que se utiliza para resolver problemas de tipo geoespacial, con un enfoque de modelación dinámica, en donde la variable principal es el tiempo, así como también se explican las diferentes técnicas que se utilizan en la geosimulación, como: los autómatas celulares, los sistemas basados en multi agentes y la modelación basada en agentes, que es la que se utilizó en este proyecto.

3.1. ¿Qué es la geomática?

Desde principios de la década de 1990 se ha venido observando un desarrollo paulatino y sin precedente en el análisis y el manejo de datos espaciales. Una de las razones fundamentales de este proceso es la afortunada unión entre las Ciencias de la Tierra y la Informática. Esta alianza de las disciplinas se denomina geomática.

La geomática, a manera de definición, es un término científico moderno que sirve para expresar la integración sistémica de técnicas y metodologías de adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis, presentación y distribución de información geográficamente referenciada.

El termino Geomática nace en Canadá en 1969 acuñado por François Bernard Dubuisson, quien se dedicaba a la fotogrametría y agrimensura. Si se descompone la palabra en sus raíces tenemos geo (Tierra) y matica (informática) lo cual nos lleva al estudio de la Tierra por medio de la reciente inventada computadora. Para finales de la década de los sesenta el uso de las computadoras no era algo popular pero comenzaban a automatizar de entre otras cosas la cartografía, recordemos que a principios de esta década, en 1963, en este país Roger Tomlinson acuña el nombre de “sistemas de información geográfica” quien ya hacía uso de los primeros sistemas de cómputo aplicados a la geografía. La geomática empieza a tomar fuerza, hasta que en 1985, se crea la carrera como una ciencia de la Universidad de Laval en Quebec y desde ahí comienza a extenderse a los países anglosajones con este nombre, para adaptarlo más tarde en el resto del mundo como geo informática.¹¹²

La geomática con sus métodos y técnicas tanto clásicas como alternativas contribuyen al entendimiento de las actividades humanas, ambientales y las combinaciones de estas, desde sus principios básicos: matemáticas, física, filosofía y geografía. Estas cuatro disciplinas nos dan el concepto de espacio, que actualmente se maneja de manera cognitiva y hoy en día se sustenta en herramientas tecnológicas, que nos proporcionan datos espaciales provenientes del análisis y de mediciones empleadas en disciplinas tales como: la geodesia, la topografía, la cartografía, la teledetección o percepción remota, la fotogrametría, la geo estadística o análisis espacial, los sistemas de posicionamiento global de navegación por satélite (GPS) y los sistemas de información geográfica (SIG), que nos permiten estudiar y describir el espacio geográfico.

¹¹² Quintero Pérez José Antonio, *Temas Selectos de Geomática: métodos y aplicaciones*, (México: Instituto de Geografía de la UNAM, Colección Geografía para el siglo XXI, 2012): 10.

En la actualidad, la adquisición o levantamiento de datos se apoya en una amplia gama de instrumentos, técnicas y métodos matemáticos para realizar mediciones de objetos, en órdenes de magnitud que van desde posiciones puntuales muy localizadas hasta nuestro planeta en su totalidad. Una de las tecnologías modernas, ya incorporada en las actividades de levantamiento de datos, es el sistema de posicionamiento global, el cual se ha convertido en una técnica de apoyo indispensable, cuando se requiere una localización precisa de los objetos.

Por otro lado tecnologías como la precepción remota (PR) y la fotogrametría, permiten inferir datos de un objeto o del ambiente físico, sin estar en contacto directo con ellos y resultan de gran importancia cuando se requieren datos distribuidos sobre amplias zonas geográficas, incluyendo información tridimensional o modelos digitales de terreno. Los instrumentos que posibilitan estas formas de recopilar datos pueden estar montados en plataformas aéreas o satélites.

Para el procesamiento y análisis de los datos recopilados mediante el empleo de una u otra técnica, se utilizan programas computacionales que incluyen procesadores de imágenes o SIG, los que además permiten realizar funciones de simulación o modelado para crear escenarios posibles. Finalmente los resultados obtenidos a través de todo este proceso se pueden presentar o desplegar gráficamente utilizando técnicas modernas de cartografía automatizada.

Este avance tecnológico ha permitido que en la actualidad la geomática rebase el ámbito de las Ciencias de la Tierra y alcance a todas las Ciencias que utilizan datos espaciales referenciados. Así, existen hoy en día numerosos ejemplos en donde la aplicación de las técnicas de la geomática ha resultado exitosa en áreas tan diversas como la medicina humana y veterinaria, la geología, la arqueología, la ingeniería civil e ingeniería ambiental, y aun en los negocios de bienes raíces y comerciales, entre muchas otras.¹¹³

3.2. ¿Qué es la Ciencia de la Información Geográfica y Tecnología (GIS & T)?

Como una parte muy importante del estado de arte de la geosimulación es fundamental mencionar la relación que existe entre la geografía con otras áreas relacionadas con la tecnología como son: la computación, la filosofía, la matemática, etc.

¹¹³ Aguirre Gómez Raúl, *Conceptos de Geomática y estudios de caso en México*, (México: Instituto de Geografía de la UNAM, Colección Geografía para el siglo XXI, 2009): 13.

En esta parte se incluyen los principales conceptos expuestos en el libro “Body of Knowledge”¹¹⁴ que nos da un panorama muy amplio sobre la Ciencia de la Información Geográfica y la Tecnología (GIS & T).

La GIS&T comienza a ser hoy en día uno de los componentes críticos de la ciber infraestructura global tanto en las Universidades como en la Sociedad. Las capacidades integradas de esta y las tecnologías relativas han sobrepasado sus fronteras de investigación a otros campos, en áreas que van desde la bio complejidad y epidemiología hasta la ingeniería de transportes. Tecnologías tales como los sistemas de información geográfica (SIG), que han comenzado a incrementar su uso en diversas disciplinas, hacen algunas funciones como de pegamento para conectar diversas disciplinas de investigación.

La GIS&T tienen aplicaciones más allá de las geográficas, se ha extendido a muchas áreas de investigación multidisciplinarias y proyectos de aplicación, los cuales dependen del poder de integración y análisis de nuevas tecnologías geográficas. Las nuevas tecnologías geográficas desarrolladas en las pasadas décadas crean oportunidades más amplias de investigación en las ciencias sociales, ciencias naturales y humanidades. Los sistemas de información geográfica (SIG) y sus relativas tecnologías pueden ayudar catalizando nuevas investigaciones, estudios de alto nivel y nuevas áreas de aprendizaje dentro de esos campos, sin disminuir los métodos tradicionales de investigación o tratamiento de la diversidad y riqueza de otras áreas.

La ciber estructura de la GIS&T también juega un rol central a lo largo de la sociedad. Una transformación en alguno de sus componentes representan nuevas áreas para nuestra sociedad, por ejemplo será de gran ayuda para un gran número de personas el continuo desarrollo e implementación en las próximas décadas de un sistema de administración geográfico interactivo en tiempo real, como parte central de la administración diaria de las redes de monitoreo dentro de la mayoría de los gobiernos y organizaciones, en estos sistemas sus capacidades de espacio dinámico y tiempo interactivo serán una poderosa plataforma para integrar muchas otras tecnologías y aplicaciones como la comunicación a través de redes inalámbricas, sensores ambientales, software de agentes, modelos econométricos, monitoreo de vías y otros.

Las oportunidades de empleo y el desarrollo de la fuerza de trabajo necesitan estar creciendo en todo el mundo al mismo ritmo que las tecnologías geográficas empiezan a utilizarse en

¹¹⁴ David Dibiase, Michel Demers, Ann Johnson, Karen Kemp, Ann Taylor Luck, Brandon Plewe Y Elizabeth Wentz, *Body of Knowledge*, (Washington, D.C.: Association of American Geographers, 2009): 12-36.

muchas áreas de la investigación y la economía. El uso de la ciber estructura de la GIS&T actualmente incluye a gobiernos, corporaciones, trabajadores y consumidores.

El uso dominante de la GIS&T en los gobiernos, las empresas comerciales y otros intereses recae casi por completo en el contar con información acerca de la tierra, su localización y las características de la gente y los recursos que se encuentran en las zonas.

Los sistemas de información geográfica (SIG) son solamente un componente del grueso de áreas a las que nos referimos cuando hablamos de Ciencias de Información Geográfica y Tecnología (GIS&T), la cual está formada de tres sub dominios principales, los cuales los podemos ver en la figura 3.1, algunos se refieren a GIS&T simplemente como “GeoEspacial”.

Un sub dominio es la Ciencias de la Información Geográfica, que es un área de investigación multidisciplinaria que maneja la naturaleza de la información geográfica y la aplicación de las tecnologías geoespaciales a los cuestionamientos básicos científicos (Goodchild, 1992). Está basada principalmente en la disciplina de la geografía pero teniendo un panorama y entendimiento de los métodos de la filosofía, psicología, matemáticas, estadística, ciencias de la computación, arquitectura de la tierra y otros campos.

Un segundo sub dominio es la Tecnología Geoespacial, es la rama especializada de las tecnologías de la información que manejan datos geo referenciados. Tecnologías espaciales soportan una amplia variedad de usos, desde la adquisición de datos (por ejemplo: imágenes aéreas, fotos satelitales y sistema de navegación satelital) al almacenamiento y manipulación de información (por ejemplo: SIG, procesamiento de imágenes, software para manejo de bases de datos) o análisis de datos (por ejemplo: software para análisis estadístico y modelación) para desplegar e introducir información (por ejemplo: software de visualización y equipos para mostrar imágenes). Las Ciencias de la Información Geográfica y sus aplicaciones muestran el desarrollo de los avances de las tecnologías geoespaciales, pero el desarrollo de las tecnologías requiere contribuciones de la ciencia de la información y de la ingeniería.

El tercer sub dominio son las aplicaciones de GIS&T, que incluyen el uso incremental de diversas tecnologías espaciales en el gobierno, la industria y la academia. Algunos ejemplos incluyen análisis cercanos en tiempo real de los servicios en redes eléctricas, aplicaciones en inteligencia militar y operaciones y rutas de optimización para la recolección de basura.

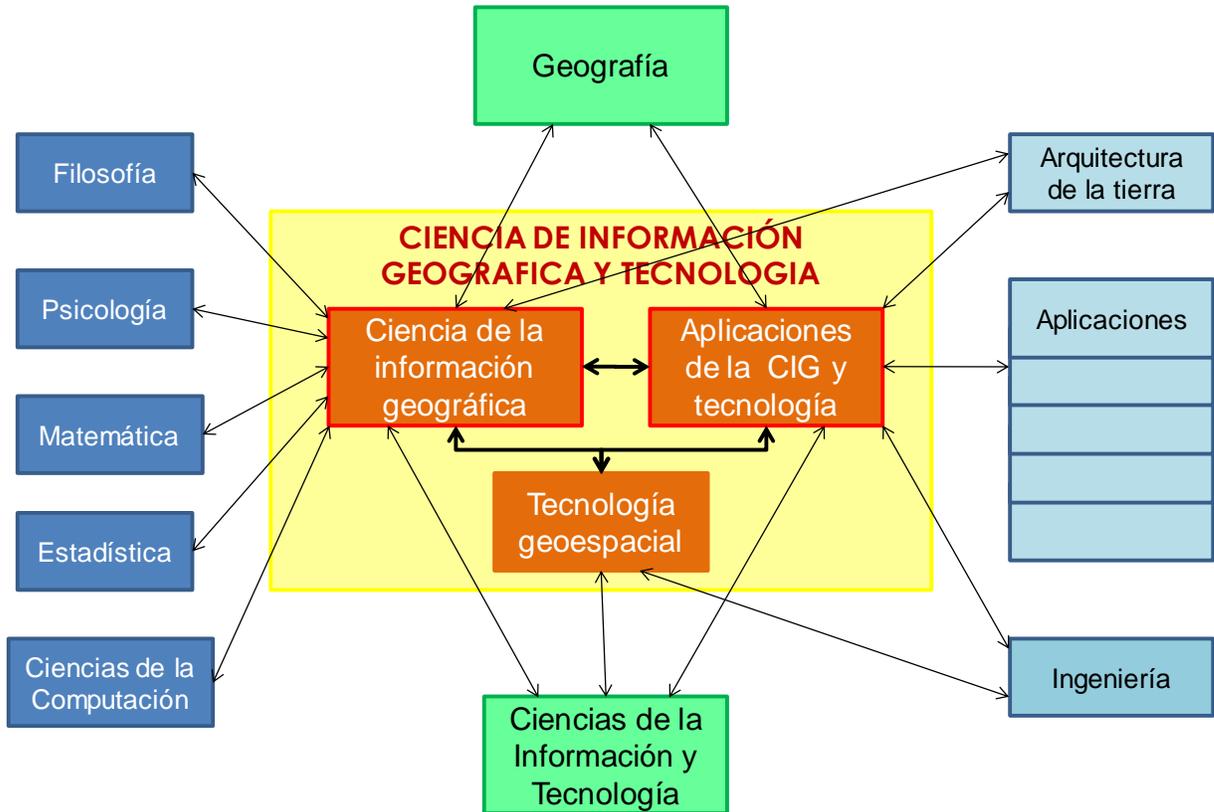


Figura 3.1. Los tres sub dominios de GIS&T, en relación a los campos con los que tiene relación.¹¹⁵

3.3. ¿Qué es la geosimulación?

Existen diferentes técnicas modernas de simulación espacial las cuales son utilizadas para representar ambientes complejos a un nivel micro, como: los autómatas celulares, autómatas geográficos y la modelación y simulación basada en objetos, las técnicas de este tipo han sido descritas por algunos autores como geosimulación. Geosimulación es un término de propósito general, introducido por Benenson y Torrens en el año 2004, usado para describir las herramientas de aplicaciones de simulación modernas las cuales trabajan a una escala a nivel micro para la solución de problemas geoespaciales.¹¹⁶

¹¹⁵ David Dibiase, Michel Demers, Ann Johnson, Karen Kemp, Ann Taylor Luck, Brandon Plewe Y Elizabeth Wentz, *Body of Knowledge*, (Washington, D.C.: Association of American Geographers, 2009): 6.

¹¹⁶ Smith, Goodchild and Longley, "Geospatial Analysis", CASA, <http://www.spatialanalysisonline.com/output/>, (Consultado Junio, 2009).

Las técnicas que se conocen como geosimulación se muestran en la figura 3.2., cada una de estas se explicara a más detalle en los siguientes apartados.

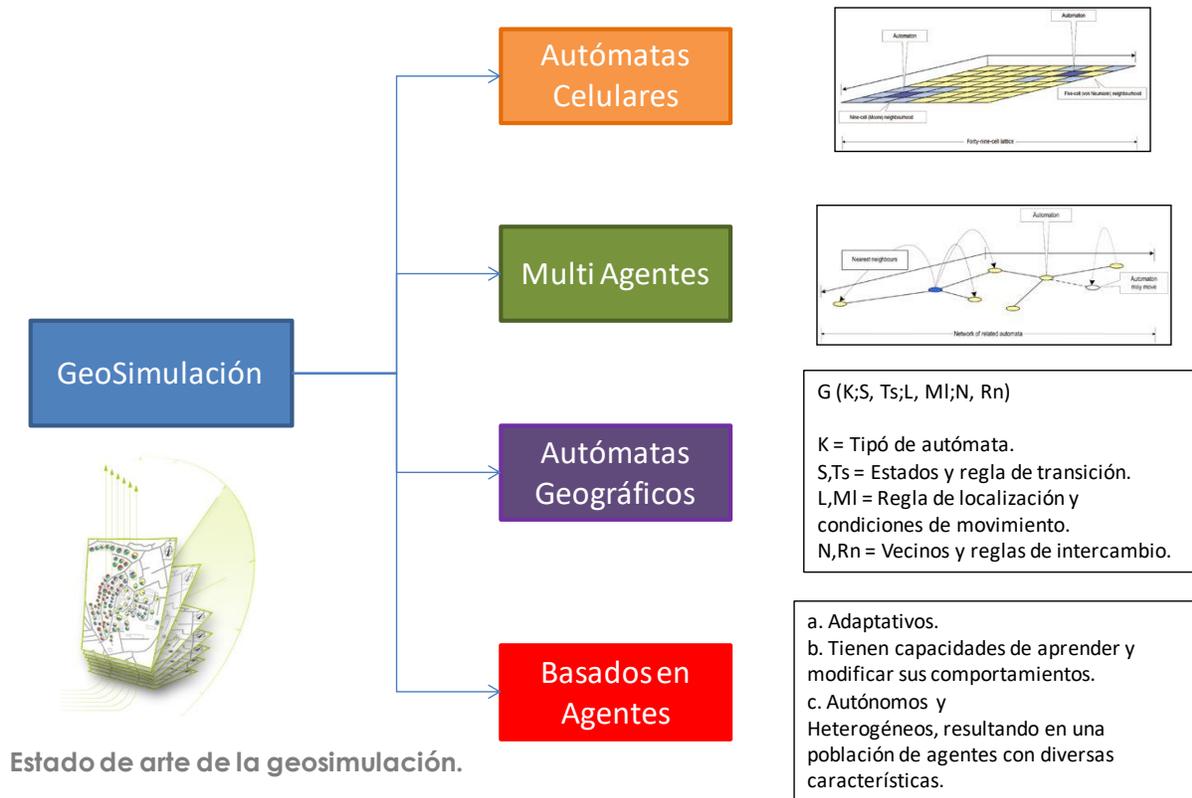


Figura 3.2. Técnicas conocidas como geosimulación.¹¹⁷

Geosimulación, es un título que es usado para representar un campo muy reciente de investigación en geografía. En un amplio sentido, el campo de la geosimulación es concerniente con el diseño y construcción de modelos espaciales basados en objetos de alta resolución, utiliza estos modelos para explorar ideas e hipótesis acerca de cómo los sistemas espaciales operan, desarrollo de software de simulación y herramientas para soportar simulaciones basadas en objetos y aplicar estas en la solución de problemas reales en contextos geográficos.¹¹⁸

Geosimulación es una frase que se puede utilizar para representar una nueva tendencia de modelado espacial, que ha venido a la delantera en años muy recientes. Además del modelado y

¹¹⁷ Diseño propio.

¹¹⁸ Itzhak Benenson and Paul M. Torrens, *Geosimulation, Automata-based modeling of urban phenomena*, (England: John Wiley & Sons, LTD, 2005): 10.

de la simulación tradicional, las raíces intelectuales de la geosimulación, derivan de progresos recientes en informática y ciencias de la información geográfica.¹¹⁹

El acercamiento de la geosimulación se dibuja junto una diversidad de teorías y técnicas, ofreciendo una perspectiva única que la simulación tradicional ha carecido comúnmente: una vista de fenómenos como resultado de la dinámica colectiva de objetos que obran recíprocamente, representada a menudo en la escala de casas, de la gente y de unidades individuales de las propiedades inmobiliarias y en los calendarios que se acercan al “tiempo real”.¹²⁰

La geosimulación tiene semejanzas con sistemas de modelación tradicionales tales como micro simulación, pero hay varios factores que la distinguen de estos. El primer aspecto es la perspectiva que tiene en considerar los objetos que maneja como unidades espaciales. Mientras que los modelos tradicionales se han centrado en particiones agregadas del espacio, los modelos de geosimulación funcionan con objetos discretos y espaciales sin poder modificarse en una escala “microscópica”, por ejemplo: casas, porciones, parcelas de tierra, entre otras cosas, todos con sus proporciones reales. La segunda característica, se relaciona con la representación de las relaciones espaciales. Tradicionalmente, las simulaciones geográficas asumen diferentes metodologías las cuales una vez que se aplican son rígidas al construir cualquier modelo. La interacción espacial que modela, por ejemplo, describe una forma --y una forma solamente-- de la interacción espacial: flujos de la materia y de la información entre las unidades espaciales agregadas. La micro simulación se ocupa a menudo de las unidades individuales, pero se modelan en el aislamiento; las interacciones entre las unidades no se consideran generalmente. Los modelos caracterizados por la geosimulación, se concentran en el comportamiento interactivo de los objetos geográficos elementales, en una variedad ilimitada de maneras, esta interacción puede tomar la forma de flujos, o de otras relaciones espaciales tales como acción en una distancia, difusión, agregación, etc. Además, las relaciones que se pueden observar en escalas más altas (por ejemplo en niveles intra-urbanos) se pueden modelar como colecciones de estas unidades elementales. La tercera característica se refiere al tratamiento del tiempo. Tradicionalmente, los modelos reflejan el tiempo a través de datos seccionados transversalmente, como fotografías en el tiempo estas pueden ser varias, pero con poca información sobre los

¹¹⁹ Paul M. Torrens, “Geosimulation”, <http://geosimulation.org/>, (Consultado Diciembre, 2010).

¹²⁰ May Yuan, “Dynamics GIS: Recognizing the Dynamic Nature of Reality”, ArcNews, <http://www.esri.com/news/arcnews/spring08articles/dynamics-gis.html>, (Consultado Octubre, 2010).

períodos que intervienen durante estos estados. En cambio, los modelos de geosimulación ofrecen la oportunidad para la construcción de simulaciones dinámicas, a menudo en los momentos que se acercan a “tiempo real”. Esto tiene implicaciones importantes para la gama de hipótesis que se puedan explorar con esta metodología. La cuarta característica tiene que ver con las metas de la simulación. La geosimulación modela salidas con una visión de ver lo que pasara en el sistema en el futuro y entender su comportamiento, lo cual es diferente de las metas tradicionales. Por lo menos los que se han desarrollado hasta el momento, tienden para ser diseñados como simulaciones panorámicos que se comportan como: “herramientas a pensar que pasara si movemos sus parámetros”.

El trabajo de investigación, en el campo de la geosimulación, se centra sobre todo en técnicas para mejorar la tecnología espacial de la simulación: la derivación de los nuevos algoritmos para los procesos espaciales, de las nuevas metodologías para conceptualizar nuevas entidades espaciales y de las relaciones entre ellas, el uso de la simulación modela los problemas del mundo real, y utiliza los nuevos desarrollos, en programas de cómputo, para experimentar con los sistemas geográficos. Muchas de las ideas en la geosimulación no son únicas a la disciplina. Se abstraen muchas de otros campos, en gran parte de la informática, física, química, matemáticas, economía, ecología, y biología. De estas disciplinas, la informática es particularmente relevante, especialmente la inteligencia artificial y la programación orientada a objetos.

La reciente tendencia en simulación por computadora consiste en desarrollar lo que es llamado aplicaciones de simulación definidas. El término definido significa que la simulación toma lugar en un ambiente. Particularmente nosotros podemos notar que la mayoría de los investigadores trabajan en esta tendencia, con características espaciales en el ambiente de simulación. La geosimulación es una nueva tendencia en la simulación espacial que ha comenzado a ser prominente en los años recientes.¹²¹

Los modelos basados en geosimulación operan con individuos humanos y entidades de infraestructura, representados espacialmente en escalas no modificables. En los modelos de geosimulación, esas entidades tienen comportamientos, muchas de estas son animadas (visualmente y dinámicamente) y la animación maneja los comportamientos de las entidades inanimadas. Los datos los cuales alimentan los modelos de geosimulación son generalmente

¹²¹Geosimulation, <http://www.geosimulation.org/geosim/>, (Consultado Junio, 2009).

almacenados en un sistema de información geográfica. De acuerdo a Mandl¹²², cuatro alternativas de acoplamiento entre aplicaciones de simulación y SIG existen:

1. Acoplamiento suelto. SIG y el software de simulación son dos diferentes productos y los datos de uno son integrados en otro.

2. Acoplamiento limitado. La funcionalidad del SIG es implementada en el software de simulación o viceversa.

3. Acoplamiento directo cooperativo. El SIG o el software de simulación trabaja como el servidor o cliente, los dos son conectados vía una interface, el software que trabaja como cliente es usado por los usuarios y el otro de respaldo.

4. Acoplamiento indirecto cooperativo. Un tercer programa une el SIG y el software de simulación. El tipo de sistema que desarrollamos en este proyecto es de este tipo, en donde el sistema de información geográfico y el simulador operan en el mismo sistema.

Las características de la geosimulación mencionadas arriba la hacen una herramienta muy importante para la integración e interacción de modelos espaciales de varios tipos (económicos, políticos, sociales, etc.). Todo este desarrollo ha sido soportado por avances en las ciencias geográficas y campos fuera de la geografía.

La nueva era de simulación se ha enfocado a resolver problemas en áreas de ecología, economía y ciencias sociales.

Actualmente nuestro conocimiento de sistemas y simulación ha alcanzado un punto donde el comportamiento basado en objetos puede ser directamente trasladado en reglas computables y usadas para generar sistemas vivos en computadoras.

Los investigadores se están moviendo de una manera agregada, que era la base de los antiguos modelos de simulación, donde las preguntas que podían ser exploradas son necesariamente relativas al promedio de elementos individuales, y están ahora favoreciendo la flexibilidad de nuevas aproximaciones, presentando casi ilimitadas posibilidades de interpretar directamente el comportamiento individual.

¹²² Université Laval, "Computer Simulation, Multiagent Based Simulation and Multiagent Geosimulation", <http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/fichiers/23343/ch02.html> , (Consultado Junio, 2010).

3.4. Geosimulación como modelos basados en objetos.

Se distingue de otras metodologías de simulación por su explícita atención al espacio y a la geografía (de ahí lo geo). Esto es ilustrado particularmente bien por la representación de objetos en la simulación, especificación de su comportamiento y delineación de la dinámica de estos. Estos factores que son los elementos que forman un modelo de geosimulación se describen en los siguientes párrafos.¹²³

3.4.1. Representación de los objetos.

Los modelos de geosimulación son más sensatos en su traslación de la geografía urbana en escenarios artificiales, así es como ellos facilitan la resolución espacial necesaria para distinguir entre objetos urbanos participantes en sus estudios. Considera los sistemas urbanos como una colección de elementos no modificables espacialmente, u objetos, en resolución atómica: individuos, casa, vehículos, construcciones, parcelas de tierra, etc.

3.4.2. Comportamiento de objetos.

Los modelos de geosimulación generalmente representan objetos autónomos y se enfoca en su comportamiento interactivo en los estándares del sistema. Se concentran solo en la salida colectiva de las interacciones de los comportamientos individuales de sus elementos.

3.4.3. Tiempo de los objetos.

Los modelos de geosimulación son basados en unidades de tiempo correspondientes al reloj interno de los objetos interactivos. Porque los objetos diferentes pueden retener diferentes relojes internos, geosimulación tiende en dirección del evento, direccionado a un determinado tiempo, en lugar del tiempo de toda la implementación.¹²⁴

¹²³ Itzhak Benenson and Paul M. Torrens, "Geosimulation: object-based modeling of urban phenomena", Computers, Environment and Urban Systems, PERGAMON, (Mayo, 2007): 1-8.

¹²⁴ Itzhak Benenson and Paul M. Torrens, "Geosimulation: object-based modeling of urban phenomena", Computers, Environment and Urban Systems, PERGAMON, (Mayo, 2007): 1-8.

3.5. Fundamentos de geosimulación.

La geosimulación ha sido influenciada por una variedad de campos. En especial por la teoría de sistemas complejos, modelos dinámicos, sistemas de información geográfica y programación orientada a objetos, este último ha sido su mayor catalizador, particularmente en lo que se refiere a la representación de objetos, sus comportamientos y representaciones en el tiempo.

Los modelos basados en geosimulación tienen una variedad de atributos ventajosos, uno de los principales es su flexibilidad en la representación de fenómenos físicos o humanos dinámicos y altamente adaptables. Facilitan la exploración de ideas, acerca de la mirada de formas en que los sistemas geográficos se desarrollan, se comportan, interactúan y evolucionan, a menudo son el apoyo a la experimentación con los sistemas geográficos de manera que simplemente no son posibles en el mundo real. De hecho, en muchos casos, estos modelos se han desarrollado de abajo hacia arriba, pedagógicamente, como una herramienta en la teoría de la construcción. El trabajo de los geógrafos con estos modelos ha contribuido a reforzar los vínculos existentes con las disciplinas relacionadas, como ciencias de la computación y la informática, ecología, ciencia de la sostenibilidad, economía, antropología, ciencias políticas y ciencias de la tierra. Principalmente por el valor puesto en la ciencia espacial y la geografía del comportamiento en el modelado basado en geosimulación, el trabajo de este tipo ayuda a infundir perspectivas geográficas y "pensamiento espacial" en estos campos¹²⁵.

A continuación se explica, brevemente, cada una de estas teorías que han servido de plataforma para el impulso de la geosimulación.

3.5.1. Teoría de la complejidad y sistemas complejos.

En teoría de sistemas complejos, los sistemas son entendidos como aquellos que tienen comportamientos emergentes no visualizados, por ejemplo: un pequeño número de reglas, aplicadas en un nivel local y entre muchas entidades son capaces de generar un fenómeno complejo, comportamientos y patrones por encima de los niveles individuales no considerados. Esas son manifestadas en tal camino que las acciones de las partes no simplemente suman las actividades de las individualidades.¹²⁶

¹²⁵ Geosimulation, <http://www.geosimulation.org/>, (Consultado Abril, 2011).

¹²⁶ Nino Boccara, *Modeling Complex Systems*, (New York: Springer, 2010): 26-30.

Un sistema complejo son más que la suma de sus partes y en consecuencia de esto un modelo de su estructura es necesariamente incompleto y parcial. Los modelos representan simplificaciones de la realidad, en el cual las partes salientes y procesos son simulados y dada esta definición habrá muchos modelos de sistemas complejos. Exploramos el impacto de la complejidad en la validación de tales sistemas. Nosotros tomamos las ideas junto con la conclusión acerca de los límites propuestos para la predicción en sistemas complejos.

Este cuestionamiento nace de la necesidad de validar modelos urbanos a gran escala. Este tipo de modelos siempre han sido caracterizados por su complejidad desde que se empezaron a desarrollar, hace aproximadamente 40 años y recientemente ha habido un bajo pero importante incremento en su complejidad. En muchos sentidos nuestras necesidades crecientes para modelos más complejos y el incremento de las dificultades para su validación nos pasa de un mundo de certeza a uno de incertidumbre. La idea de que la ciencia debería de darnos todas las respuestas se ha acabado. Los modelos que fueron adecuados hace tiempo ahora son completamente inadecuados.

Hace 50 años se tenía la idea de simplificar los modelos con el fin de comprender su realidad, y a pesar de reconocer de la complejidad de los sistemas, los modelos eran utilizados. Con este crecimiento en incertidumbre y el incremento en la percepción que los sistemas que nosotros usamos son intrínsecamente complicados, la simplicidad ya no parece la clave para el desarrollo de modelos. La ciencia se ha enfocado más a que se entienda el comportamiento a construir modelos de qué pasa si.

La teoría de la complejidad ha surgido de la teoría de sistemas, una parte diría que la ha enriquecido. La mayoría define la complejidad en función de sus diferentes atributos y dimensiones. La mejor forma de caracterizar a un sistema es por los estados o condiciones que pueda tomar. Por ejemplo hay una clase entera de modelos urbanos construidos alrededor de autómatas celulares en donde las celdas de n podrían describir el estado del sistema con cada celda habiendo desarrollado o no se desarrollado. En un sistema con digamos 10,000 celdas o zonas, entonces el número de estados posibles desafía la descripción. Añada a estas formas diferentes o reglas para generar estos estados, entonces el problema empieza a desincrustar en un modo que no se puede manejar esto de manera convencional a través de teorías. Por su puesto que nada de esto es nuevo y este tipo de caracterización de la complejidad ha sido conocido por mucho tiempo.

Los sistemas complejos tienen una gran extensión entre sus elementos y objetos que hacen que cualquier descripción fija sea incompleta. Esto se traduce en que todas las formas posibles son irrealizables y su representación es frecuentemente inestable. En resumen los sistemas complejos generan una dinámica que permite que sus elementos se transformen en formas que son sorprendentes a través de la adaptación, mutación, transformación, etc. Tienen las características de generar comportamientos nuevos.

Existen distintos conceptos que son imprescindibles para entender la teoría de la complejidad. Estos conceptos se han venido incorporando desde distintas disciplinas. Existen 10 conceptos que desde nuestra percepción son los fundamentales para entender la teoría de la complejidad: la no linealidad, el caos, atractor extraño, autorganización, coevolución, emergencia, redes, jerarquía, autopoiesis y los sistemas complejos adaptativos, mismos que se describen a continuación.¹²⁷

No linealidad

Una de las bases de la ciencia clásica radica en el principio de linealidad. La segunda ley de Newton afirma que a toda acción corresponde una reacción igual. Este principio no se cumple en los sistemas complejos. Es decir una acción puede tener consecuencias desproporcionadas. Pequeños cambios generan grandes transformaciones.

Los sistemas biológicos y sociales están llenos de ejemplos de este tipo. La muerte de un líder opositor, el aumento de los precios en el transporte público, la muerte de un estudiante, generan transformación que no tiene relación causa efecto.

Caos

Si bien existe el concepto popular que el caos es un desorden o desconcierto, sin pauta, la teoría moderna del caos explica los límites entre el orden y el caos, fue desarrollada por matemáticos (Henri Poincaré-Charles Sanders) y es una de las grandes aportaciones de la física contemporánea. Permite identificar, dentro de las conductas irregulares e impredecibles, ciertos patrones de un orden que se oculta. Este orden se ha denominado atractor extraño (Ruelle – Takens, 1974).

¹²⁷ Luis Arturo Rivas Tovar, *Efectos de la teoría de la complejidad en la gestión ambiental en México*, Centro Mario Molina, (México: Instituto Politécnico Nacional, 2009): 18-30.

El moderno concepto del caos fue usado por primera vez en 1974 por el biólogo Robert May en su artículo *Biological populations with non overlapping generations: Stable points, stable cycles and chaos* (May, 1974).

May aplico los conceptos matemáticos consolidados en la física teórica al campo de la biología, en 1973 publicó el libro *Stability and Complexity in Model Ecosystems* en el cual utilizo modelos matemáticos para investigar la estabilidad y complejidad de una comunidad de plantas y de otros animales que obraban recíprocamente.

Contrariamente al conocimiento general que las especies son motivadas a una mayor estabilidad en sistemas complejos, él demostró en dinámicas de población, que especies individuales son motivadas a mayores fluctuaciones en abundancia en tales ecosistemas cuando el número de especies aumenta y las interacciones de las especies se agregan aleatoriamente.

Robert May fue el primero en descubrir que las ecuaciones diferenciales de primer orden pueden exhibir un arsenal asombroso de comportamientos dinámicos, extendiéndose de puntos estables a “caóticos”. Aunque la teoría del caos fue descubierta en forma aparte casi al mismo tiempo, Robert May la incluyo en su libro citado y en un artículo publicado en *Nature* en 1976. La importancia del descubrimiento de May es que se interesó por lo que ocurría por arriba del punto de acumulación.

La mayoría de los biólogos (como los físicos en general) preferían no seguir más allá porque el mapa se comportaba de una manera errática, extraña no parecía tener sentido. Las matemáticas habían estudiado la duplicación de periodo y muy recientemente, habían encontrado un resultado sorprendente respecto a las orbitas periódicas, pero las matemáticas teóricas estaban muy disociadas de las ciencias experimentales y no se le había dado la importancia debida.

May las reviso como biólogo y encontró que más allá del punto de acumulación existen comportamientos poblacionales no periódicos, pero predecibles. Su objetivo era demostrar que aun modelos matemáticos muy sencillos exhibían comportamientos muy complejos. Y que esta podría ser la llave para el entendimiento de la complejidad en la naturaleza.

El ejemplo de la montaña de arena suele ejemplificar un sistema caótico. Cuando de alguna manera se añade más arena a una montaña de arena llega el momento de repente que se viene abajo. El sistema entra en caos. El montón de arena se reorganiza y llega a este estado crítico sin ninguna intervención externa. Después del caos viene un nuevo orden.

El caos es una parte de la teoría de la complejidad y es en términos sistémicos, un subsistema de los fenómenos complejos. La conducta caótica por tanto, es solo un comportamiento posible entre los sistemas dinámicos complejos que permanentemente se debaten entre orden y caos.

Atractor extraño

El concepto de atractor es de utilidad para designar aquellos puntos o estados que atraen al resto de los puntos del espacio de fases hacia sí en un sistema caótico o, de otra forma, aquellos puntos o estados que atraen a un sistema dinámico hacia sí. Si esperamos el suficiente tiempo el sistema dinámico acabara estabilizándose en una determinada región o en un determinado punto del espacio de fases. Al igual que hay atractores en los sistemas dinámicos, también hay repulsores, puntos o estados que repelen al sistema. Un sistema dinámico puede tener varios atractores y repulsores que actúan de manera simultánea.

El interés por los atractores en los sistemas dinámicos fue iniciado por Poincaré al observar como las orbitas de los sistemas dinámicos no lineales se aproximaban. Observo que estos sistemas dinámicos también presentaban repulsores, o un conjunto de estados en los que el equilibrio era inestable y por ello no atraían al sistema dinámico hacia si, al contrario lo repelían. Poincaré operaba para ello con cortes transversales al flujo de trayectorias del sistema dinámico. Estas secciones son conocidas hoy como secciones de Poincaré.

Son tres los tipos básicos de atractores que podemos encontrar en cualquier sistema dinámico. Dos de ellos ya fueron descritos por Poincaré: sumideros y ciclos límites.

En primer lugar tenemos los atractores de punto fijo, aquellos atractores que atraen al sistema hacia una situación muy concreta. A estos atractores se les llama sumideros. Por ejemplo un péndulo siempre tiende a acabar en el punto de máxima energía potencial, parado, sin movimiento. Este punto representa el punto fijo atractor para el sistema péndulo.

El segundo tipo básico de atractor es el denominado ciclo limite. El ciclo limite representa un comportamiento cíclico, periódico. La dinámica relacional entre depredador y presa de un sistema ecológico sigue un atractor de ciclo límite.

Finalmente están los atractores extraños (Ruelle y Takens, 1971). Un atractor extraño es un atractor no periódico el cual no se repite jamás. Su órbita nunca se cruza con otra anterior. Se trata de un número infinito de curvas y superficies encerradas en un espacio finito y en el que pueden detectarse los movimientos básicos descritos por la topología de estiramiento, comprensión y torcimiento.

Autorganización.

El concepto ha evolucionado en el tiempo. El primer autor en referirse a él es el filósofo alemán Kant, quien en su libro *La crítica de la razón pura*, se refería a la capacidad de las partes de un órgano para producir orden en las otras partes y recíprocamente estas partes para ser ordenadas por aquellas.

En 1954 Farey y Clark y Heylighen en 1997, lo definen como aquel que cambia su estructura básica en función de su experiencia y el medioambiente que lo rodea.

Prigogine, al investigar los sistemas termodinámicos alejados del equilibrio, incorporó el concepto de estructura disipativa, que es un orden emergente que puede ser observado en distintos campos tales como la biología, la química y los sistemas sociales.

De acuerdo con Lucas (2002) las características de un sistema autorganizado son las siguientes:

1. Ausencia del control centralizado.
2. Fluctuaciones (búsqueda a través de opciones).
3. Equilibrio múltiple (posibilidad de diversos atractores).
4. Orden global (emergencia de las interacciones locales).
5. Redundancia (insensibilidad al daño).
6. Adaptación (estabilidad a variaciones extrañas).
7. Jerarquías (múltiples niveles de autorganización).
8. Dinámica operativa (evolución en el tiempo).
9. Rotura simétrica (pérdida de libertad).
10. Criticabilidad (efecto evolutivo y en fases de cambio).
11. Auto mantenimiento (reparación y reemplazo de partes).
12. Disipación (energía usada y exportada).
13. Complejidad (parámetros múltiples).

Coevolución.

El concepto de coevolución frecuentemente ha sido usado como sinónimo de adaptación, sin embargo esto es un error, ya que la idea es que en realidad un sistema complejo nunca termina de crecer y evolucionar, por lo tanto jamás alcanza el equilibrio.

Según Ricklefs, este concepto está asociado a todas las especies del mundo y pone énfasis en las interacciones que pueden ser de dos tipos: antagónicas (basadas en la ecuación consumo-recursos), o cooperativos (mutualistas) (Ricklefs, 1990).

Cada vinculación entre especies está relacionada y coevoluciona con el ambiente adaptándose selectivamente entre ellas.

En los sistemas coevolutivos los parámetros de medición del éxito están continuamente cambiando en una sucesión interminable de valle y crestas donde la predicción es prácticamente imposible ya que aparecen continuamente condiciones emergentes.

Emergencia.

El concepto de emergencia está asociado a la sorpresa, a la multiplicación de las consecuencias, a la desproporción y al efecto devastador. Emergencia es lo que pasa en un fenómeno que siendo local tiene consecuencias limitadas basadas en la autorganización y los efectos del medioambiente externo. La retro amplificación en los sistemas emergentes puede ser de dos tipos: negativa (descompensación) y retroalimentación positiva (amplificación) que conducen a una evolución desproporcionada de circunstancias generando un sistema complejo adaptativo.

Según Holland (1998) los agentes en un principio están desunidos, coevolucionan, se autorganizan y crean patrones emergentes cuyas conductas son imposibles de predecir, aun cuando todas las estrategias individuales y los procesos de aprendizaje de los agentes sean conocidos.

La emergencia es entonces la aparición espontanea de una nueva forma de conducta por la autorganización espontanea de los elementos de una población.

Redes.

Puesto que el estudio de la complejidad supone la interacción de un número muy grande de elementos, un aspecto toral de la teoría descansa en los conceptos de red y jerarquía.

Una red es una agrupación de nodos interconectados entre sí por mecanismos que pueden ser físicos o virtuales e incluso, cabe especular, por asociaciones mentales basadas en la intuición profunda sobre lo cual se conoce poco hasta el momento.

Una red está compuesta por nodos y relaciones entre nodos. Los nodos son los elementos que caracterizan las células básicas y son a la organización en la red lo que los departamentos a la

organización funcional. Dichos nodos pueden adaptar distintas formas y tamaños, dependiendo del número de conexiones que existan y los nodos que participen en la organización.

Estas conexiones pueden ser de cinco tipos:

1. Burocráticas.
2. Económicas.
3. Operativos.
4. Culturales.
5. Informativas.

Entre mayor número de nodos tenga una red, más difícil será entender los mecanismos por los cuales dichas redes se conectan, por lo tanto, será más compleja la red.

El estudio de las redes es un común denominador en distintas disciplinas tales como la física, la química y la genética, y más recientemente en las ciencias sociales y en la administración.

Jerarquía.

Si bien existe la idea extendida de que en las redes no existe jerarquía y el concepto de autorganización implica la creación de órdenes espontáneas, en las redes la jerarquía si es relevante, si bien tiene unos matices que frecuentemente resultan difusos.

Más que entender el funcionamiento de una red, importa ver sus impactos y resultados. Es posible comprender su operación a partir de tres dimensiones, que son: su cohesión, su potencial combinatorio y su modo de activación.

Aunque las jerarquías resultan difusas, existen en la práctica dos modelos básicos: los dirigidos, donde uno de los nodos tienen privilegios, para el planteamiento de los problemas estratégicos que deben ser resueltos por algún nodo de la red, es decir, el poder de activación se encuentra concentrado en algún nodo en concreto.

El otro modelo es no dirigido, donde no existe verdaderamente ninguna jerarquía de un nodo sobre otro y cualquiera tiene la posibilidad de planear los problemas estratégicos y darles solución.

Esta capacidad anárquica tiene un poder de ebullición que, pese a su relativo caos, está limitado a la selección de la formación que realizan los otros nodos, de modo que al final se autorregula por la calidad de la información que se aporta (Rivas, 2007).

Autopoiesis

En general los autores consideran que la autonomía, con respecto al medio, se sobre entiende y es un rasgo tan obvio en los sistemas vivos que siempre que observamos un sistema que parece autónomo de su medio tendemos a considerar que es un sistema vivo. Un ejemplo nos ilustrará esta idea. Una roca sufre los avatares de su medio, calentándose cuando sube la temperatura y enfriándose cuando esta descende. Por el contrario un ser vivo es capaz de mostrar cierta independencia de este medio, manteniendo una temperatura interna independiente de la temperatura exterior.

Los seres vivos tienen una extrema habilidad para conservarse a sí mismos, para conservar su identidad, a pesar de los cambios continuos en sus entornos, demostrando con ello una alta y continuada capacidad homeostática.

Maturana y Varela consideran dos de las características esenciales de todo sistema vivo:

1. La conservación de su identidad y
2. El mantenimiento o la invariancia de las relaciones internas al sistema vivo y que son definitorias del mismo, es decir, el mantenimiento de su organización.

El termino autopoiesis es derivado del griego y su significación más inmediata sería la de autorreproducción. Con la noción de autopoiesis, Maturana y Varela pretenden recoger en una sola característica lo esencial de la organización de los seres vivos.

Para los fines de este trabajo lo debemos de definir como la capacidad de los sistemas complejos de cuidar su identidad y mantener su organización interna.

Sistema Adaptativo Complejo (SAC).

Es un sistema complejo formado por agentes interactivos, los cuales están descritos en términos de normas, de tal manera que al acumular experiencia los agentes cambian sus normas. Como el entorno está poblado de otros SAC los sistemas se adaptan a todos los demás generando patrones complejos.

Holland, al definir a los SAC, distingue entre propiedades y mecanismos. Propiedades son: la agregación, la no linealidad, los flujos y la diversidad. Mecanismos son: la etiquetación, los modelos internos y los bloques de construcción.

Con estas propiedades y mecanismos, Holland propone modelos de simulación para entender los sistemas complejos llamados modelos basados en agentes.

Puesto que el número de agentes puede ser extenso y las interacciones de los mismos hacen el sistema aún más difícil de entender, la única forma de estudiar estos sistemas es mediante una metodología interna entre la teoría y el experimento. Estos son los modelos ABSM o simulación de modelos basados en agentes (Roji, 2004).

Los modelos basados en agentes no son genuinamente experimentados porque no manipulan directamente el universo ni el investigador tiene control sobre las variables, pero es mediante la simulación, como el investigador puede, mediante la repetición del programa con pequeñas variaciones, estudiar posibles patrones o regularidades del sistema, de esta forma se buscan relaciones causales que pueden dar idea de posibles modelos matemáticos.

Un modelo basado en agentes está compuesto de tres elementos: 1) un conjunto de detectores que extraen información del entorno, 2) un conjunto de normas básicas y adaptables y 3) un conjunto de efectos que representan la capacidad del agente de enfrentarse a su entorno.

La lógica que propone Holland con sus modelos basados en agentes es que una vez conocidos los puntos en común de los SAC, los agentes y sus interacciones, unificándolos en un modelo único es posible entonces entender su comportamiento.¹²⁸

3.5.2. Introducción a la teoría moderna de los modelos dinámicos.

Con respecto al tema de teoría moderna de los modelos dinámicos, se tomaron los principales conceptos del libro: *Introduction to the modern theory of dynamical systems*, escrito por Katok y Hasselblatt.¹²⁹

La teoría de sistemas dinámicos es una disciplina matemática entrelazada con la mayoría de las principales áreas de las matemáticas. Su esencia matemática está en el estudio de la estructura de la órbita global de mapas y flujos, con énfasis en propiedades invariantes bajo cambios coordinados. Sus conceptos, métodos y paradigmas han estimulado a los investigadores en muchas ciencias y han dado incremento a una nueva área de aplicaciones dinámicas (también llamada ciencia no lineal o teoría del caos). El campo de los sistemas dinámicos comprende muchas disciplinas mayores pero nosotros estamos interesados principalmente en dinámicas

¹²⁸ Luis Arturo Rivas Tovar, *Efectos de la teoría de la complejidad en la gestión ambiental en México*, Centro Mario Molina, (México: Instituto Politécnico Nacional, 2009): 42-54.

¹²⁹ Anatole Katok And Boris Hasselblatt, *Introduction to the modern theory of dynamical systems*, (England: Cambridge University Press, 10th, 2009).

diferenciables de dimensiones finitas. Esta teoría está conectada con muchas otras áreas, teoría primaria ergotica, dinámica simbólica y dinámica topológica.

La teoría de dinámica de sistemas es usada para describir el comportamiento de los sistemas dinámicos complejos, empleando usualmente ecuaciones diferenciales o ecuaciones recurrentes. Cuando las ecuaciones diferenciales son usadas, la teoría es llamada de sistemas dinámicos continuos y cuando se emplean ecuaciones recurrentes es llamada dinámica de sistemas discretos. Cuando la variable de tiempo corre sobre algunos intervalos es discreto y si corre sin intervalos es continuo y si es arbitrario de las dos formas las ecuaciones se llaman ecuaciones dinámicas sobre tiempos de escala.

Esta teoría describe los comportamientos cualitativos a largo plazo de los sistemas dinámicos y los estudios de las soluciones a las ecuaciones de movimiento de sistemas que son primeramente mecanismos en la naturaleza, también está incluye orbitas planetarias, también como el comportamiento de circuitos electrónicos y las soluciones de ecuaciones diferenciales parciales que se usan en biología. Mucha de la investigación moderna está enfocada al estudio de los sistemas caóticos.

La teoría de los sistemas dinámicos y teoría del caos se enfocan en los comportamientos cualitativos en el largo plazo. Aquí el enfoque no es encontrar soluciones precisas a las ecuaciones que definen los sistemas dinámicos (lo cual es muchas veces imposible) si no contestar preguntas como si el sistema se estabilizara, el tiempo aproximado de algunos sucesos, si el comportamiento futuro dependerá del inicial.

Si tratamos de precisar el concepto de sistemas dinámicos, podríamos decir burdamente que se trata del estudio de sistemas deterministas, es decir, consideramos situaciones que dependen de algún parámetro dado, que frecuentemente suponemos es el tiempo, y que varían de acuerdo con leyes establecidas. De manera que el conocimiento de la situación en un momento dado, nos permite reconstruir el pasado y predecir el futuro.

Los sistemas dinámicos sirven para entender cómo evolucionan los procesos de la naturaleza. Modernamente han dado lugar a importantes descubrimientos, como la existencia del caos.

Un objetivo importante es describir los puntos fijos o estados de estabilidad del sistema dinámico dado, esos son valores de las variables las cuales no cambiaran con el tiempo. Algunos de esos puntos son atractivos o interesantes significa las condiciones que tendrá el sistema al converger en ese determinado estado.

Similarmente otro interés está puesto en comportamientos en ciertos periodos, estados del sistema los cuales repiten después de ciertos periodos de tiempos, estos se le llaman puntos periódicos los cuales también pueden ser de interés.

Sistemas dinámicos simples no lineales la mayoría de las veces se muestran con comportamientos aleatorios, completamente impredecibles que han sido llamados caos. La rama de los sistemas dinámicos, la cual se encarga de conocer la definición y la investigación del caos es conocida como Teoría del Caos.

Principales ramas de la dinámica.

Un sistema dinámico incluye los siguientes elementos:

1. Una fase de espacio, cuyos elementos o puntos representan posibles estados del sistema.
2. Tiempo, el cual es discreto o continuo. Este puede ser extendido en el futuro (irreversible o proceso no invertible) o en el pasado como también en el futuro (reversible o proceso invertible). La secuencia de momentos de tiempo para un proceso reversible de tiempo discreto está en una natural correspondencia a los números enteros; uno irreversible corresponde a considerar solo los enteros no negativos. Similarmente para un proceso de tiempo continuo, el tiempo es representado por todos los números reales en el caso reversible y los números reales no negativos en el caso de los irreversibles.

3. La ley de la evolución del tiempo. Esta es una regla que te permite determinar el estado del sistema en cada momento del tiempo t desde sus estados a todos sus previos estados. En base a esta ley se pueden determinar sus estados pasados y futuros. Si el sistema esta inicialmente en la posición $x \in X$, ese después de cierto tiempo t se encontrara en un nuevo estado el cual es determinado por x y t , y es denotado por $F(x,t)$. Fijando t , nosotros obtenemos una transformación T de $t: x \mapsto F(x,t)$.

La principal característica de las teorías dinámicas las cuales las distingue de otras áreas de las matemáticas relacionadas con grupos de automorfismo de varias estructuras matemáticas, es el énfasis sobre el comportamiento asintótico especialmente en presencia de recurrencias no triviales, esto es, propiedades relativas al comportamiento cuando el tiempo va a infinito.

Históricamente aparecieron primero los sistemas dinámicos suaves de tiempo continuo porque Isaac Newton descubrió que el movimiento de objetos mecánicos puede ser descrito por

ecuaciones diferenciales de segundo grado. Más generalmente muchos fenómenos naturales y sociales tales como la radioactividad, reacciones químicas, crecimiento de la población o dinámica de precios en el mercado pueden ser modelados con varios grados de certitud por sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias. Esas situaciones caen en el dominio de nuestra investigación.

En virtualmente todas las situaciones de interés el espacio en el cual se desarrollan los elementos de un modelo dinámico tiene cierta estructura la cual evoluciona con respecto a la ley del tiempo. Diferentes estructuras han dado el nacimiento a nuevas teorías relacionadas con sistemas dinámicos que preservan esas estructuras. Las más importantes de esas son:

1. Teoría ergódica. Aquí el espacio de desarrollo X es una buena medida espacial, ese es un espacio Lebesgue, con una finita o infinita medida μ . Podemos considerar como una estructura en X con la medida de μ por si misma o su clase equivalente la cual es determinada por la colección de todas las establecidas de medida cero. La teoría ergódica es concerniente con grupos o semi grupos de medidas de transformación de X que preserva μ o transforma está en una medida equivalente. La medida es llamada quasi-invariant. Esta teoría proporciona los apropiados paradigmas y herramientas para estudiar la distribución asintótica y comportamiento estadístico de orbitas de sistemas dinámicos suaves.

2. Dinámica topológica. La fase de espacio en esta teoría es un espacio topológico, usualmente una medida compacta o un espacio localmente compacto. La dinámica topológica concierne con grupos de homeomorfismos y semigrupos de continuas transformaciones de esos espacios. Algunas veces esos objetos son llamados sistemas dinámicos topológicos.

3. Teoría de sistemas dinámicos suaves o dinámicas diferenciables. Como el nombre lo sugiere, la fase de espacio posee la estructura de un distribuidor suave, por ejemplo, un dominio o una superficie cerrada en un espacio euclidiano. Esta teoría concierne con difeomorfismo y flujos (grupos suaves de un parámetro de difeomorfismo) de tales distribuidores e iterates de mapas diferenciables no invertible. El interés en sistemas dinámicos de dimensiones finitas ha estado creciendo durante las últimas dos décadas hacia una larga extendida de problemas en flujo de fluidos, mecánicas estadísticas y otros campos de la física matemática. Muchas direcciones de una dinámica de dimensión infinita han estado desarrollándose a una considerable extensión de analogías con varias ramas en una dinámica de dimensión finita.

Un distribuidor suave de dimensión infinita posee una topología compacta, la teoría de sistemas dinámicos suaves naturalmente diseña sobre nociones y resultados de una dinámica topológica. Otra razón de peso para esas interacciones surge del hecho que en algunos casos con comportamiento asintótico de dinámica de sistemas suaves es probable encontrar muy complicados fenómenos no suaves, los cuales en otro contexto podrían ser rechazados como patológicos. Muchos sistemas suaves no tienen la estructura como tal, entonces se deben de tratar como un problema diferente.

La relación con la teoría ergódica son también íntimas, en ambas las medidas invariantes proveen una poderosa herramienta para el estudio de propiedades asintóticas de sistemas dinámicos suaves y porque la estructura suave de un elemento de dimensión finita determina una clase natural de medidas quasi-invariantes para sistemas dinámicos diferenciables.

4. Hamiltoniana o dinámica simplista. Esta teoría es una natural generalización del estudio de ecuaciones diferenciales de mecanismos clásicos. El espacio aquí es un distribuidor suave incluso dimensional con una ecuación diferencial de segundo grado cerrada no degenerativa. Un grupo de parámetros de las ecuaciones preservan difeomorfismo corresponden a ecuaciones diferenciales hamiltonianas en mecánica clásica.

3.5.3. Sistemas de información geográfica y análisis espacial.

Para este tema se tomaron los principales conceptos del libro: fundamentos de los sistemas de información geográfica, escrito por: Comas y Ruiz¹³⁰

Grandes y refinados sistemas de información geográfica de alta resolución ahora existen para inicializar, calibrar y validar modelos basados en geosimulación. Esas bases de datos proporcionan un extraordinario respaldo para la geosimulación por el tipo de información que ellos contienen de tamaño atómico: parcelas de tierra, segmentos de carretera, casas, parques, instituciones, etc.

Sistemas de información geográfica (SIG) significa cosas diferentes para diferentes gentes. Alguna gente usa estos simplemente para documentar la realidad geográfica. Pero la esencia real de un SIG es la parte analítica, en donde actualmente se explora en un nivel científico las relaciones espaciales, comportamientos y procesos de fenómenos geográficos, culturales,

¹³⁰ David Comas Y Ernest Ruiz, *Fundamentos de los sistemas de información geográfica*, (España: Editorial Ariel Geografía, 1997).

biológicos y físicos. Esta es un área que nos promete mucho para poder conocer como nuestro mundo funciona, evoluciona, se conecta y cambia.

Un sistema de información geográfica (SIG) es una integración de un todo, con aplicaciones de diferentes campos desde geografía a ciencias de la tierra a arquitectura, planeación urbana y ecología.

El término de sistemas de información geográfica fue primeramente publicado por Roger Tomlinson en 1963 y fue también el primer creador de un SIG – el inventario de recursos naturales de Canadá fue dirigido por él- para el Gobierno de Canadá.

La utilización del SIG en actividades comerciales se empezó a utilizar entre los años 70 y 80 después de que los costos de procesamiento, principalmente el hardware y el software de SIG fueran accesibles.

Algunas revisiones en este campo (por ejemplo, Borrough and McDonnell 1998, Longley en 2001) establecen que las principales raíces que han hecho el desarrollo de los SIG son cuatro: la primera las innovaciones de los gráficos por computadora en los inicios de los años 40, esto trajo el desarrollo de la cartografía por computadora a mediados de los años 60 y la creación de mapas rudimentarios usando plotters de líneas e impresoras. El segundo fue el desarrollo de tecnologías en el manejo de bases de datos y sistemas de información, la representación de unidades espaciales requirieron el desarrollo de algoritmos para investigar las estructuras de datos espaciales y resolver problemas tales como “el punto en polígono” y problemas de ese tipo que no se desarrollaron hasta los años 60 y 70. Una tercera fuerza fue generada por el desarrollo del monitoreo remoto del ambiente, inicialmente sirvió a través de satélites para cuestiones militares en los años 50 y posteriormente para cuestiones civiles en los años 60. La cuarta motivación emergió de la posible representación de diferentes tipos de información a través de capas como terrenos y uso de suelos. Un conjunto de técnicas han venido apoyar este desarrollo, particularmente para problemas de planeación de territorio y mejor ilustrado en el trabajo de Mc Harg (1969) fue el primero en automatizar usando ideas de mapas algebraicos y rudimentarias impresoras de línea.

Paralelamente a esos desarrollos el análisis espacial emergió del avanzado de métodos cuantitativos en geografía, geología y ciencias de la tierra también como de ciencias regionales y macroeconómicas. La estadística espacial y los análisis de localización dominaron la geografía en los años 60 y los protagonistas de la revolución cuantitativa de la geografía fueron los

responsable para el desarrollo y aplicación de técnicas que juntas dieron origen a una nueva ciencia de geografía (Johnston 1999). Análisis Espacial (Berry and Marble 1968) ilustra el rápido crecimiento de este campo y simboliza la revolución cuantitativa en geografía. Nos marca las tendencias para las nuevas generaciones.

SIG se desarrolló en paralelo al desarrollo de la estadística espacial y análisis de localización durante los años 70 y 80, con un número de investigadores moviéndose entre aplicaciones cuantitativas y de computación. En este camino algunas de estas técnicas se han desarrollado de una manera más lenta pero incorporando la tecnología del SIG. En la mitad de los años 90 el uso del SIG se ha ampliamente adoptado al análisis espacial, mientras la modelación y la simulación estuvieron siendo desarrolladas de manera paralela al SIG.

El SIG está siendo extendido en muchos campos de la representación espacial, análisis, modelación, políticas y diseño, esto es lo que se conoce “Análisis Espacial Avanzado”.

Análisis espacial usa el SIG como su mayor herramienta, desde las representaciones básicas hasta adaptaciones de problemas de diferente índole. La funcionalidad estándar del SIG proporciona una herramienta para la manipulación y visualización de la información y esto proporciona un ambiente de soporte para aplicaciones de rutina estructuradas en la administración operacional. Sin embargo el soporte para las técnicas de análisis espacial avanzadas es que el SIG proporciona un poderoso camino para general y evaluar estrategias, políticas y planes.

El desarrollo del software de SIG ha sido acompañado de un desarrollo de un mainframe a una computadora de escritorio, con la conjunción de diversas funciones en un solo software (y algunas veces también datos) y diseñados para aplicaciones particulares. Hoy los software comerciales de SIG proporcionan una gama de productos que van desde versiones muy sencillas basadas en internet hasta algunos con potentes motores con una gama de funciones para la manipulación de la información.

Una descripción más a detalle de la historia de un SIG se puede ver en la Gis Timeline¹³¹ del Centro de Investigación CASA (Center Analysis Spatial Advanced).

¹³¹ Analysis Spatial on Line, <http://www.spatialanalysisonline.com/output/> , (Consultado Abril, 2010).

3.5.4. Simulación.

Frecuentemente es necesario simular, es decir, reproducir artificialmente un fenómeno o la relación entrada – salida de un sistema. Esto ocurre siempre cuando la operación de un sistema o la experimentación en el son imposibles, costosas, peligrosas o poco prácticas, como en el entrenamiento del personal de operación, pilotos de aviones, etc. Si esta producción está basada en la ejecución de un programa en una computadora digital, entonces la simulación se llama digital y usualmente se conoce como simulación por computadora¹³².

Simulación por computadora es una herramienta interdisciplinaria y tiene aplicaciones en muchos campos de la ciencia y la tecnología como: ciencias técnicas, biología, medicina, sociología, mercadotecnia, desarrollo urbano e incluso la economía política y mundial. Los resultados obtenidos a través de la simulación influyen cada vez más en las decisiones tomadas no solo en la industria. Por ejemplo Thomas H. Naylor describe en uno de sus artículos el impacto de la simulación por computadora sobre las reformas económicas en la Unión Soviética. Las simulaciones de la economía de la URSS se usaban hace muchos años para analizar la dinámica de este sistema. De acuerdo con Naylor, las investigaciones que conducía el Instituto Central de la Economía Matemática de la Academia de Ciencias de la URSS y la Agencia Estatal de Planeación (GOSPLAN) eran muy avanzadas en los años setentas, donde un grupo muy fuerte y numeroso de economistas, matemáticos y expertos en simulación intentaban simular la economía del país. Según Naylor los pronósticos para el desarrollo de la economía eran poco favorables y mostraban creciente escasez de bienes de consumo, insuficiente desarrollo del sistema energético y creciente falta de materia prima. En la década de los setenta se llevaron a cabo en la URSS simulaciones para averiguar la posibilidad de crear un “sector monetario” con bancos comerciales, el rublo intercambiable y mercado libre. Mijail Gorbachov fue el dirigente Ruso que tomo en serio estos resultados, los cuales mostraban una quiebra inevitable del sistema comunista y una necesidad urgente no solo de reformas económicas, sino también políticas. De esta manera se puede observar que la simulación por computadora tuvo un papel importante en los cambios económicos y políticos en la URSS y en la Europa del Este, los cuales van a influir en la economía mundial.

¹³² Stanislaw Raczynski, *Simulación por Computadora*, (México: Grupo Editorial Noriega, 1993): 9-21.

La simulación sirve a la sociedad en muchos campos, incluso en la medicina. Uno de los problemas de salud más importantes es el desarrollo del SIDA y el entendimiento de los mecanismos del sistema inmunológico humano, con la simulación se puede estimar la propagación de esta enfermedad.

Una parte importante de la simulación es la construcción de modelos y programas para los sistemas complejos con componentes que corren en forma paralela, tanto en la realidad como en el programa de simulación, el paralelismo es una de las herramientas que se deben aprovechar en la simulación.

Para poder conocer la simulación se debe de tener ciertos antecedentes en el análisis de sistemas dinámicos, ecuaciones diferenciales, procesos estocásticos, métodos numéricos y desde luego computación.

Existen varios métodos para representar gráficamente los sistemas dinámicos. Los esquemas de bloques y los diagramas pertenecen a los más usados. Los esquemas de bloques están compuestos por un número de bloques, casi siempre rectángulos, conectados con flechas: los bloques representan los subsistemas caracterizados por sus ganancias, funciones de transferencia u operadores más abstractos; las flechas son las señales de entrada y de salida. En los diagramas (graficas de flujo) las señales son nodos y las flechas representan las funciones de transferencia. La entrada es la causa de lo que ocurre en un subsistema y la salida es el resultado.

Los sistemas los podemos clasificar en dos:

0. Una gran parte de los sistemas a simular contiene elementos que generan señales indeterminadas, caracterizadas por sus propiedades probabilísticas. Usualmente los sistemas de este tipo se llaman sistemas estocásticos. Los resultados de simulación de estos sistemas son variables aleatorias, con cierta distribución de probabilidad. Si el objetivo de simulación y el modelo simplificado están orientados sólo o casi solo a los aspectos probabilísticos del problema, decimos que esta es la simulación de Monte Carlo.
1. Otra clasificación de los sistemas es en función de la salida en relación con su entrada, es decir, está relacionada con el número de estados posibles de un sistema dinámico en el momento. En otras palabras, X es el estado del sistema, si, al conocer X en un momento dado y la entrada del sistema, podemos calcular los estados futuros. Podemos observar

que le número de las clases de equivalencia es igual al número de los estados posibles en el momento, desde luego, para los sistemas cuyos estado está bien definido.

Esta clasificación de los sistemas dinámicos es muy útil en la etapa de la definición del modelo que se va a usar en la simulación, dependiendo de sus características será el lenguaje que utilizaremos.¹³³

3.5.5. Programación orientada a objetos.

La programación orientada a objetos ha tenido un significativo impacto en la geosimulación proporcionando un intuitivo escenario para representar objetos reales en términos computacionales y ofreciendo nuevos lenguajes para desarrollar simulaciones.

Toda la historia de los lenguajes de programación se ha desarrollado en función de una sola idea conductora: hacer que la tarea de realizar programas para ordenadores sea cada vez lo más simple, flexible y portable posible.

La programación basada u orientada en objetos (POO) supone, no solo un nuevo paso hacia ese fin, sino que además, a nuestro juicio, es el más importante acaecido hasta el momento. Como nos comenta Eckel: "A medida que se van desarrollando los lenguajes, se va desarrollando también la posibilidad de resolver problemas cada vez más complejos. En la evolución de cada lenguaje, llega un momento en el que los programadores comienzan a tener dificultades a la hora de manejar programas que sean de un cierto tamaño y sofisticación."¹³⁴

Esta evolución en los lenguajes, ha venido impulsada por tres motores bien distintos:

Los avances tecnológicos.

Los avances conceptuales (de planteamiento).

Los avances en cuanto a enfoque de la programación.

Comenzaremos dando una definición por exclusión de lo que es la POO, es decir, vamos a decir primero qué no es la OOP, para, luego, intentar dar una definición de lo que es.

La POO no es:

Un sistema de comunicación con los programas basados en ratones, ventanas, iconos, etc. Puesto que, normalmente, los lenguajes de POO suelen presentar estas características y puesto

¹³³ Stanislaw Raczynski, *Modeling and simulation, the computer science of illusion*, (United States of America: John Wiley & Sons, Ltd, 2008): 15-25.

¹³⁴ Bruce Eckel, *Aplique C++*, (México: Mc Graw-Hill, 2008): 5.

que habitualmente estos entornos suelen desarrollarse con técnicas de POO, algunas personas tienden a identificar POO y entornos de este tipo. De igual modo a como se tendía a identificar la inteligencia artificial con lenguajes como LISP o PROLOG.

No es un lenguaje. De hecho las técnicas de POO pueden utilizarse en cualquier lenguaje conocido y los que están por venir, aunque estos últimos, al menos en los próximos años, incluirán facilidades para el manejo de objetos. Desde luego, que en los lenguajes que prevén el uso de objetos la implementación de las técnicas de POO resulta mucho más fácil y provechosa que los otros. Pero del mismo modo a lo comentado en el punto anterior, se pueden utilizar estos lenguajes sin que los programas resultantes tengan nada que ver con la POO.

Como ya hemos comentado, la POO es un conjunto de técnicas que nos permiten incrementar enormemente nuestro proceso de producción de software; aumentando drásticamente nuestra productividad por un lado y permitiéndonos abordar proyectos de mucha mayor envergadura por otro.

Usando estas técnicas, nos aseguramos la re-usabilidad de nuestro código, es decir, los objetos que hoy escribimos, si están bien escritos, nos servirán para "siempre".

Hasta aquí, no hay ninguna diferencia con las funciones, una vez escritas, estas nos sirven siempre. Pero es que, y esto sí que es innovador, con POO podemos re-usar ciertos comportamientos de un objeto, ocultando aquellos otros que no nos sirven, o redefinirlos para que los objetos se comporten de acuerdo con las nuevas necesidades.

Veamos un ejemplo simple: si tenemos un coche y queremos que sea más rápido, no construimos un coche nuevo; simplemente le cambiamos el carburador por otro más potente, cambiamos las ruedas por otras más anchas para conseguir mayor estabilidad y le añadimos un sistema turbo. Pero seguimos usando todas las otras piezas de nuestro coche.

Desde el punto de vista de la OOP ¿Qué hemos hecho?

Hemos modificado dos cualidades de nuestro objeto (métodos): el carburador y las ruedas.

Hemos añadido un método nuevo: el sistema turbo.

En programación tradicional, nos hubiésemos visto obligados a construir un coche nuevo por completo.

Dicho en términos de POO, si queremos construir un objeto que comparte ciertas cualidades con otro que ya tenemos creado, no tenemos que volver a crearlo desde el principio;

simplemente, decimos qué queremos usar del antiguo en el nuevo y qué nuevas características tiene nuestro nuevo objeto.

Aún hay más, con POO podemos incorporar objetos que otros programadores han construido en nuestros programas, de igual modo a cómo vamos a una tienda de bricolaje y compramos piezas de madera para ensamblarlas y montar una estantería o una mesa. Pero, es que además podemos modificar los comportamientos de los objetos construidos por otros programadores sin tener que saber cómo los han construido ellos.

Como puede ver, esto supone realmente una nueva concepción en el desarrollo de programas, algo radicalmente nuevo y de una potencia y versatilidad hasta ahora inimaginables.

Como parte importante de la programación orientada a objetos esta la representación de los sistemas a través del Lenguaje Unificado de Modelación (LUM o UML, por sus siglas en inglés, Unified Modeling Language) que vale la pena mencionar en esta parte ya que será utilizado durante el desarrollo de este proyecto. UML es el lenguaje de modelado de sistemas de software más conocido y utilizado en la actualidad; está respaldado por el OMG (Object Management Group). Es un lenguaje gráfico para visualizar, especificar, construir y documentar un sistema. UML ofrece un estándar para describir un "plano" del sistema (modelo), incluyendo aspectos conceptuales tales como procesos de negocio y funciones del sistema, y aspectos concretos como expresiones de lenguajes de programación, esquemas de bases de datos y componentes reutilizables.

Es importante resaltar que UML es un "lenguaje de modelado" para especificar o para describir métodos o procesos. Se utiliza para definir un sistema, para detallar los artefactos en el sistema y para documentar y construir. En otras palabras, es el lenguaje en el que está descrito el modelo.

Se puede aplicar en el desarrollo de software entregando gran variedad de formas para dar soporte a una metodología de desarrollo de software (tal como el Proceso Unificado Racional o RUP), pero no especifica en sí mismo qué metodología o proceso usar.

UML no puede compararse con la programación estructurada, pues UML significa Lenguaje Unificado de Modelación, no es programación, solo se diagrama la realidad de una utilización en un requerimiento. Mientras que, programación estructurada, es una forma de programar como lo es la orientación a objetos, sin embargo, la programación orientada a objetos viene siendo un

complemento perfecto de UML, pero no por eso se toma UML sólo para lenguajes orientados a objetos.

Entre sus más importantes diagramas para la representación de modelos están:

Diagrama de clases.

Un diagrama de clases es un tipo de diagrama estático que describe la estructura de un sistema mostrando sus clases, atributos y las relaciones entre ellos. Los diagramas de clases son utilizados durante el proceso de análisis y diseño de los sistemas, donde se crea el diseño conceptual de la información que se manejará en el sistema, y los componentes que se encargaran del funcionamiento y la relación entre uno y otro.

Representación de: - Requerimientos en entidades y actuaciones. - La arquitectura conceptual de un dominio - Soluciones de diseño en una arquitectura - Componentes de software orientados a objetos.

Diagrama de casos de uso.

En el Lenguaje de Modelado Unificado, un diagrama de casos de uso es una especie de diagrama de comportamiento.

El Lenguaje de Modelado Unificado define una notación gráfica para representar casos de uso llamada modelo de casos de uso. UML no define estándares para que el formato escrito describa los casos de uso, y así mucha gente no entiende que esta notación gráfica define la naturaleza de un caso de uso; sin embargo una notación gráfica puede solo dar una vista general simple de un caso de uso o un conjunto de casos de uso. Los diagramas de casos de uso son a menudo confundidos con los casos de uso. Mientras los dos conceptos están relacionados, los casos de uso son mucho más detallados que los diagramas de casos de uso.

Los conceptos anteriores sobre el lenguaje UML fueron tomados del libro: el lenguaje unificado de modelado, UML 2.0 por Booch y Jacobson¹³⁵.

3.6. Elemento base de la geosimulación: Autómata.

El autómata fue concebido primeramente por el matemático Británico Alan Turing. Desde entonces la idea ha sido expandida y usada para una variedad de propósitos: el autómata forma el principio básico sobre el cual una computadora digital está basada, es la unidad básica de la

¹³⁵ Grady Booch, James Rumbaugh e Ivar Jacobson, *El lenguaje unificado de modelado, UML 2.0*, (Madrid España: Pearson Ediciones, 2006): 15, 32, 56.

inteligencia y vida artificial. Recientemente los autómatas se han visto en el desarrollo de modelos, donde ellos son usados para la construcción de bloques para la simulación por computadora de modelos complejos. Investigadores en geografía y estudios urbanos han comenzado a usar autómatas para desarrollar modelos de sistemas urbanos.

Un autómata es una unidad de procesamiento, la cual puede ser caracterizada usando variables de descripción, una autómata es una unidad con la habilidad de procesar la información de entrada de recursos externos, generalmente entendida a la información contenida en otros vecinos autómatas. Varias reglas pueden ser designadas para determinar como un autómata procesa la información contenida en sus propias características como también la que recibe de sus vecinos. Esas reglas son dependientes del tiempo y pueden ser consideradas como reglas transitorias gobernadas sobre como el autómata debe adaptarse y cambiar con el tiempo en reacción a la información a su alrededor. Esto significa que el autómata puede ser usado para imitar cualquier proceso, ellos son entonces la herramienta más importante para la simulación.

Una clase particular de autómata es el autómata celular (CA) han comenzado a ser populares para la simulación de fenómenos urbanos, también otra forma de autómata es el sistema multi agentes (MAS) están comenzando a ser usados para la modelación urbana. Los autómatas ofrecen ventajas significativas para representar dinámicas espaciales y algunas incluyendo la variable tiempo así como facilitan la investigación al poder modificar los autómatas en estudios geográficos, aplicaciones en sistemas espaciales.

El autómata básico es un mecanismo simple de procesamiento, aun con sorprendente poder y funcionalidad a pesar de su simple especificación. Los autómatas básicos son compuestos de un par de componentes: estados, datos constantes de entrada, reglas y un reloj. El estado describe los atributos internos del autómata: on, off, 1, 0, calle, vía, etc. La entrada de información consiste de datos generados en el exterior para alimentar al autómata la cual procesara usando sus reglas propias. La entrada puede tomar diferentes formas aunque es generalmente formulada como información derivada de los estados de los autómatas contiguos. Las reglas son estados condicionales (los cuales pueden tomar la forma de operadores matemáticos) que definen como un autómata debe reaccionar a la información de su entrada. Generalmente esas reglas son

relacionadas a un reloj del autómeta, determinando como el autómeta debe alterar su propio estado interno en el tiempo en el que recibe la información.¹³⁶

3.7. Modelación y simulación basada en agentes.

Para desarrollar el tema referente a modelación y simulación basada en agentes, tomamos como referencia el libro: *Managing Business Complexity* por North y Macal, el cual nos introduce a los conceptos básicos de esta técnica¹³⁷.

La modelación y simulación basada en agentes (ABMS) es un camino para representar una gran cantidad de decisiones individuales, por un gran número de actores, es el más grande desarrollo práctico de la modelación en los negocios y en el gobierno, desde la invención de las bases de datos relacionales. Esta representa un nuevo camino para entender los datos y generar información que nunca había sido posible disponer antes, es un camino para los negocios y los gobiernos, para ver el futuro, entender y anticipar los probables efectos de sus decisiones en sus mercados, industrias y territorios.

¿Por qué usar ABMS?, hay muchas razones. El mundo está incrementando su complejidad y los sistemas que necesitan ser analizados son cada vez más complejos. Las herramientas de planeación y administración deben de capturar esa complejidad emergente. Algunos sistemas siempre han sido complejos y las herramientas tradicionales no han sido adecuadas para analizar estos. La complejidad debe de ser capturada en su totalidad. Actualmente los datos son capturados en bases de datos cada vez en un nivel más fino. Las ventajas competitivas deben de ser obtenidas de estos nuevos datos. Muchos líderes en las industrias y en los gobiernos están encontrando que sus herramientas de planeación y administración carecen de robustez para la toma de decisiones. Propiamente la modelación basada en agentes les ayudará a resolver estos inconvenientes.

¹³⁶ Paul A. Longley and Michael Batty, *Advanced Spatial Analysis*, the CASA book of GIS, (United States of America: Esri Press, 2011): 61-65.

¹³⁷ Michael J. North and Charles M. Macal, *Managing Business Complexity*, (New York: Oxford University Press, 2007):3-45.

3.7.1. Fundamentos de ABMS.

La modelación basada en agentes (ABMS), 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 una simulación. La programación orientada a objetos provee un ambiente bien definido para organizar los agentes en función de su comportamiento.

ABMS es algunas veces confundido con muchos otros campos principalmente con agentes móviles y con investigaciones en inteligencia artificial. Algunas técnicas usadas en las investigaciones de agentes móviles pueden ser desarrolladas con modelación basada en agentes pero hay una diferencia muy grande en su enfoque.

Los agentes móviles producen agentes individuales que interactúan directamente con otros y algunos esperan su turno para interactuar. La intención de los agentes es conducir transacciones, monitorear sistemas u operar sistemas que representan comportamientos humanos. La simulación basada en agentes, produce agentes que primariamente interactúan con otros a pesar que las interacciones del usuario también pueden ocurrir. La simulación basada en agentes intenta representar el comportamiento de sistemas reales con el fin de proyectar el comportamiento completo del sistema.

Las investigaciones sobre inteligencia artificial se enfocan en la creación sintética del comportamiento humano o la mayor cantidad que realizan los humanos. Naturalmente muchas técnicas de inteligencia artificial pueden ser usadas usando modelos basados en agentes, sin embargo las técnicas son diferentes, mientras la inteligencia artificial se enfatiza en la representación de comportamientos humanos, el énfasis de la modelación basada en agentes enfatiza en el desarrollo de modelos que reproducen elementos críticos de un sistema complejo usando reglas de componentes de diferentes niveles.

3.7.2. ¿Cómo ABMS funciona?

Imaginemos un viaje a un estadio de deportes en un evento mayor. Los asientos están llenos por cientos o miles de fans. Como parte de la diversión los fans empiezan a formar olas en el estadio. Para comenzar una ola, una fila de fans se levanta rápidamente y un momento después se sienta, la fila que sigue se levanta rápidamente y un momento después se sienta, la diversión continua y las filas siguen haciendo estos movimientos. La gente simplemente hace los

movimientos de sentarse y pararse. El grupo en conjunto forma una ola completa que puede cubrir todo el estadio. La modelación basada en agentes cubre la idea de la ola, que cubre todo el estadio. Cada persona o agente hace pequeños, simples movimientos, pero el grupo en conjunto produce resultados complejos.

Aplicando esta analogía los Administradores Sénior conocen a los consumidores, empleados y procesos de negocios, es su conocimiento de la gente lo que hace que se describa la ola en el estadio. La ola resultante representa la salida que cada líder necesita saber acerca del comportamiento de su negocio en el tiempo. Conociendo acerca de esas salidas y siendo capaz de relatar estas en sus preguntas de todos los días puede tomar mejores decisiones más certeras. Así que con la modelación basada en agentes el Administrador Sénior puede usar su conocimiento de los clientes, empleados y procesos de negocios para descubrir estrategias y soluciones para sus Empresas.

Los agentes son elementos tomadores de decisiones en sistemas complejos adaptativos. Los agentes tienen establecidas reglas o patrones de comportamientos que les permite a ellos tomar información, procesar las entradas y entonces 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 adaptación en los sistemas complejos adaptativos. El otro principal recurso es el cambio estructural en el sistema por el mismo en la forma de relaciones entre los diferentes agentes.

Como se muestra en la figura 3.3 todas las cosas que toman decisiones dentro de un sistema de negocios pueden ser vistos como agentes.

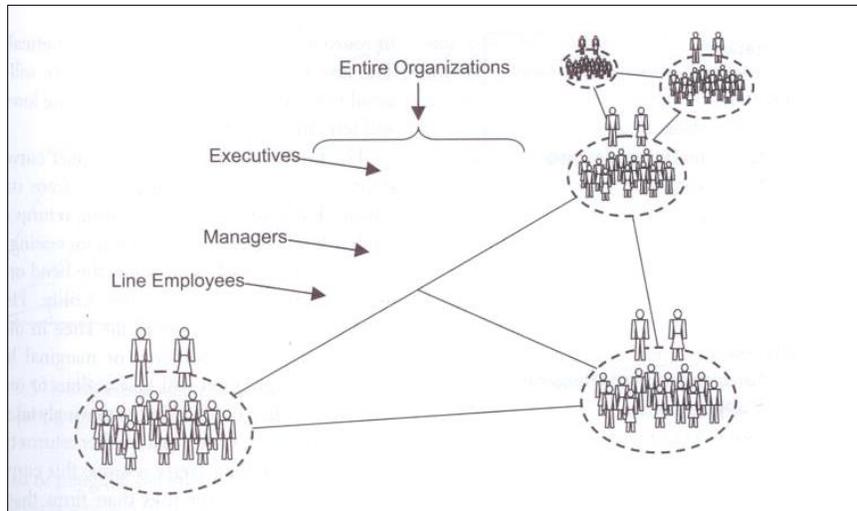


Figura 3.3. Ejemplo de agentes del mundo real.¹³⁸

En la modelación basada en agentes, un agente es un individuo con una serie de atributos establecidos y características de comportamientos como se muestran en la figura 3.7. Los atributos definen lo que un agente es. Los comportamientos característicos definen lo que un agente hace. Típicamente hay variación entre muchos de los agentes en un modelo.

3.7.3. Atributos de los Agentes.

Hay muchos tipos de los atributos de los agentes. Algunos son comunes usados para representar gente, como: edad, ingreso, sexo, historia y varias preferencias. Como se muestra en la figura 3.4, algunos atributos comunes usados para representar ventajas competitivas dentro de los mercados incluyen: recursos, tamaño, tiempos de decisión, y varias estratégicas, preferencias tales como riesgo a la tolerancia, entre otras. Comportamientos comunes incluyen operaciones y planeación. Por supuesto estos atributos y comportamientos necesitan ser especializados para aplicaciones únicas. En la mayoría de las situaciones, el resultado es un modelo multi escala del comportamiento de una organización, con la combinación de interacciones de los empleados a pequeña escala, todo esto para producir las actividades a gran escala de la organización en conjunto, como ejemplo podemos ver la figura 3.5.

¹³⁸ Michael J. North and Charles M. Macal, *Managing Business Complexity*, (New York: Oxford University Press, 2007): 25.

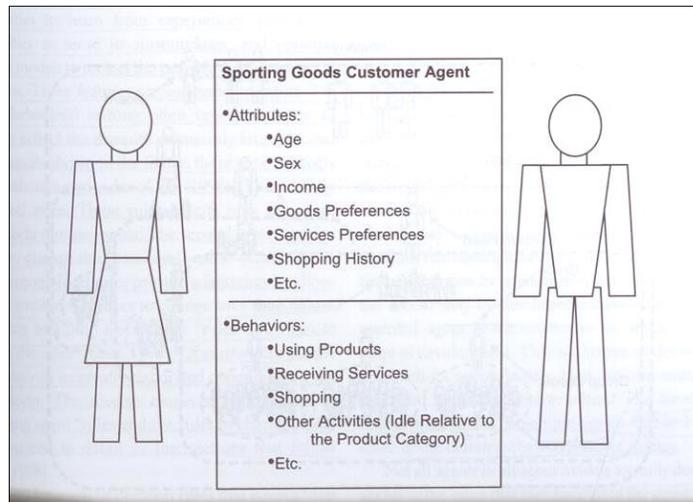


Figura 3.4. Ejemplo de características de agentes.¹³⁹

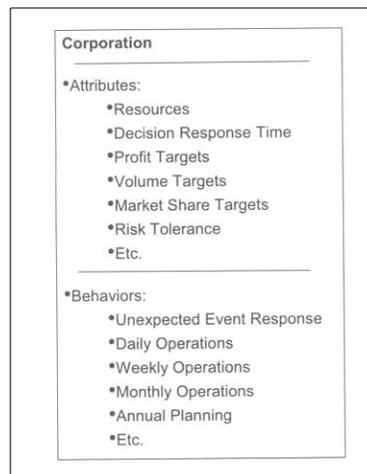


Figura 3.5. Atributos y comportamientos comunes corporativos.¹⁴⁰

Algunos atributos de los agentes, como la edad, puede ser representada de una manera muy simple. Sin embargo muchos atributos de los agentes, tal como preferencias, son multifactoriales y son definidos en múltiples niveles anidados. En una simulación basada en agentes, esos atributos son llevados por cada uno de los agentes y pueden evolucionar o cambiar de manera

¹³⁹ Michael J. North and Charles M. Macal, *Managing Business Complexity*, (New York: Oxford University Press, 2007): 25.

¹⁴⁰ Michael J. North and Charles M. Macal, *Managing Business Complexity*, (New York: Oxford University Press, 2007): 26.

constante con el tiempo, esto en función de la experiencia de cada agente. Un ejemplo son las preferencias estratégicas corporativas.

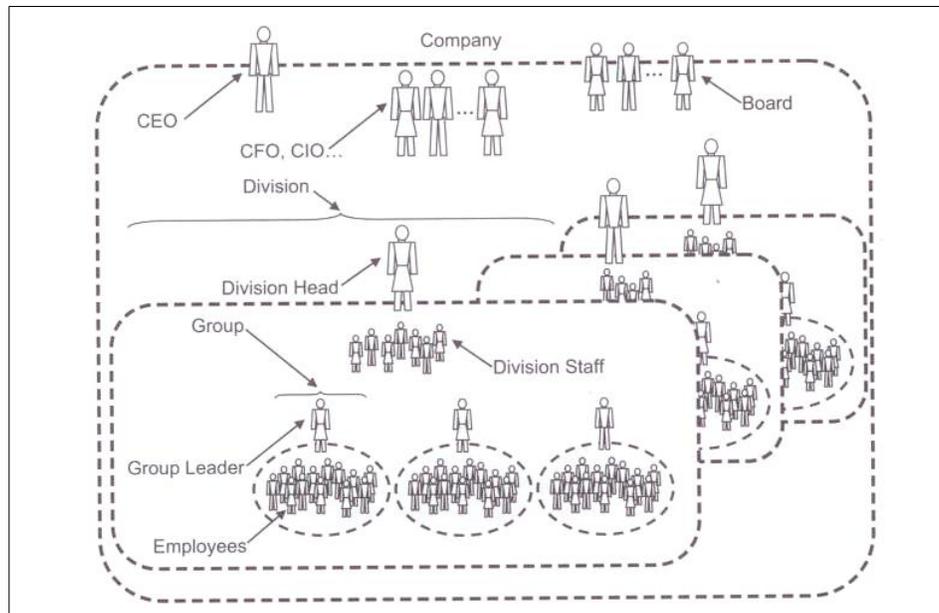


Figura 3.6. Organización multi escala con sus empleados como subagentes.¹⁴¹

3.7.4. Comportamientos de los agentes.

Los agentes tienen diferentes formas de comportamientos. Estos comportamientos incluyen reglas de decisión para la selección de acciones, capacidades de adaptación para aprender de las experiencias, capacidades de percepción para sentir su medioambiente y modelos óptimos internos para proyectar las posibles consecuencias de las decisiones. Esos comportamientos son mostrados en la figura 3.7. Esos comportamientos siempre varían de un agente a otro, para reflejar la diversidad comúnmente encontrada en situaciones reales. Como se muestra en la figura, esencialmente hay dos niveles de reglas para los agentes (Casti 1998). Las primeras son reglas de un nivel base. Esas reglas especifican como los agentes responden a eventos rutinarios. El segundo nivel consiste de reglas para cambiar las (reglas base) reglas (Casti 1998). Esas reglas de segundo nivel proveen adaptación a través del permiso de cambiar las respuestas de las reglas

¹⁴¹ Michael J. North and Charles M. Macal, *Managing Business Complexity*, (New York: Oxford University Press, 2007): 26.

base con el tiempo. Así de acuerdo con Casti, los agentes tienen reglas y reglas para cambiar las reglas. Por supuesto, esta simple jerarquía puede ser muy bien elaborada dependiendo de la aplicación.

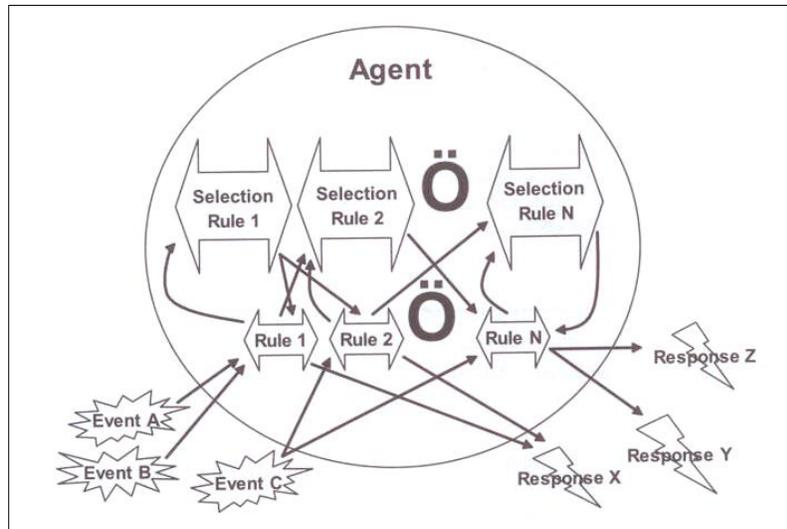


Figura 3.7. Comportamientos básicos de diferentes agentes.¹⁴²

Los agentes tienen establecidas reglas de decisión que gobiernan sus comportamientos. Esas reglas permiten a los agentes interactuar con ellos mismos y comunicarse con otros agentes, también como responder a los estímulos del ambiente. Esas reglas pueden formar agentes con capacidades de responder a una variedad de niveles desde reacciones simples hasta la toma de decisiones muy complejas.

Los agentes siguen en general tres pasos. El primero los agentes evalúan su estado actual y entonces determinan que hacer en el momento actual. Segundo los agentes ejecutan las acciones que ellos han escogido. Tercero los agentes evalúan los resultados de sus acciones y ajustan sus reglas tomando como base los resultados. Esos pasos pueden ser ajustados de muchas formas, incluyendo el uso de simples reglas, reglas complejas, técnicas avanzadas, programas externos o diferentes niveles de subagentes.

¹⁴² Michael J. North and Charles M. Macal, *Managing Business Complexity*, (New York: Oxford University Press, 2007): 28.

3.7.5. Agentes simples o Proto Agentes.

Muchos modelos basados en agentes están compuestos de agentes que no tienen todas las características que han sido usadas para describir uno, aunque las simulaciones son descritas como simulaciones basadas en agentes. Las características que han venido asociadas con los agentes son:

- a. Adaptativos.
- b. Tienen capacidades de aprender y modificar sus comportamientos.
- c. Autónomos y
- d. Heterogéneos, resultando en una población de agentes con diversas características.

El hecho de que un modelo pueda consistir de agentes que carecen de uno o más de esas propiedades implica que el modelo no está basado en agentes. Si no tienen todas las características los agentes del modelo descalificamos de ser un modelo basado en agentes, entonces el resultado puede ser un poco diferente del esperado. Por ejemplo un modelo con no agentes puede lentamente ser transformado en modelo basado en agentes si las características que no fueron incluidas se le agregan más tarde durante su desarrollo. Este tipo de agentes son definidos como Proto-Agentes, los cuales son agentes que carecen de una o más de las características que deben de tener.

No todos los agentes en todos los modelos son completamente desarrollados en el sentido que tienen todas las características que debe de tener un agente base. Dependiendo del modelo, la pregunta importante es si el modelo es estructurado de tal forma que las características no incluidas podrían ser agregadas más tarde dentro de su ambiente de desarrollo. Ellos podrían tener estas características si hubiera una razón para integrar a estas en el modelo y posiblemente hay la intención de sumar estas características en el futuro.

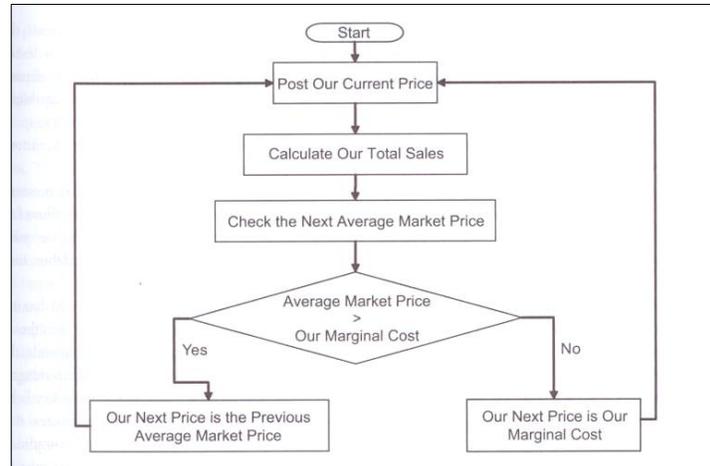


Figura 3.8. Ejemplo de un proto-agente.¹⁴³

3.7.6. Agentes complejos.

¿Qué hay acerca de los agentes que son tan complejos que se adaptan de manera individual? estos agentes tienen la habilidad para cambiar o adaptar reglas de decisión conforme pasa el tiempo. Estos tipos de agentes son requeridos cuando las reglas simples no son suficientes para representar el nivel de adaptación requerido en el sistema a ser modelado. Tales agentes normalmente tienen medidas de comportamiento aplicadas a sus decisiones – para ellos mismos y para sus ambientes. Ellos pueden tener modelos internos para la toma de decisiones sobre sus ambientes y sobre otros agentes. Hay muchas formas para crear tales agentes dentro de un modelo basado en agentes. Reglas complejas, técnicas avanzadas, programas externos y subniveles de agentes pueden todos ser usados.

La completa diferencia entre las fortalezas y requerimientos de un simple y un complejo modelo basado en agentes es muy amplia que produce dos campos en la comunidad de modelación basada en agentes. Siguiendo a Einstein, un campo nos dice que el modelo debe de ser tan simple como sea posible. Este grupo se resiste a elaborar modelos complejos y se enfoca en esta última idea, sus conclusiones son obtenidas de deducciones. El otro campo insiste en que complejos modelos son requeridos para modelar y representar situaciones complejas. Este grupo

¹⁴³ Michael J. North and Charles M. Macal, *Managing Business Complexity*, (New York: Oxford University Press, 2007): 29.

tiende a estar más interesado en producir resultados específicos a detalle, más que descubrir comportamientos universales. Este grupo se enfoca en el realismo o verosimilitud como lo ideal. Verosimilitud es la apariencia de la verdad.

3.7.7. Ejemplo de cómo funcionan los agentes.

Vamos a mostrar un ejemplo para explicar los principios de los agentes, si consideramos algo así como: "Un mosquito infectado que transfiere la infección a un ser humano cuando lo muerde", estamos hablando de un tipo de agente porque estamos diciendo algo que es cierto para todos los mosquitos, estamos diciendo que todos los mosquitos infectados transmiten la infección cuando pican a los seres humanos. Incluso si la transmisión sólo se da con una cierta probabilidad, la declaración seguiría siendo el caso de que todos los mosquitos por lo que estamos hablando de un tipo de agente. Siempre que nos referimos a las características generales de todos los agentes de un tipo particular, esta definición corresponde muy estrechamente a la idea de clase en un lenguaje de programación orientado a objetos. Por lo tanto, sería de esperar que la definición de la clase de un mosquito contenga el código que las transferencias de la infección a un ser humano.

Por el contrario, si decimos algo como, "si los mosquitos no infectados están en la posición (6, 10) muerde a los humanos en la posición (7, 10) entonces estos se infectan", nosotros estamos hablando acerca de una particular instancia de un tipo de mosquito – el cual está en la ubicación (6,10). No podemos esperar ver el código en la definición de la clase que distingue a este caso en particular para su tratamiento. Sin embargo nosotros nos referimos a un agente particular nos estamos refiriendo a una instancia de un tipo de agente, este figura como un objeto creado de una clase correspondiente – de hecho los objetos en programación orientada a objetos son seguidos llamados instancias ya que el termino instancia y objetos se usan de manera similar.

Sin embargo, tenemos que ser un poco más cuidadosos aquí, porque el efecto que se está describiendo es para un caso en particular, los mosquitos, es un caso concreto que parte del caso más general de un mosquito infectado que muerde a un vecino humano que puede infectarse. Ciertamente, se esperaría ver que las características del tipo de mosquito representado en la definición de clase del mosquito, pero aquí nos toca hablar sobre el comportamiento en el contexto de una instancia específica de mosquitos.

Hay tres ingredientes principales de cualquier modelo basado en agentes:

- Los agentes,
- El entorno en el que los agentes existentes,
- Las normas que definen cómo los agentes interactúan entre sí y con su entorno.

Si el modelo se programa con el apoyo de un conjunto de herramientas o no, la mayoría del esfuerzo de programación es probable que se gaste en el código de los tipos de agente, que incluye sus interacciones. Como se describió anteriormente, esto significa escribir las definiciones de clase. Mientras que las herramientas de modelado podría hacer un poco más fácil para definir la sintaxis del código, el modelador todavía tiene que decidir lo que se requiere en términos de características y el agente la lógica de las interacciones con otros agentes y su ambiente. Vamos a dar sólo una descripción de cómo se formaría la clase para el mosquito.

Los agentes constaran de dos aspectos principales:

- Las propiedades o atributos. Por ejemplo, si un mosquito está infectado y, si es así, por cuánto tiempo ha estado infectado.
- Los comportamientos e interacciones. Por ejemplo, ¿qué le sucede a un ser humano cuando ha sido mordido?, o ¿cómo un mosquito decide a que seres humanos a morder?

Asignación de un tipo de agente a una definición de clase orientada a objetos significa encontrar una forma de mapear estos aspectos en el código del programa. Afortunadamente, hay una asignación simple:

- Las propiedades de los agentes individuales se implementan como campos, es decir, a través de variables.
- Los comportamientos y las interacciones se implementan como métodos.

A veces una propiedad en particular es fija e idéntica para un tipo de agente como conjunto, por ejemplo, la duración del período de infección para los mosquitos. Dada que esta propiedad no varía para los individuos, puede ser implementada como una clase de un solo nivel constante, compartida para todas las instancias.

En la sección siguiente se ilustran todos estos agentes tipo de asignaciones de clase en código fuente escrito Java.

El mosquito simplificado tiene dos propiedades individuales: si está infectado (un valor de tipo booleano verdadero o falso) y el estado de su infección. Cada instancia de agente tendrá su propia copia de estas propiedades, lo que permite que algunos agentes estén infectados mientras que otros no. Como la máxima longitud de la infección es una propiedad que es la misma para todos los mosquitos, esta ha sido definida en la forma de una clase variable denotada por el modificador static en la definición de clase.

Código escrito en lenguaje fuente Java.

```
private static final double INFECTION_LENGTH double = 2.0

public class Mosquito {

// Whether the mosquito is infected.

private boolean infected = false;

// The infection stage, if infected.

private double infectionStage = 0;

// The maximum infection length for all mosquitoes.

private static final double INFECTION_LENGTH = 2.0;

public boolean isInfected() {

return infected;

}

public void infect() {

// Become infected.
```

```

infected = true;

infectionStage = 0;

}

public void step() {

// Update the infection stage, if infected.

if(infected) {

infectionStage += 1;

if(infectionStage >= INFECTION_LENGTH) {

infected = false;

}

}

// Other actions taken on each step

...

}

public void bite(Human h) {

// Bite the given human.

if(h.isInfected()) {

infect(); // Pick up infection from the human.

}

else if(infected) {

h.infect(); // Transmit infection to the human.

```

```
}  
  
else {  
  
// Do nothing.  
  
}  
  
}  
  
...  
  
}
```

El uso de la palabra final aquí indica que el valor de la propiedad es constante.

Existen tres comportamientos e interacciones en la clase en la forma de los métodos `infect`, `step` y `bite`. El cuarto método, `isInfected`, es un método de investigación, este nos permite saber si nuestro mosquito está infectado o no. Tal método no altera el estado del agente, este sólo nos dice algo acerca de una parte de su estado. Tales métodos son a menudo llamados métodos de acceso. Por el contrario, el método `infect` es conocido como un método mutador porque modifica (es decir, muta) el estado de un agente. En este caso, las propiedades de infección del mosquito se alteran.

El método `bite` ilustra la interacción entre un mosquito y otro tipo de agente, un ser humano. Si el ser humano mordido ya está infectado entonces el mosquito se infecta. Del mismo modo, si el ser humano mordido no está infectado antes de la mordedura, pero el mosquito sí, entonces la infección se transmite al ser humano. Por último, el método `step` representa el paso del tiempo de simulación, causando una infección dentro del mosquito su progreso y posiblemente su muerte. Hay casi seguro que se deberán de presentar otras interacciones, pero se han omitido en aras de la simplicidad.

Lo que nuestra clase del ejemplo no muestra es lo siguiente: (i) cómo los seres humanos en la zona de un mosquito son identificados y pasan a su método de `bite`, y (ii) cómo y cuándo el método `step` es llamado. Para ilustrar estos aspectos nosotros necesitamos explorar clases más

complejas y una infraestructura de simulación en conjunto, lo cual sería complicado explicar aquí.

3.7.8. Orígenes de la modelación basada en agentes.

La simulación y modelación basada en agentes tiene sus orígenes históricos en el estudio de los sistemas complejos adaptativos (CAS). CAS fue originalmente motivado por investigaciones dentro de la adaptación y emergencia de sistemas biológicos. El campo de CAS concierne el mismo con sistemas compuestos de individuales y componentes interactuando y sus mecanismos adaptativos que tal sistema presenta. La definición de las características de un CAS es la habilidad para adaptarse a un ambiente cambiante. Un sistema adaptativo complejo aprende con el tiempo como efectivamente responder a situaciones nuevas. CAS tiene la habilidad de auto organizarse y organizar sus componentes para sobrevivir y tener un mejor desempeño dentro de sus ambientes. CAS presenta la característica exhibida de organizarse y adaptarse a múltiples escalas como se muestra en la figura 3.9. La habilidad para adaptarse es una de las capacidades claves que tiene como Sistema Adaptativo Complejo (CAS).

El campo de la modelación basada en agentes (ABMS) continúa expandiéndose más allá de sus orígenes en sistemas biológicos, entrando en otros campos, esto debido a sus técnicas y aplicaciones. ABMS también se ha enriquecido de otros campos tradicionales, como la ciencia de sistemas, ciencia de la complejidad, ciencias de la computación, ciencias administrativas y ciencias sociales, son algunos de los campos que han hecho significativas aportaciones a las técnicas y aplicaciones de los ABMS.

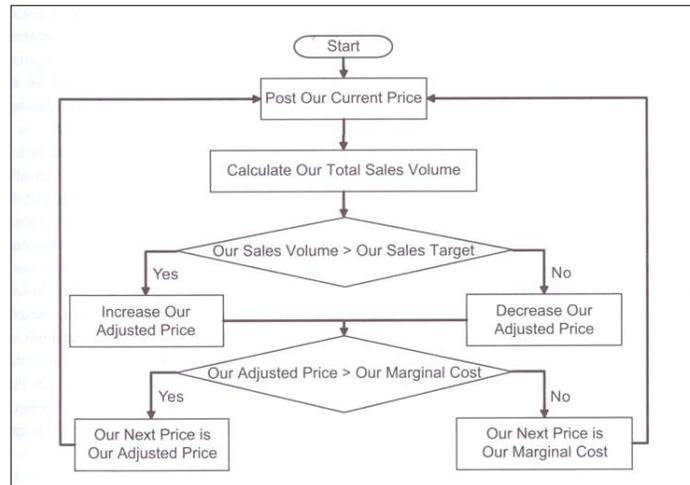


Figura 3.9. Ejemplo de un agente de un mercado.¹⁴⁴

ABMS ha encontrado aplicaciones para resolver problemas prácticos de negocios. Un número grande de Compañías y Organizaciones han sido formadas para facilitar, formar y promover las aplicaciones prácticas para resolver problemas en el campo de los negocios.

Muchos han escuchado algunos de los términos de complejidad, sistemas complejos adaptativos, modelación y simulación basada en agentes. El termino agentes autónomos, inteligencia de enjambre, vida artificial, auto organización, programación evolucionaria y sociedades artificiales son algunos de los términos comúnmente utilizados en el campo.

3.7.9. Metodologías de modelación basadas en geosimulación.

En esta parte se presenta la metodología que se utilizó en el diseño del modelo de geosimulación, esta fue desarrollada por el Dr. Walid Ali, la cual fue tomada de su libro titulado 2D/3D Multiagent Geosimulacion del Dr. Walid Ali¹⁴⁵

Se presentan los principales pasos de un método genérico que puede ser seguido, cuando se desarrollan aplicaciones de geosimulación basadas en multi agentes en dos y tres dimensiones, simulaciones de varios tipos de sistemas y comportamientos en ambientes geográficos virtuales.

¹⁴⁴ Michael J. North and Charles M. Macal, *Managing Business Complexity*, (New York: Oxford University Press, 2007): 29.

¹⁴⁵ Walid Ali, *2D/3D Multiagent Geosimulacion, The case of shopping behavior in square one mall (Toronto)*, (Toronto Canada: VDM Verlag, 2008): 15-40.

Los pasos se describen en los siguientes párrafos y son mostrados en la figura 3.10.

1. Identificar las necesidades de los usuarios de geosimulación a través de multi agentes. Identifica los futuros usuarios, las limitantes del sistema y por supuesto las limitantes espaciales de la simulación. Identificando los límites del fenómeno a simular y su ambiente es una tarea muy importante porque eso define los factores internos y externos que afectan el fenómeno a ser simulado también como las entradas y salidas del sistema.
2. Especificación de las características del sistema a ser simulado. Basado en las necesidades de los usuarios, debemos de identificar las características del fenómeno a ser simulado y las variables de su ambiente, incluyendo las variables espaciales y no espaciales, con los límites que fueron definidos en el paso anterior.
3. Creación de los modelos de geosimulación basados en multi agentes. Con el fin de ser capaz de simular los sistemas estudiados y su comportamiento a través de una computadora, nosotros debemos de modelar este así como su ambiente, tomando en cuenta los aspectos espaciales y no espaciales. Dependiendo de las necesidades especificadas en el primer paso debemos de ser capaces de escoger el nivel de detalle del modelo. Debido a que el modelo es basado en multi agentes se deben de usar técnicas de diseño con una orientación hacia los agentes para crear modelos y representar las entidades simuladas.
4. Seleccionar la herramienta, plataforma o lenguaje de geosimulación basada en multi agentes. Para este paso tenemos dos opciones:
 - a. Implementar nuestro modelo de simulación usando un lenguaje estándar, como C, C++ o Java por ejemplo, debemos de seleccionar el lenguaje para la implementación.
 - b. Usar una herramienta, plataforma o lenguaje existente para ejecutar el modelo de simulación.
 - c. Colectar y analizar datos usados como entrada en el modelo de geosimulación basado en multi agentes. En este paso nosotros colectamos datos y los transformamos con el fin de alimentar al modelo de simulación, debemos de tener los espaciales y no espaciales requeridos.
5. Ejecutar el modelo de geosimulación basada en multi agentes, usando los datos antes obtenidos.

6. Colectar y analizar los datos generados por el modelo de geosimulación basado en multi agentes. Para ser útil la aplicación de simulación debe de dar resultados significativos, basados en estos los usuarios podrán tomar decisiones con mejores fundamentos.
7. Verificación y validación de los modelos de geosimulación basados en multi agentes. Durante este paso de nuestro método podemos comparar el comportamiento del modelo bajo condiciones conocidas con el del sistema real.
8. Probar y documentar los resultados del modelo. En la documentación nosotros presentamos los resultados del análisis del sistema, los modelos de simulación, la seleccionada plataforma, lenguaje o herramienta, una guía de uso de la interface de simulación, los resultados de entrada y salida, etc.
9. Uso de la aplicación de geosimulación basada en multi agentes. La aplicación puede ser usada para:
 - a. Entender el sistema a ser simulado observando varias corridas en el tiempo.
 - b. Comprobar hipótesis acerca del sistema a ser simulado.
 - c. Ahorrar tiempo observando el sistema por largos periodos de tiempo en tiempos pequeños.
 - d. Experimentar con el sistema en nuevas situaciones o contextos dependiendo de cierto tipo de decisiones o influencias.

En adición a las librerías, existe software disponible para desarrollar modelos basados en agentes, los cuales pueden simplificar la implementación de los procesos. El software niega la necesidad de desarrollar aplicaciones con un bajo nivel de programación. El software es usual para el rápido desarrollo de modelos de prototipos básicos. Algún software es restringido al diseño de tareas, son limitados en ambientes (raster solo) en el cual el modelo o el agente pueden ser restringidos en tamaño. Un modelador será restringido en funcionalidad proporcionado por el software.

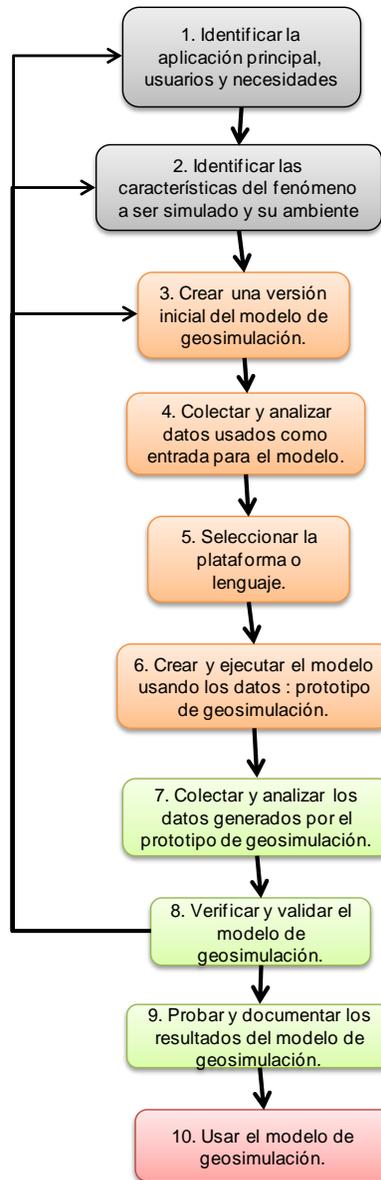


Figura 3.10. Método genérico para el desarrollo de geosimulación basadas en multi agentes de dos y tres dimensiones.¹⁴⁶

¹⁴⁶ Creación propia.

3.7.9. Ventajas y desventajas de usar modelación y simulación basada en agentes.

Con respecto al documento llamado “principios y conceptos de modelación basada en agentes para el desarrollo de simulaciones geoespaciales”¹⁴⁷ publicado por el Centro de Análisis Especial Avanzada, las ventajas y desventajas de la utilización de esta técnica son las siguientes:

Ventajas.

Hay tres principales ventajas que se atribuyen al enfoque basado en agentes sobre las técnicas de modelado tradicionales, como la de los sistemas no lineales dinámicos en los que las variables relacionadas están en un estado de agregación (como por ejemplo, los sistemas de ecuaciones diferenciales). La modelación basada en agentes tiene los siguientes beneficios: 1) capta los fenómenos emergentes, 2) ofrece un ambiente natural para el estudio de ciertos sistemas, y 3) es flexible, especialmente en relación con el desarrollo de modelos geo espaciales.

La emergencia es un fenómeno, junto con otras conductas sorprendentes e inesperados desconocidos para la ciencia clásica, como la auto-organización, el caos, la adaptación, etc., que son característicos de los sistemas complejos. El estudio de los fenómenos caracterizados por la interacción entre muchos componentes distintos se denomina "complejidad agregada" (Manson, 2001, en prensa). Los fenómenos emergentes se caracterizan por la estabilidad de los patrones macroscópicos que surgen de la interacción local de las entidades individuales (Epstein y Axtell, 1996). Por definición, los fenómenos emergentes no puede reducirse a partes del sistema; el conjunto es más que la suma de las partes. Por lo tanto, los fenómenos emergentes pueden exhibir propiedades que están desconectados (es decir, lógicamente independientes) de las propiedades de las partes del sistema. En resumen, el propósito de la complejidad global es llegar a comprender por reducción, y el montaje de un sistema de complejidad agregada, donde la ruptura crítica con la ciencia reduccionista anterior es el intento de montaje (O'Sullivan, 2004). La complejidad agregada es de particular interés para los geógrafos, ya que implica que la configuración espacial de las interacciones locales afecta a los resultados a nivel de todo el sistema.

¹⁴⁷ Christian J. E. Castle And Andrew T. Crooks, “Principles and Concepts of Agent-Based Modelling for Developing Geospatial Simulations”, *Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London*, Paper 110 (Septiembre, 2006): 1-19.

En muchos casos, la modelación basada en agentes (ABMS), es un método natural para la descripción y simulación de un sistema compuesto de entidades del mundo real. El enfoque basado en agentes es más parecido a la realidad que otros enfoques de modelado, lo que hace inherentemente ABMS adecuada para la simulación de las personas y objetos de una manera muy realista. Por ejemplo, podría decirse que es más fácil de conceptualizar, un modelo de cómo las personas hacen la evacuación de un edificio durante una emergencia, que lo que lo haría un sistema de ecuaciones que describen la dinámica de la densidad de los evacuados. Sin embargo, las ecuaciones con respecto a la densidad de los evacuados es el resultado del comportamiento de los evacuados, el enfoque basado en agentes además permitirá el poder estudiar las propiedades globales del sistema. En particular, el enfoque basado en agentes puede ser útil cuando es más natural para describir los elementos constitutivos de un sistema de bajo alguna de las siguientes condiciones:

1. El comportamiento de los individuos no puede ser claramente definido a través de las tasas de transición de agregado (por ejemplo, el pánico dentro de una multitud que huía).
2. El comportamiento individual es complejo. Aunque hipotéticamente cualquier proceso puede ser explicado por una ecuación, la complejidad de las ecuaciones diferenciales aumenta exponencialmente a medida que aumenta la complejidad de la conducta. Al describir el comportamiento individual con ecuaciones complejas por lo tanto, puede llegar a ser intratable.
3. Las actividades son sin duda una forma más natural de describir un sistema de procesos.
4. El comportamiento del agente es estocástico. Puntos de aleatoriedad se puede aplicar estratégicamente dentro de los modelos basados en agentes, se opone a la forma arbitraria en las ecuaciones de agregación.

Por último, el enfoque basado en agentes para el modelado es flexible, especialmente en relación a la modelización geo espacial. En particular, las simulaciones espaciales pueden beneficiarse de la movilidad que los modelos basados en agentes ofrecen. Para reiterar, un modelo basado en agentes se puede definir en cualquier entorno de un sistema determinado (por ejemplo, un edificio, una ciudad, una red de carreteras, una red de ordenadores, etc.). Además, los agentes tienen la capacidad de moverse físicamente dentro de su entorno, en diferentes direcciones y en diferentes velocidades. De la movilidad del agente hace ABMS muy flexible en

términos de variables posibles y los parámetros que se pueden especificar. Ciudades se pueden especificar usando una variedad de mecanismos. La aplicación de las interacciones del agente puede ser fácilmente regido por el espacio, las redes, o una combinación de estructuras. Esto sería mucho más complejo el explicarlo a través de las matemáticas. Significativamente, el agente de los modelos puede regular los comportamientos basados en las interacciones en una distancia específica y una dirección. Los modelos basados en agentes también ofrecen un marco sólido y flexible para el ajuste de la complejidad de los agentes (es decir, su comportamiento, el grado de racionalidad, la capacidad de aprender y evolucionar, y las reglas de interacción). Otra dimensión de la flexibilidad es la capacidad para ajustar los niveles de descripción y agregación. Es fácil experimentar con los agentes agregados, subgrupos de los agentes y los agentes individuales, con diferentes niveles de descripción de la coexistencia dentro de un modelo. Por lo tanto, el enfoque basado en el agente se puede utilizar cuando el nivel apropiado de la descripción o la complejidad es desconocida, y la búsqueda de un nivel adecuado requiere la exploración.

Desventajas.

El entusiasmo de la adopción del enfoque de gestión por agentes para el modelado geoespacial se ve restringido por algunas limitaciones. Aunque es común en todas las técnicas de modelado, una cuestión que se refiere a la finalidad del modelo, nos dice que un modelo es tan útil como la finalidad para la que fue construido. Un modelo tiene que ser construido en el nivel adecuado para la descripción de cada fenómeno, el detalle depende del propósito para el cual se construyó. Esto sigue siendo un arte más que una ciencia. La naturaleza del sistema que está siendo modelado es otra consideración. Por ejemplo, en un sistema basado en los seres humanos se involucran agentes con comportamientos potencialmente irracionales, elecciones subjetivas y compleja psicologías. Estos factores son difíciles de cuantificar, calibrar, y a veces se justifican, lo que complica la aplicación y el desarrollo del modelo, así como la interpretación de sus resultados. Sin embargo, la motivación fundamental para el modelado se deriva de la falta de acceso completo a los datos relativos a un fenómeno de interés. A menudo, el propio objetivo no es ni bien entendido ni de fácil acceso. El desarrollo de modelos basados en agentes ofrece un medio para aumentar la utilidad de los modelos de simulación, muy de cerca la adaptación del modelo y posterior análisis de las necesidades de los usuarios finales. En particular, la comunicación a menudo visual proporcionada por modelos espacialmente explícitos,

especialmente los que, junto con los SIG, puede ser eficaz en la que muestra los resultados formales del modelo para una amplia gama de usuarios. No obstante, la producción de un modelo debe interpretarse adecuadamente. Diversos grados de exactitud e integridad de los datos del modelo determinan si la salida debe ser utilizada únicamente para visión cualitativa, cuantitativa o de pronóstico exacto.

Por su propia definición, los modelos basados en agentes consideran los sistemas a un nivel desagregado. Este nivel de detalle consiste en la descripción de los atributos de los agentes, sus comportamientos y su interacción con el entorno. La única manera de tratar este tipo de problemas con sistemas computacionales es a través de múltiples ejecuciones, de manera sistemática las diversas condiciones iniciales o parámetros con el fin de evaluar la solidez de los resultados. Existe un límite práctico superior del número de parámetros que se puede comprobar por la robustez, y este proceso puede ser extremadamente desde el punto de vista computacional intensivo, por lo tanto este tardara en ejecutarse mucho tiempo. Aunque el poder de computación se está incrementando rápidamente, el requisito de alta computación que demanda un programa basado en agentes sigue siendo una limitación en el modelado para sistemas grandes.

Por último, los críticos de la teoría de la complejidad afirman que la amplia variedad de comportamientos sorprendentes exhibida por los modelos matemáticos y computacionales se encuentran raramente en el mundo real. En particular, los modelos basados en agentes son muy sensibles a las condiciones iniciales y a las pequeñas variaciones en las reglas de interacción. En consecuencia, los modeladores de sistemas complejos no es probable que disfruten de la comodidad intelectual de las leyes. A pesar de esto, y las otras limitaciones que se han destacado, la modelación basada en agentes, afirman los teóricos de los sistemas complejos, es una herramienta útil para la exploración de los sistemas que exhiben un comportamiento complejo. La teoría de la complejidad ha llevado a la conciencia de los aspectos sutiles, diversos e interconectados comunes a muchos fenómenos, y sigue contribuyendo en muchos poderosos conceptos, enfoques y técnicas de modelado.

3.7.10. Evolución y estado del uso de la modelación basada en agentes.

Con el fin de conocer la evolución y el estado en el uso de la modelación basada en agentes se consultó, una recopilación de encuestas e investigaciones, hecha por la Sociedad de Inteligencia artificial y Simulación, con el fin de conocer cómo se están desarrollando y usando los modelos basados en agentes, se consultaron las prácticas en esta rama en el periodo de Enero de 1998 a Julio del 2008, los resultados se muestran en los siguientes párrafos.¹⁴⁸

En la década de 1990, el modelado basado en agentes (ABMS) comenzó a ganar popularidad y se empezó a separar de los enfoques clásicos de simulación. Su evolución reciente y su creciente aplicación de esta simulación, en lugar de disciplinas tradicionales, indica la necesidad de evaluar continuamente el estado actual de ABMS e identificar oportunidades de mejora. Para comenzar a satisfacer esta necesidad, se examinaron y se recopilaron datos de 279 artículos de 92 fuentes de publicaciones únicas, en las que los autores habían construido y analizado modelos basados en agentes. Sobre la base de las prácticas actuales se discuten seis mejoras necesarias para avanzar en ABMS como herramienta de análisis. Estas mejoras incluyen el desarrollo de herramientas específicas de gestión por actividades, que son independientes del software, el desarrollo de la ABMS como una disciplina independiente con un lenguaje común que se extienda a través de los diferentes campos, la creación de expectativas de ABMS que responden a sus fines previstos, el requisito de una descripción completa de la simulación para que otros usuarios de forma independiente puedan replicar los resultados, el requisito de que todos los modelos sean completamente validados y el desarrollo y aplicación de técnicas de validación estadística y no estadística específicamente para los ABMS.

El desglose del número de artículos por año de publicación se muestra en la Figura 3.11. La figura indica que la mayoría de las muestras provienen de revistas de publicación con cuatro o menos artículos. Esto significa que muchas diferentes revistas están aceptando artículos de ABMS, una tendencia agradable para el campo. La figura 3.12 muestra una amplia variedad de temas, incluyendo aplicaciones militares, la biología, la economía, las ciencias sociales, las empresas, la teoría de la complejidad y la simulación. Esta diversidad de temas en el intervalo de

¹⁴⁸ Brian Heath, Raymond Hill and Frank Ciarallo, "A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008)", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>, (Consultado Octubre, 2011).

revistas más apoya nuestra reivindicación de que esta muestra es una representación significativa del campo de ABMS.

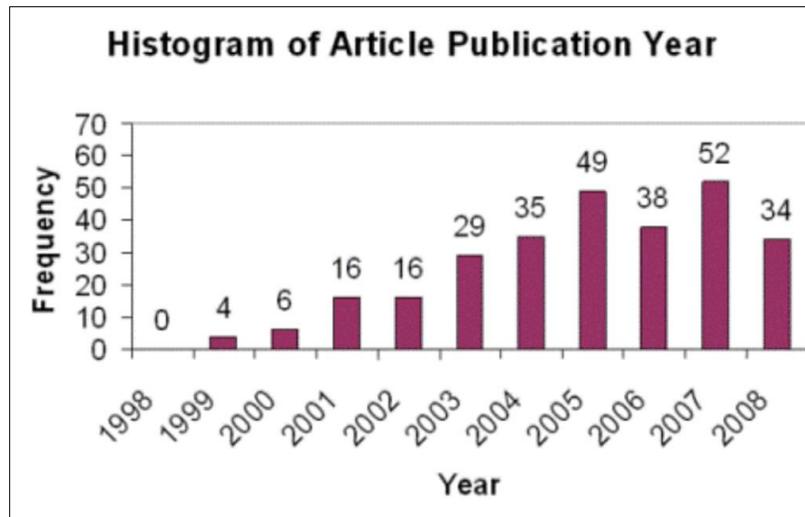


Figura 3.11. Número de artículos por año.¹⁴⁹

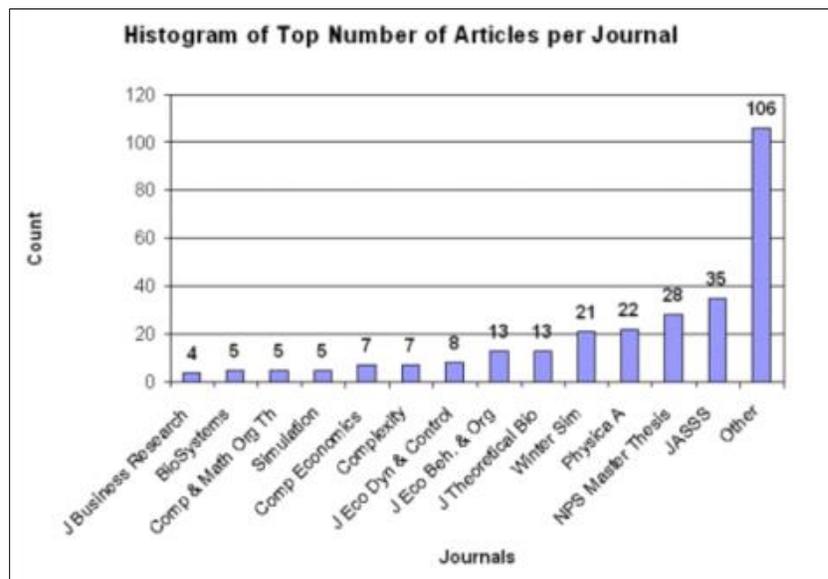


Figura 3.12 Número de artículos publicados de acuerdo con tema.¹⁵⁰

¹⁴⁹ Brian Heath, Raymond Hill and Frank Ciarallo, "A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008)", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>, (Consultado Octubre, 2011).

¹⁵⁰ Brian Heath, Raymond Hill and Frank Ciarallo, "A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008)", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>, (Consultado Octubre, 2011).

La figura 3.13 muestra un resumen de los paquetes de software o lenguajes de programación utilizados. En conjunto, un total de 68 paquetes de software únicos o lenguajes de programación se hace referencia a muchos de ellos (22.6%) que se hace referencia de menos de tres veces en total. Es evidente que ambos paquetes ABMS específicos de software y lenguajes de programación genéricos se están utilizando y que los paquetes de software más populares son los que son de dominio público. De hecho, sólo AnyLogic y Matlab son paquetes comerciales que figuran. Un resultado sorprendente es que 104 artículos (37.3%) no proporcionaron ningún detalle sobre qué paquete o lenguaje de programación se utilizó para construir y ejecutar la simulación. Además, no hay ninguna evidencia clara en los datos que sugieren que los paquetes de software o lenguajes de programación son más populares.

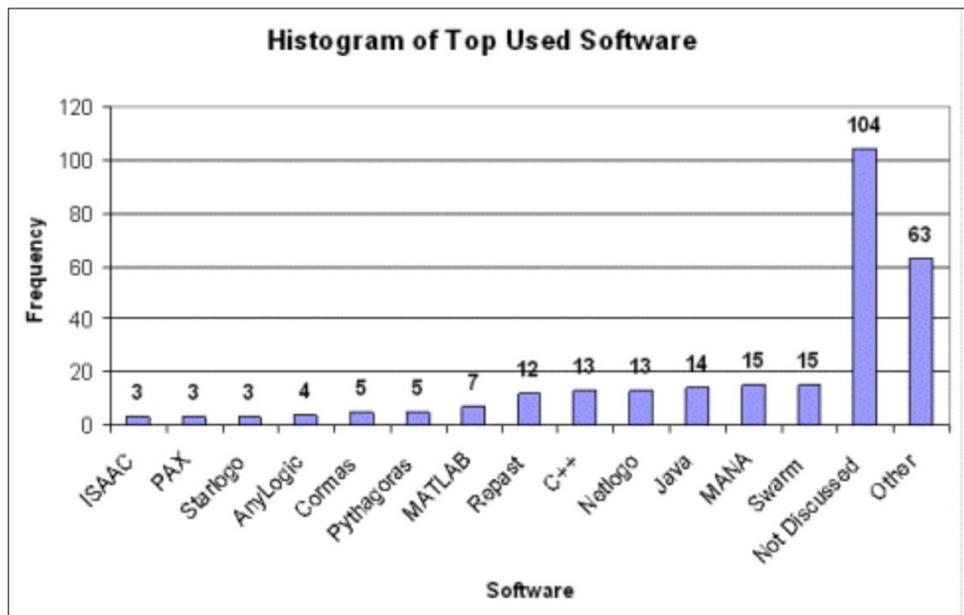


Figura 3.13 Software utilizado en el diseño de modelos.¹⁵¹

El desglose de los artículos por campo se muestra en la figura 3.14. En la muestra de los tres campos de estudio más populares usando ABMS, que son la economía, las ciencias sociales y biología. En general, los campos de estudio de la encuesta muestran que ABMS sigue siendo utilizado por los campos, cuyos sistemas implican muchas entidades autónomas que interactúan.

¹⁵¹ Brian Heath, Raymond Hill and Frank Ciarallo, "A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008)", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>, (Consultado Octubre, 2011).

Esto apoya la creencia fundamental de que ABMS es bueno en el modelado y el análisis de las entidades que interactúan. Aunque la mayoría de los campos de estudio de la encuesta no son las disciplinas científicas tradicionales, todavía hay un número importante de las disciplinas tradicionales que utilizan ABMS. Esto apoya el gran atractivo de la ABMS como una metodología.

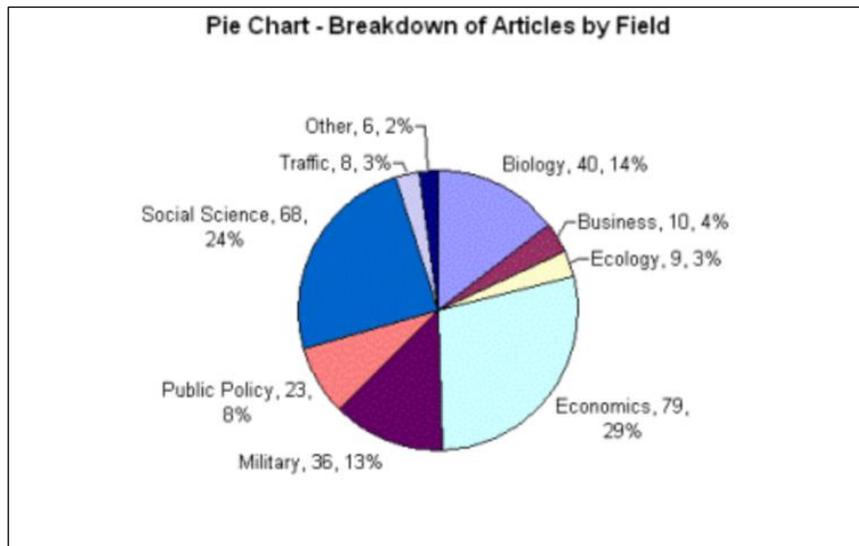


Figura 3.14 Artículos publicados por campo de estudio.¹⁵²

En cuanto a la finalidad del modelo, 111 (39.8%) de los modelos estudiados fueron generadores, 168 (60.2%) fueron mediadores y 0 (0.0%) fueron predictores. Esto confirma la creencia de que los modelos basados en agentes se utilizan sobre todo para conocer mejor el sistema de interés. Es interesante observar un número casi igual de generadores y mediadores. Simuladores no sólo utilizan modelos basados en agentes para generar teorías acerca del comportamiento de un sistema, sino como un instrumento mediador para capturar ciertos comportamientos del sistema y para caracterizar el funcionamiento del sistema bajo ciertos escenarios. Esta característica general de cómo los modelos basados en agentes se utilizan es relativamente constante durante los últimos 10 años, como se muestra en la figura 3.15.

¹⁵² Brian Heath, Raymond Hill and Frank Ciarallo, "A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008)", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>, (Consultado Octubre, 2011).

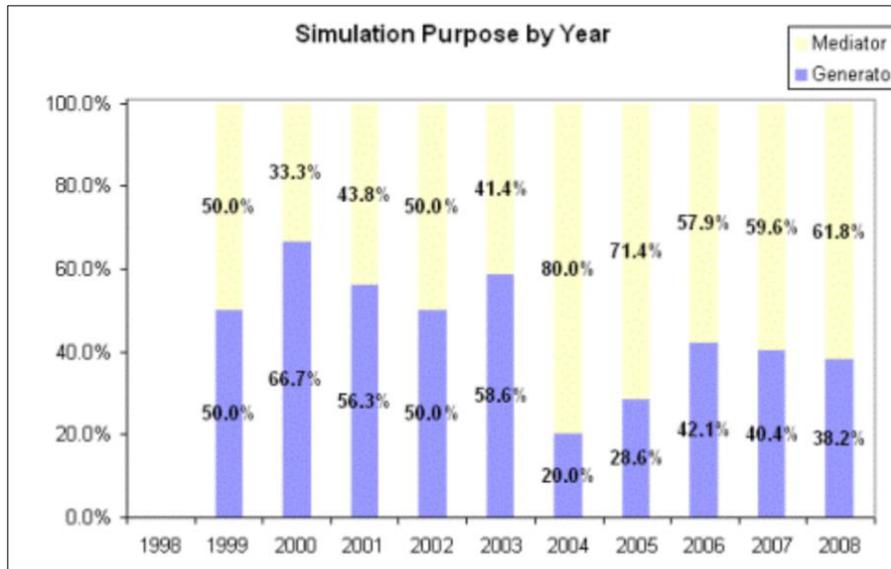


Figura 3.15 Propósito de la simulación por año.¹⁵³

No parece haber diferentes campos de aplicación para el desarrollo de modelos. Como se muestra en la figura 3.16, los únicos campos donde la mayoría de los modelos se han desarrollado son las ciencias sociales (66.2%) y la economía (65.8%). Los campos con el menor número de modelos son los negocios (0.0%), la política pública (4.3%) y los militares (5.6%). Estas diferencias son razonables. Las ciencias sociales y la economía son todavía relativamente nuevas y en el proceso de desarrollo de las teorías acerca de cómo sus sistemas de interés operaran. Así, utilizando modelos basados en agentes como generadores les permite explorar hipótesis e ideas, que no son fácilmente manipuladas utilizando otras técnicas. Por el contrario, tiene sentido que los negocios, la política pública y las fuerzas armadas están más interesados en la mediación de los modelos que se pueden utilizar para comprender mejor el sistema con el fin de explotar algún aspecto de las características del sistema.

¹⁵³ Brian Heath, Raymond Hill and Frank Ciarallo, "A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008)", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>, (Consultado Octubre, 2011).

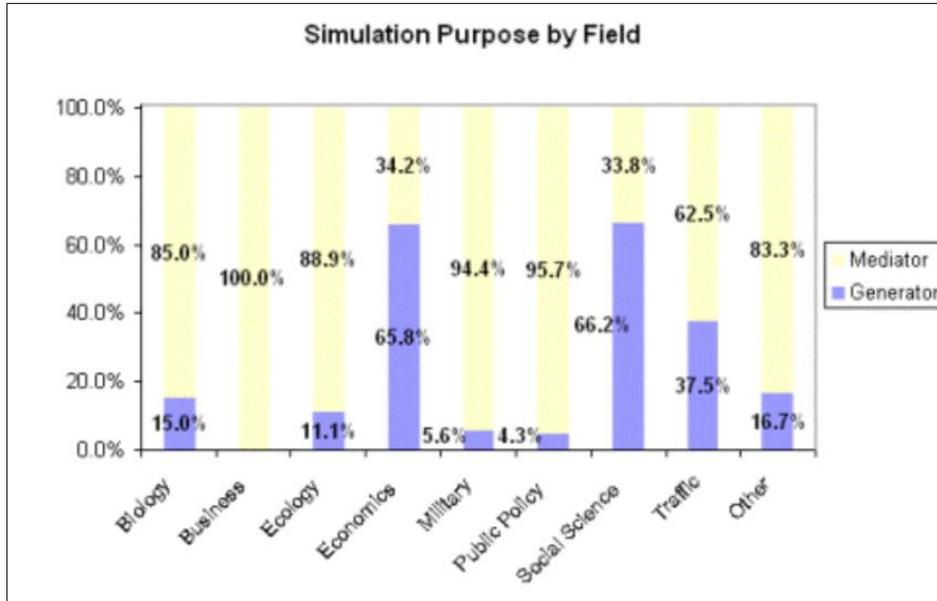


Figura 3.16. Propósito de la simulación por año.¹⁵⁴

Sólo 44 (15.8%) de los artículos encuestados dio una referencia para el lector de acceder o replicar el modelo. Esto indica que la mayoría de los autores, medios de publicación y los revisores no consideró necesario permitir el acceso independiente a los modelos. Esta tendencia parece constantemente durante los últimos 10 años, como se muestra en la Figura 3.17.

¹⁵⁴ Brian Heath, Raymond Hill and Frank Ciarallo, "A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008)", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>, (Consultado Octubre, 2011)

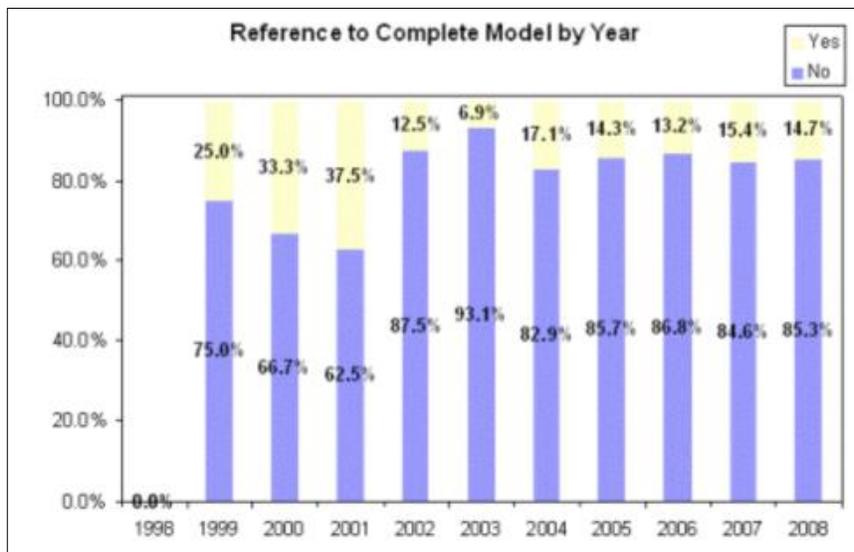


Figura 3.17. Referencia para tener acceso al modelo.¹⁵⁵

El propósito definido de la simulación en general, tiene poco impacto si no se hace referencia al modelo completo. La figura 3.18 indica que sólo el 21.6% de los modelos de generador y sólo el 11.9% de los modelos de mediador dio referencias para el modelo completo. Puede parecer que esto es una diferencia significativa, pero la correlación entre el propósito y dominio mejor explica la diferencia se representa en la figura 3.18.

¹⁵⁵ Brian Heath, Raymond Hill and Frank Ciarallo, "A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008)", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>, (Consultado Octubre, 2011).

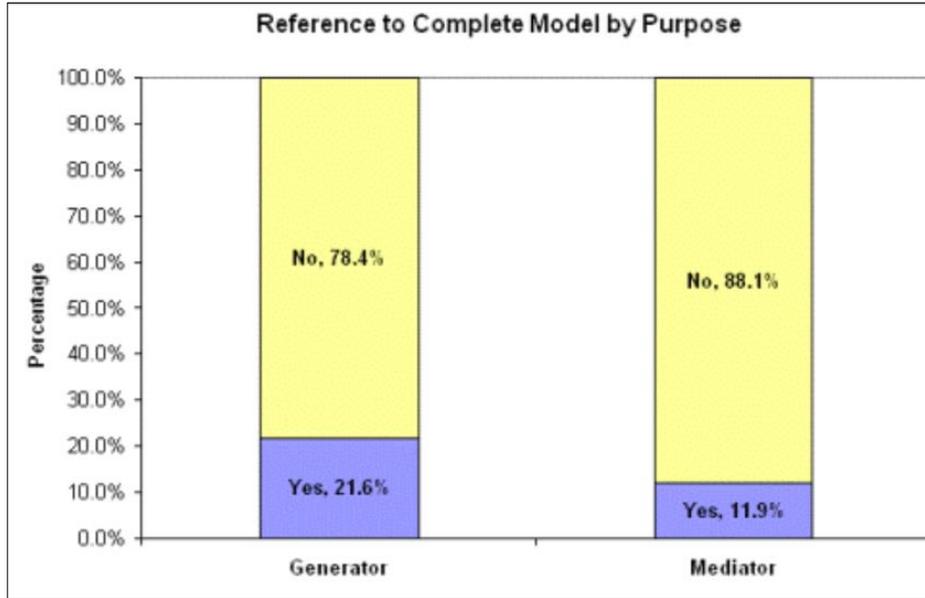


Figura 3.18. Acceso al modelo completo de acuerdo con su referencia.¹⁵⁶

A continuación se centran en si el modelo fue validado conceptual, validado operativamente, conceptual y operativamente validado o no validado en absoluto. La figura 3.19 indica que el 29% de los modelos no fueron validados, el 17% sólo había validado su modelo conceptualmente, el 19% sólo operativamente, y validado de manera completa el 35%. Una posición razonable es que un modelo sólo está validado, o aprobado, cuando es tanto conceptual como operativamente validado. En este caso, al menos 65% de los modelos en el estudio fueron validados de manera incompleta. Esto es alarmante, ya que la mayoría de las revistas de las publicaciones científicas insisten en algún nivel de validación del modelo.

¹⁵⁶ Brian Heath, Raymond Hill and Frank Ciarallo, "A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008)", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>, (Consultado Octubre, 2011)

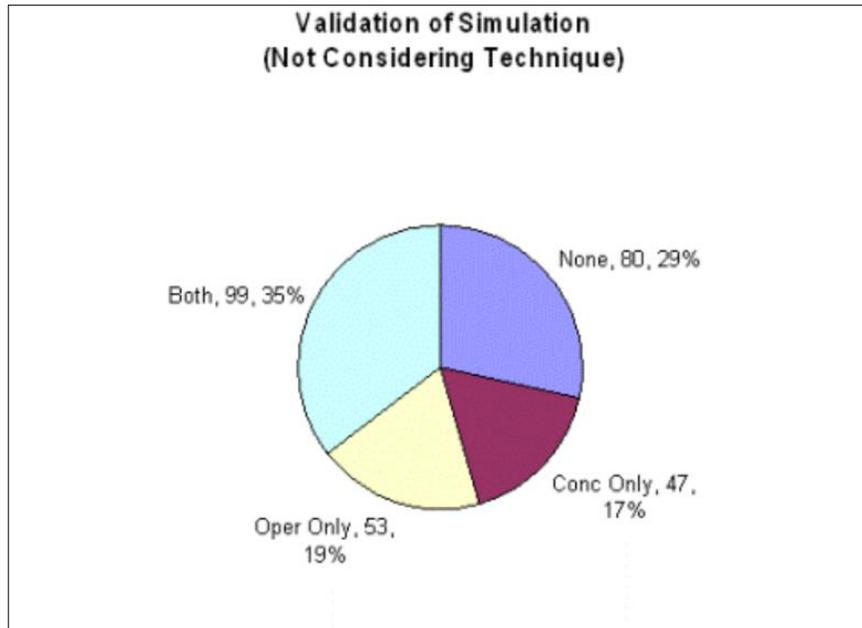


Figura 3.19 Porcentaje de desarrolladores que validaron su modelo.¹⁵⁷

El énfasis en la validación del modelo parece estar cambiando. Como se ve en la figura 3.20, el porcentaje de los modelos no completamente validados está disminuyendo. La diferencia entre el comienzo y el final del período de 10 años es distinta y muestra que campo es la mejora en términos de validar completamente sus modelos. Sin embargo, entre 2005 y 2008 el número de artículos que tanto conceptual como operativamente validaron su modelo permanece relativamente constante y promedia un poco menos del 43%.

¹⁵⁷ Brian Heath, Raymond Hill and Frank Ciarallo, "A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008)", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>, (Consultado Octubre, 2011)

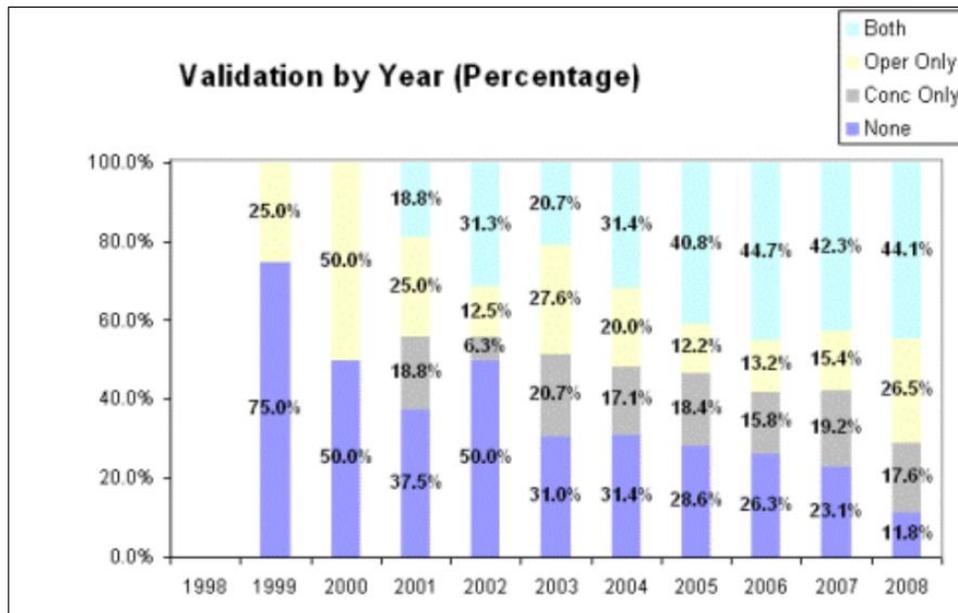


Figura 3.20 Validación de los modelos por año.¹⁵⁸

El desglose de la validación del modelo por campo revela que en algunos campos están más preocupados por la validación que los demás. Como se muestra en la figura 3.21, los campos con mayor porcentaje de modelos completamente validados son: ecología (77.8%) y la biología (70.0%) y los campos con el menor porcentaje de modelos validados son los militares (16.7%), la economía (20.3%) y las ciencias sociales (27.9%). Una conjetura razonable sobre las diferencias es su tradición científica. Sin embargo, mientras que la economía y las ciencias sociales son campos relativamente nuevos y no tan bien conectado con la tradición científica clásica, los militares tienen una larga historia de uso de la simulación por ordenador y sus problemas con la validación de la simulación están bien documentados (Davis y Blumenthal 1991). Por lo tanto, este aspecto de la validación de los militares de modelos basados en agentes es algo sorprendente.

¹⁵⁸ Brian Heath, Raymond Hill and Frank Ciarallo, "A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008)", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>, (Consultado Octubre, 2011).

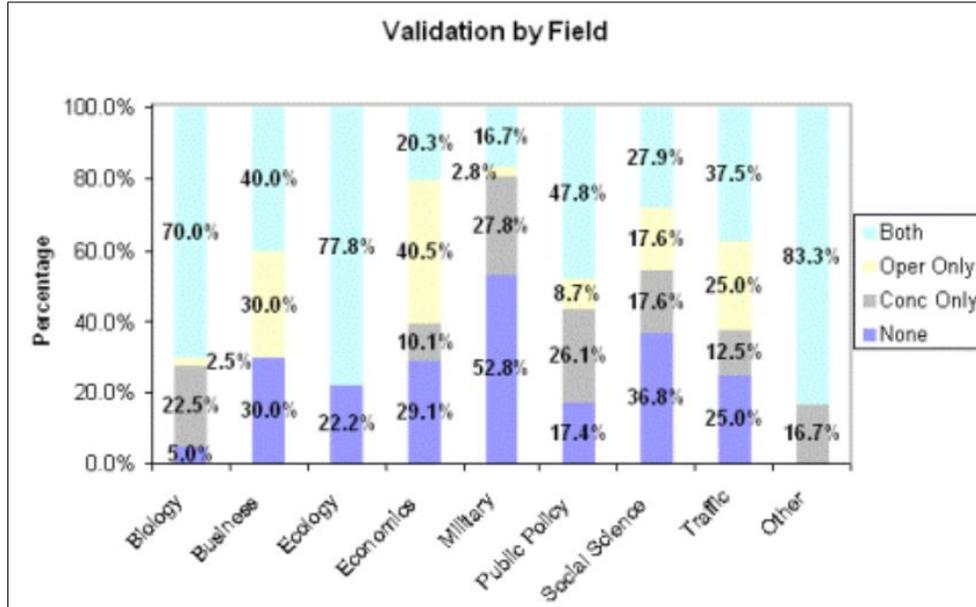


Figura 3.21 Porcentaje de validación del modelo por área.¹⁵⁹

No parece haber una relación entre el objeto de la simulación y los esfuerzos de validación. En la figura 3.22, 11.7% de los modelos de generador se validaron completamente mientras que 51.2% de los modelos mediador fueron validadas completamente. Dado que los modelos de generador se basan en sistemas que son poco comprendidos, estos modelos son más difíciles de validar porque hay menos información disponible sobre el sistema. Por el contrario, más las actividades de validación deberían ocurrir para los modelos mediador porque se conozca más información sobre el sistema que se está modelando.

¹⁵⁹ Brian Heath, Raymond Hill and Frank Ciarallo, "A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008)", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>, (Consultado Octubre, 2011).

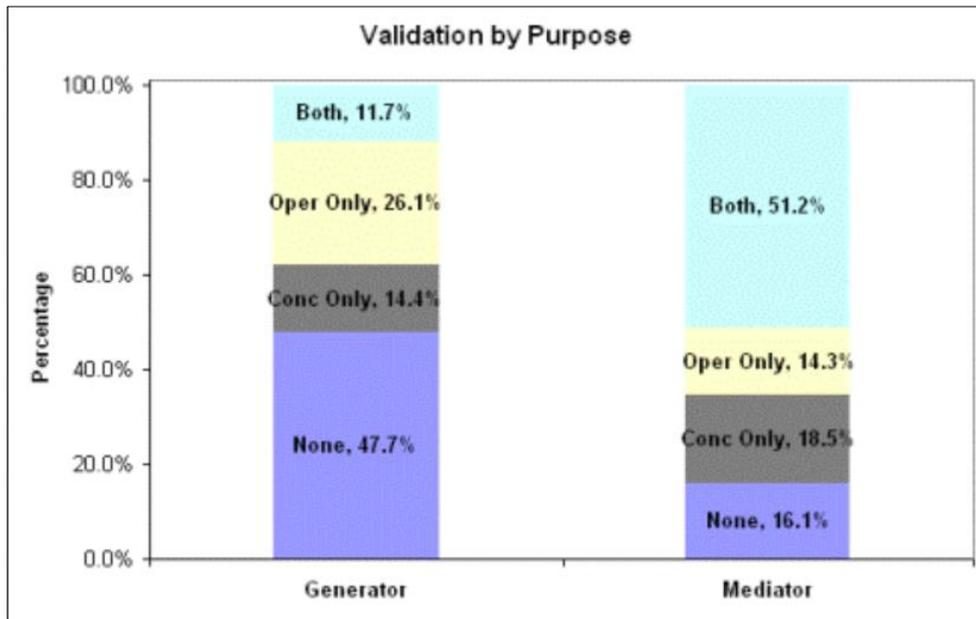


Figura 3.22 Porcentaje de validación de acuerdo con su propósito.¹⁶⁰

De los modelos validados de alguna manera, 0.5% utiliza sólo técnicas estadísticas de validación, 95.0% utiliza sólo técnicas no estadísticas de validación y 4.5% utiliza una combinación de técnicas de validación estadística y no estadística. Así pues, parece que en ABMS las técnicas de validación primarias empleadas son la opinión de expertos y comparaciones cualitativas de comportamientos. Las técnicas de validación estadística que menudo se enseñan en los cursos básicos de simulación no son tan populares. Este resultado puede ser debido en parte a las dificultades en la captación de las estadísticas de la simulación y el sistema de ABMS ser difícil de analizar, debido a la salida no lineal. Al examinar las técnicas de validación por año, tal como se muestra en la figura 3.23, una tendencia que no muestra una disminución del número de modelos utilizando cualquier técnica de validación. En su mayor parte el uso de técnicas de validación no estadísticas se están empleando.

¹⁶⁰ Brian Heath, Raymond Hill and Frank Ciarallo, "A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008)", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>, (Consultado Octubre, 2011).

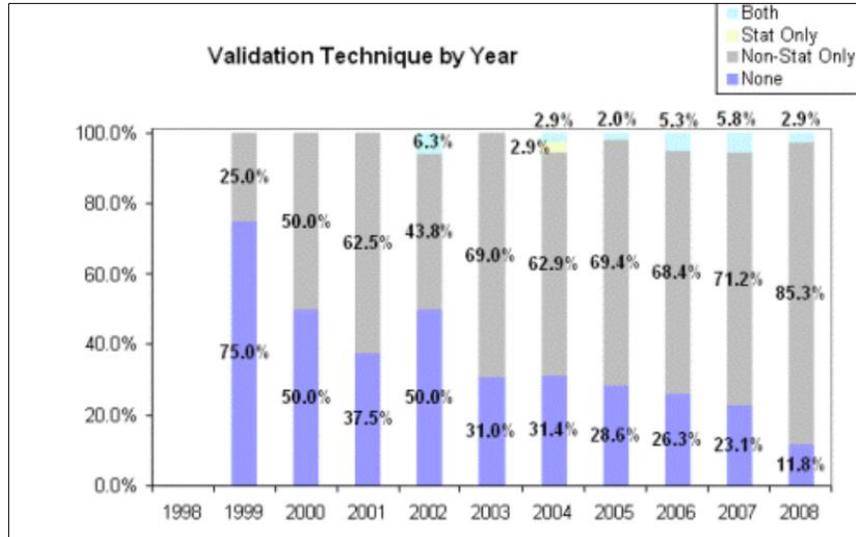


Figura 3.23 Porcentaje de técnicas de validación por año.¹⁶¹

La figura 3.24 nos muestra las técnicas de validación utilizadas por campo y otra vez los más utilizados son las técnicas no estadísticas de validación, pero sin relación fuerte entre la técnica de validación y el campo de estudio.

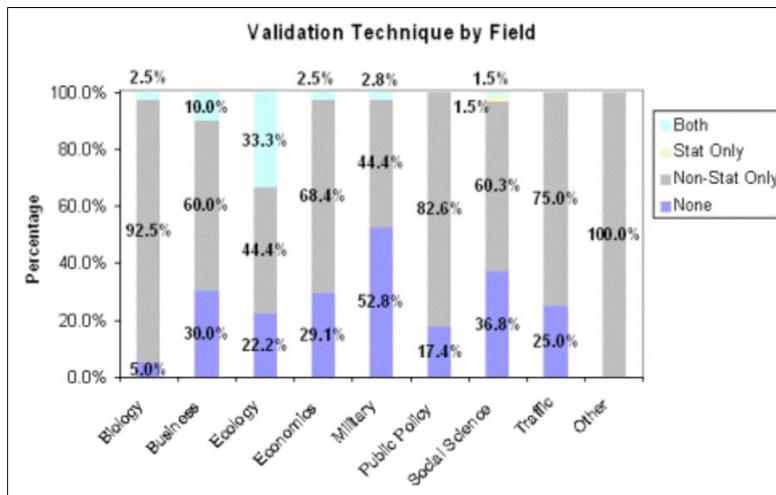


Figura 3.24 Técnicas de validación utilizada por campo de aplicación.¹⁶²

¹⁶¹ Brian Heath, Raymond Hill and Frank Ciarallo, "A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008)", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>, (Consultado Octubre, 2011)

¹⁶² Brian Heath, Raymond Hill and Frank Ciarallo, "A Survey of Agent-Based Modeling Practices (January 1998 to July 2008)", *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html>, (Consultado Octubre, 2011).

Basado en la recopilación de la información de los 279 artículos publicados, este artículo retrata el estado del arte de los ABMS y se identifican las direcciones clave de investigación. Se ha conjeturado que ABMS es un método inmaduro y que las prácticas estándar de la promoción eficaz de modelado ABMS no son ni claramente establecidas ni aceptadas. Este estudio parece apoyar esa conjetura. La falta de madurez y de las prácticas habituales en el campo de ABMS se refleja por la falta de modelos que fueron validados completamente, la falta de referencias al modelo completo y lo que es aceptado como resultados publicables. Un remedio es que las técnicas, filosofías y métodos necesitan ser adoptados de otros paradigmas de la simulación, o desarrollados específicamente para ABMS, y estas técnicas, filosofías y métodos necesitan que se les enseñe a los que utilizan ABMS de manera que puedan construir modelos más eficaces. Situaciones que se tuvieron en cuenta cuando se desarrolló nuestro modelo.

Seis líneas de investigación específicas, necesidades y oportunidades para los ABM se identificaron en el estudio. La primera es que las herramientas de desarrollo y documentación para la ABMS deben ser independientes de software y que los artículos publicados deben detallar el paquete de software o lenguaje de programación utilizado para crear y ejecutar la simulación. La segunda dirección identificada la investigación y la necesidad es que desde un ABMS es una salida de paradigmas de simulación de otros, que necesita ser estudiado como una disciplina independiente y como un subconjunto de la disciplina de la simulación. De estas técnicas estándar, prácticas, filosofías y metodologías son necesarias para ampliar ABMS como una herramienta de análisis funcional. En tercer lugar, puesto que ABMS se utilizan para diferentes propósitos, los simuladores deben tener expectativas diferentes para ABMS. Cuarta la necesidad de investigación es que los artículos necesitan información suficiente sobre el modelo para que otros investigadores de forma independiente puede desarrollar y evaluar la eficacia de estos modelos. El quinto, y más importante, conclusión del estudio es que los críticos y revistas de publicaciones deben exigir que el modelo presentado estar completamente validado y se documenta en el artículo. Por último, ambas técnicas de validación estadística y no estadística específicamente para ABMS es necesario desarrollar y transmitir con eficacia a los que construyen estos modelos.

Estas seis líneas de investigación, las necesidades y las oportunidades de representar algunas cosas iniciales que se necesitan para madurar y ayudar a establecer los procedimientos estándar de ABMS. Si ABMS es alcanzar su pleno potencial como un paradigma de modelado y

simulación, estas oportunidades fundamentales deben ser abordadas. Esto es especialmente cierto a medida que la simulación asume nuevos roles y comienza a ampliar nuestra capacidad limitada para comprender y analizar mentalmente modernos sistemas complejos. Mediante el establecimiento de metas claras de investigación y las normas, el campo de la ABM se sigue madurando y progresando, y cada campo explorando sistemas complejos estarán mejor preparados para comprender, evaluar y predecir estos sistemas a través de la explotación de los más apropiados y eficaces modelos basados en agentes.

3.8. Guías para escoger una herramienta para la elaboración de modelos basados en agentes.

Idealmente un modelador debería de tener experiencia práctica en algunos sistemas de simulación antes de escoger cual sistema usar para realizar un modelo. Por esta razón muchos autores han ganado experiencia práctica o han probado algunos sistemas, identificando el criterio clave que debe de ser considerado antes de tomar una decisión. Los criterios generales incluyen: fácil desarrollo del modelo usando el sistema, tamaño de la comunidad que está usando el sistema, disponibilidad de ayuda y soporte, está el sistema actualizado y su mantenimiento, disponibilidad de demostración o modelos de ejemplo, documentación de apoyo, etc. Criterios relativos a la funcionalidad de un sistema de simulación incluye: número de agentes que pueden ser modelados, grado de interacción entre agentes, habilidad para representar múltiples niveles de agentes, variedad de modelos de ambientes disponibles, posible relación topológica entre agentes, manejo de relaciones espaciales entre agentes y agentes con su ambiente, mecanismos para programar y secuenciar sus eventos, etc. Esos criterios tendrán diferentes pesos dependiendo de las preferencias del modelador y de sus habilidades.

Otra importante distinción separada de la simulación es el licenciamiento: código abierto, shareware/ freeware o con propiedad. Cada modelador deberá de establecer un balance entre esos criterios. Por ejemplo los acostumbrados a programar puede preferir librerías, sin embargo los modeladores que desean desarrollar un básico o prototipo, un modelo rápidamente y fácil, posiblemente con poco o ninguna habilidad de programación, podrían preferir usar un software especializado en simulación.

Swarm es un sistema de modelación de código abierto diseñado específicamente para el desarrollo de simulación multi agente de complejos sistemas, aunque los modelos basados en

agentes pueden ser fácilmente desarrollados usando Swarm también. Inspirado por la vida artificial, Swarm fue diseñado para estudiar sistemas biológicos, diseñado para inferir sobre mecanismos de fenómenos biológicos. Ha sido usado para diseñar modelos para antropología, ciencias de la computación, ecología, economía, geografía y propósitos de ciencias políticas. Ejemplos aplicados en teoría espacial incluyen: la simulación de peatones en los centros urbanos y el examen de crecimiento demográfico en ciertas regiones. El problema es que requiere un conocimiento muy sólido en programación.

Mason fue desarrollado por el Laboratorio de Computación Evolutiva y el Centro de Complejidad Social en la George Mason University. No proporciona funcionalidad para graficas de manera dinámica en los resultados de una simulación o permitir a importar o exportar información de un GIS. Desafortunadamente hay poca documentación técnica y un relativo pequeño grupo de usuarios.

Repast originalmente desarrollado en la Universidad de Chicago, la librería de Recursive Porous Agent Simulation es constantemente mantenido por Argonne National Laboratory y administrado por Repast Organization for Architecture and Development (ROAD). Se alimenta de los lenguajes de programación: Python (RepastPy), Java (RepastJ) y Microsoft.Net (Repast.Net). Repast tiene un grupo de usuarios muy grande y soporte a través de correos electrónicos, también como una amplia documentación y modelos de demostración para el sistema en la red. Se tienen muchas aplicaciones como el estudio de la segregación, la localización de empresas y la evacuación de peatones de una estación.

StarLogo es un shareware sistema de modelación desarrollado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts, es diferente a los otros programas señalados son programas los cuales se basan en procedimientos, son opuestos a un lenguaje orientado a objetos. StarLogo carece de la misma flexibilidad ofrecido por los sistemas de código abierto, los modeladores son restringidos por la funcionalidad proporcionada por el sistema. Quitando sus limitaciones es muy fácil de usar para gente con poca experiencia en programación. Nos da una demostración de graficas de la simulación en sus salidas además de poseer una amplia documentación. No tiene una interacción básica con algún SIG.

NetLogo es una variante de StarLogo originalmente desarrollado en el Centro de Aprendizaje Conectado y Modelos Basados en Computadoras en la Universidad del noroeste,

NetLogo es para desarrollar modelos en internet, se tiene documentación de este aunque su código no está disponible. No hay integración con un SIG.

OBEUS (Object-Based Environment for Urban Simulation) fue desarrollado en la Universidad de Tel Aviv en Israel. Basado en la teoría del Sistema Geográfico Automata (GAS) es diseñado para la simulación de fenómenos urbanos, específicamente en el contexto geoespacial. GAS considera a un sistema urbano como objetos consistentes que son fijos y no fijos. OBEUS fue implementado en el ambiente de Microsoft.Net, pero tiene otros componentes en otros lenguajes (Borland C# compiler) los cuales deben de ser instalados para operar el sistema. OBEUS proporciona una guía para el desarrollo de la estructura de un modelo, aunque el comportamiento y las reglas de interacción de los agentes debe de ser programado usando uno de la Microsoft.Net lenguajes (por ejemplo: C#, C++, o Visual Basic, etc.). Consecuentemente habilidades de programación moderadas deben de tenerse para controlarlo. OBEUS ha sido usado para desarrollar un número de modelos explícitos espaciales, incluyendo: la simulación de la distribución étnica dentro del área de Yaffo en Tel Aviv entre 1955 y 1995, tiene una integración directa con los SIG.

AgentSheets es un sistema de simulación propietario que permite simular con limitada experiencia en programación, los modelos son desarrollados con una guía. Un número de modelos de demostración son disponibles en la web. Es muy fácil desarrollar modelos sin necesidad de aprender un lenguaje. El sistema carece de graficas de salida para ver su salida y los agentes son limitados a movimiento en dos dimensiones. No puede integrar su funcionalidad a un SIG.

AnyLogic incorpora un rango de funcionalidad para el desarrollo de modelos basados en agentes. Por ejemplo modelos que pueden dinámicamente leer y escribir información para hojas de cálculo o bases de datos durante la corrida de una simulación, también muestra graficas de salida. Los modelos creados con AnyLogic pueden solo ser creados en sistemas operativos de Microsoft. El código de este modelo no está disponible y no puede integrar su funcionalidad a un SIG.¹⁶³

Con el fin de tener mayor información sobre los diferentes programas de computación utilizados para la elaboración de modelos basados en agentes por favor refiérase a la tabla de

¹⁶³ Computational Science and Engineering Department, *Survey of Agent Based Modelling and Simulation Tools* Rob Allan, STFC Daresbury Laboratory, Daresbury, (England: Warrington WA4 4AD, 2009): 1-21.

comparación de software que se hace en la página de Wikipedia¹⁶⁴ en esta se pueden ver las características de más de 50 aplicaciones junto con un link que los lleva a su sitio web principal.

Al final de este Capítulo podemos concluir lo siguiente:

- a. Los desarrollos en el campo de la computación han fortalecido a la geografía en el uso de nuevas tecnologías para el estudio de los fenómenos que suceden en la superficie de la tierra. La fusión de las ciencias de la tierra y la informática han formado el campo de una nueva ciencia llamada geomática o también conocida como ciencia de la información geográfica y tecnología.
- b. La geosimulación, es la simulación de fenómenos espaciales, la cual sirve para representar y mostrar procesos que suceden en esta, sus elementos tienen escalas reales e interactúan entre ellos mostrándonos resultados no previstos.
- c. La geosimulación ha sido influenciada y soportada por los siguientes campos: teoría de sistemas complejos, modelos dinámicos, sistemas de información geográfica y programación orientada a objetos.
- d. Dentro de las diferentes técnicas bajo las cuales se desarrollan los modelos de geosimulación, la simulación basada en agentes, es la técnica que más se adapta a las necesidades de mostrar un proceso complejo, como son los accidentes de tránsito.
- e. La simulación basada en agentes y técnica de la geosimulación, de acuerdo con estadísticas de uso, es la técnica mayormente utilizada para la representación de fenómenos y procesos dinámicos.
- f. Nuestro modelo se debe de simular utilizando, la técnica basada en agentes y debe de simular los principales elementos que intervienen en un accidente de tránsito: la vía, el conductor y el vehículo, los cuales tendrán interacciones durante el suceso de un accidente.

¹⁶⁴ Wikipedia, "Comparison of agent based modeling software", http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_agent-based_modeling_software, (Consultado Mayo, 2009).

Esta hoja se dejó en blanco de manera intencional

Capítulo 4

Métodos utilizados para la modelación y predicción de los accidentes de tránsito

Contenido

4.1. Métodos utilizados en la proyección de accidentes de tránsito.....	210
4.2. Métodos basados en sistemas de información geográfica.....	211
4.3. Métodos basados en redes neuronales.....	221

En este capítulo se describen las técnicas y métodos de la geomática, que más se utilizan para el análisis y predicción de los accidentes de tránsito, se hace una descripción y análisis de los diferentes metodologías, que se utilizan actualmente, en la predicción de los accidentes de tránsito; estos son los basados en los sistemas de información geográfica y la geoestadística y los segundos en redes neuronales, que caen dentro de los modelos causales y epidemiológicos, respectivamente, se muestra como se aplican a través de algunos casos prácticos.

Con respecto al método basado en redes neuronales, aunque propiamente no entra dentro del campo de la geomática se incluyó, debido a que es de los más utilizados para resolver este tipo de problemas.

4.1. Métodos utilizados en la proyección de accidentes de tránsito.

Se hizo una revisión del artículo publicado por Zhid H. Qureshi¹⁶⁵, en torno a los modelos que se utilizan más comúnmente para la interpretación y descripción de fenómenos, los puntos principales que sobre este tipo de modelos los podemos describir de la manera siguiente:

- a. Los modelos que se utilizan con más regularidad para la representación, entendimiento y proyección de los accidentes de tránsito, son los basados en el principio de causa y efecto, en donde la aparición de una o algunas variables dan origen al surgimiento del suceso, como un efecto dómينو, estos modelos los podemos agrupar en dos grandes grupos, los modelos de accidentes secuenciales que utilizan pocas variables y los epidemiológicos, que involucran un número mayor de variables, pero su esencia cae en el mismo principio.
- b. Los modelos de accidentes secuenciales tratan de explicar la causalidad de los accidentes, como el resultado de una cadena de eventos discretos que ocurren en un orden temporal en particular. Uno de los primeros modelos secuenciales está basado en la teoría del dominó, propuesto por Heinrich. De acuerdo con esta teoría, hay cinco factores en la secuencia del accidente: 1) sociales - medioambiente (las condiciones que nos hacen aceptar los riesgos), 2) falta de la persona, 3) o actos inseguros condiciones (mala planificación, equipos peligrosos, peligros, medioambiente), y 4) accidentes; 5) lesión. Estos cinco factores están dispuestos en forma de dominó de tal manera que la caída la primera ficha resulta en la caída de la última.
- c. La realidad es que los accidentes siempre tienen más de un factor que contribuye a formarlos. Modelos secuenciales funcionan bien para las pérdidas causadas por los fallos de los componentes físicos o errores humanos en sistemas relativamente simples. Mientras que el modelo de domino sólo tiene en cuenta una sola cadena de eventos. Los modelos secuenciales suponen que la relación causa-efecto entre los eventos consecutivos es lineal y determinista.
- d. Los modelos epidemiológicos de accidentes, ven la necesidad de formas más potentes en la comprensión de los accidentes, estos modelos comenzaron a ganar popularidad en la década de los 80's. Los modelos epidemiológicos sobre los acontecimientos que

¹⁶⁵ Zahid H. Qureshi, "A Review of Accident Modelling Approaches for Complex Socio-Technical Systems", *Defence and Systems Institute, University of South Australia, Mawson Lakes Campus*, (2009).

conducen a los accidentes son como algo análogo a la difusión de una enfermedad, es decir, como el resultado de una combinación de factores, algunos manifiestos y otros latentes, que pasan a existir juntos en el espacio y el tiempo. En este enfoque, el inmediato o causa próxima del accidente es el fracaso de las personas en la "línea de combate" que están directamente involucrados en la regulación del proceso o en la interacción con la tecnología. Este modelo define un accidente como situaciones en las que las condiciones latentes (que surgen de las prácticas de decisión de gestión, o las influencias culturales) se combinan de manera adversa con eventos locales desencadenados (clima, ubicación, etc.) y con fallas activas (errores y / o de procedimientos de violación) cometidos por individuos o equipos en el filo de una organización, todo esto produce un accidente. La dinámica de la causalidad del accidente está representada en el modelo de queso suizo de defensas, lo que demuestra un accidente emergente debido a los agujeros (fallos) en las barreras y salvaguardias.

- e. Los modelos epidemiológicos todavía siguen los principios de los modelos secuenciales, ya que muestran la dirección de la causalidad de una forma lineal. Además, los vínculos causales entre latentes distantes condiciones (factores organizacionales) y el accidente son complejos y débilmente acoplados. Todo sistema socio-técnico es más dinámico que lo que el modelo sugiere.

Como referencia a 127 artículos revisados sobre los métodos para la prevención de accidentes de tránsito 89 (70%) se relacionan con los sistemas de información geográfica y redes neuronales.¹⁶⁶

4.2. Métodos basados en sistemas de información geográfica.

Con la creciente disponibilidad de datos de accidentes y la popularidad del software de sistemas de información geográfica (SIG), el análisis de los accidentes de tránsito basado en un SIG es muy útil para los diseñadores de carreteras, los responsables políticos, tomadores de decisiones, aplicación de la ley y el personal de respuesta a emergencias. A nivel macroscópico, las aplicaciones, incluyendo la identificación de la alta ubicación de los accidentes, la frecuencia de accidentes relacionados con el cruce, el análisis de tasa de accidentes y las consultas

¹⁶⁶ Conteo personal de artículos, Junio 2009.

espaciales, permite al usuario analizar y manipular datos de manera rápida e identificar posibles áreas problemáticas. Algunas de estas aplicaciones, tales como la identificación de lugares de alto índice de accidentes se pueden determinar y estos datos tabulados junto con la representación de esta información en un mapa proporcionan una representación visual y puede ayudar a realizar análisis a gran escala, esto a un nivel de determinación de los puntos principales de los sucesos.¹⁶⁷

El análisis de los datos de accidentes de tránsito se puede realizar para determinar si un patrón o patrones existen entre las diferentes variables involucradas. Si este patrón no existe, esto puede ser una bandera roja para que la ingeniería, la ejecución, la educación o las mejoras respondan con modificaciones en estos lugares, si el patrón existe, es decir que las variables tienen comportamientos similares y no se producirá un accidente. Los escenarios y alternativas que antes no podían ser analizadas ahora pueden ser considerados. Los organismos de seguridad de tráfico pueden realizar consultas detalladas en pequeños subgrupos de datos para determinar efectivamente las causas potenciales de accidentes y recomendar medidas potenciales en sus áreas especializadas.

Como se mencionó anteriormente, el análisis de la información de los accidentes de tránsito utilizando como base un SIG es sólo una herramienta que puede ayudar a la toma de decisiones más informadas, permite un análisis más profundo, mientras que al mismo tiempo, acelera el proceso de toma de decisiones.

Utilizado en conjunción con las contramedidas de seguridad vial ya existentes el análisis de la información basada en un SIG puede tener un impacto significativo en la comunidad que busca reducir los accidentes de tráfico.¹⁶⁸

Los SIG's se han utilizado para mostrar lugares de choques y producir mapas. Los usos potenciales de los SIG's incluyen análisis de datos de los accidentes de tránsito cuyos resultados ayudan a guiar la realización de actividades fundamentales que llevan a la disminución de los accidentes de tránsito: la ingeniería de las vías su ejecución, la educación en el tránsito de estas y la respuesta a emergencias en esta. A nivel de aplicaciones macroscópicas los SIG proporcionan la capacidad de analizar una gran cantidad de datos rápidamente.

¹⁶⁷ Jerry Roche, "Geographic information systems-based crash data analysis and the benefits to traffic safety", (trabajo presentado por Center for Transportation Research and Education en Iowa State University en la Transportation Scholars Conference Ames, 2010).

¹⁶⁸ Road Safety Research Center, "A GIS Support System For Road Safety Analysis And Management", University Pertanian Malaysia Press, (15 May 1998):81-93.

El análisis a un nivel macroscópico se puede utilizar en grandes regiones para identificar las áreas de interés sin entrar en detalles. El mayor beneficio del uso de un SIG en el análisis de datos de los accidentes de tránsito son las aplicaciones microscópicas que se puede hacer para evaluar la estrella o el punto donde se presentan más accidentes en una región seleccionada. Varias consultas se pueden realizar en grupos aislados de datos.¹⁶⁹

Mediante el uso de un SIG, el tiempo y el esfuerzo necesarios para analizar los datos de accidentes se pueden reducir. Al mismo tiempo, un creciente número de escenarios y alternativas posibles se pueden evaluar haciendo una revisión de la literatura, el uso del SIG en el análisis de la información de accidentes de tránsito sirve como una herramienta para ayudar a los ingenieros, la administración, responsables políticos, policiales y personal de emergencia a tomar decisiones informadas sobre cuestiones de la seguridad del tráfico.

No hay resultados de las investigaciones que concluyen que vidas han sido salvadas por los SIG. Más bien, el SIG tiene un impacto indirecto a la seguridad del tráfico por ayudar a los tomadores de decisiones. Miller afirma mejoras, exclamando: "... el objetivo final no es la realización de análisis, pero en su lugar, para tomar acciones que reduzcan la frecuencia de accidente o gravedad."¹⁷⁰

El proceso que se sigue para la formación de mapas basados en la información de accidentes de tráfico es el siguiente:

1. Recolección de información sobre los accidentes de tránsito, a nivel de calle y tipo de accidentes de tránsito, si es posible tener información histórica de varios años, ya que nos ayudará a identificar algunos patrones de comportamiento.
2. Formación de la base de datos, con información de los accidentes de tránsito, especificando columnas con información espacial, para su posterior georeferenciación.
3. Georeferenciación de la información, para esto se pueden utilizar algunos software, ya con funciones específicas para realizar este trabajo, como por ejemplo: MapInfo o ArcGis, lo que hace el software es tomar las columnas con la información espacial y relacionarlas con la cartografía, con esto tendremos la información de las bases de datos sobre mapas digitales.

¹⁶⁹ Noriel Christopher C. Tiglaco, "Development of Traffic Accident Information System using Geographic Information System (GIS)", National Center for Transportation Studies, University of the Philippines Diliman, (2007): 1-10.

¹⁷⁰ Yin Zhu, "Study on Technologies and Methods of the Traffic, Safety Intelligent Warning Decision", Chinese People's Public Security University, (2006):1-4.

4. Una vez que tengamos los mapas con la información de los accidentes de tránsito el siguiente paso es hacer ejercicios de análisis espacial con esta. Uno de los procedimientos más comunes es, si se cuenta con información de varios años, es el realizar proyecciones en función de información histórica, de tal manera que podremos determinar tanto a nivel macro como a micro en donde será más factible que se presenten más accidentes.
5. Otra opción de proyección es si se dispone de información de otras variables principalmente como: el tiempo, el clima, estado de la vía durante diferentes periodos de tiempo y los datos de los accidentes en este mismo, se pueden realizar proyecciones de series de tiempo con las cuales podamos identificar el impacto de cada una de estas variables sobre los accidentes de tránsito y cuáles son las que tienen un mayor efecto.
6. Aunado a lo anterior, el tener la información dentro de un SIG nos permite realizar una serie indefinida de análisis de tipo espacial, en los cuales mediante la ubicación de los diferentes elementos que forman el sistema se pueden encontrar relaciones que pudieran proporcionarnos las razones por las cuales suceden los accidentes, esto generalmente no de manera directa, pero es posible obtenerlas.¹⁷¹

En la siguiente sección se muestran algunos casos, en los cuales el análisis de la información de los accidentes de tránsito basada en un SIG se utilizó para tomar mejores decisiones y con esto reducir el número de accidentes de tránsito.

Primer Caso.

Un caso en que los SIG se utilizaron con éxito para ayudar a la toma de decisiones se produjo en el Condado de Miami, Kansas.¹⁷²

Doce muertos en 11 meses se produjeron a lo largo de un tramo de 20 kilómetros de dos carriles en EE.UU., en la autopista 169. El Sheriff del condado estaba consciente de la alta tasa de mortalidad en esta sección del camino y se acercó a la Oficina de Gestión de Información de Tierras (LIMO), para crear un mapa con un SIG que muestra la ubicación de los accidentes y los atributos asociados. Esta información graficada y tabulada permitió que el gobernador y otros funcionarios estatales pudieran analizar rápidamente la situación y determinaran que un número

¹⁷¹ Diseño propio.

¹⁷² Jerry Roche, "Geographic information systems-based crash data analysis and the benefits to traffic safety", (trabajo presentado por Center for Transportation Research and Education en Iowa State University en la Transportation Scholars Conference Ames, 2010).

significativo de los accidentes se debieron a que los conductores no podían mantener el control de sus vehículos después de dejar la autopista. Después de ver el mapa, el gobernador decidió ampliar este tramo de la autopista. El Departamento del Sheriff del Condado de Miami se está concentrando en la prevención de futuras muertes por accidente al analizar la información de los accidentes de tránsito basados en un SIG.

Bob Thompson el gobernador del Buro de Seguridad Vial de Iowa afirma que: "el SIG tiene el potencial para revolucionar las aplicaciones y decisiones estratégicas tanto para la policía como para las oficinas de alguaciles de todo el país. Este potencial está empezando a ser explorado. En Estados Unidos los servicios de emergencia están utilizando estas funciones de mapeo dinámico de los SIG para mejorar la eficiencia de sus operaciones con los beneficios potenciales de salvar vidas. "

Como se mencionó anteriormente, uno de los mayores beneficios de los SIG es la capacidad de analizar una gran cantidad de datos rápidamente. El análisis macroscópico se puede utilizar en grandes regiones para identificar las áreas de interés sin entrar en detalles.

Una de las aplicaciones más común es la determinación de lugares de alta cantidad de sucesos de accidentes (LAI).

Uno de los métodos de identificación de LAI incluye los accidentes dentro de una distancia especificada de un camino principal. Este método se lleva a cabo marcando dentro de una ruta o camino con una estrella o un símbolo los lugares en donde se presentan con mayor frecuencia los accidentes de tránsito.

Otro método consiste en determinar la frecuencia de accidente dentro de una distancia especificada. Un ejemplo podría ser los accidentes dentro de una cierta proximidad a las intersecciones. La presencia de intersecciones añade complejidad a la tarea de conducción, aumentando el riesgo de un accidente. Estos accidentes se conocen como accidentes relacionados con el cruce.

Un análisis que nos ayuda a tomar mejores decisiones es el realizar las consultas espaciales por tipo específico de accidente y estudiar solo algunos sectores de todo el territorio con el fin de proponer soluciones concretas a lo que pudiera estar ocasionando los accidentes.

Segundo caso.

En este segundo caso describimos el análisis de la información de los accidentes en Kenia con el fin de reducirlos.¹⁷³

En los países donde las economías son débiles, esto es fundamental para aquellos interesados en las políticas de desarrollo para adoptar enfoques que se aseguren que cada centavo disponible se utilice para desarrollar al país. Esta situación llama a los planificadores económicos a hacer equipo con los tecnócratas en todos los ámbitos para facilitar un favorable medioambiente para el desarrollo económico del país.

Los accidentes de tráfico han sido reconocidos como uno de los elementos adversos que contribuyen a la asfixia del crecimiento económico en los países en desarrollo, debido a los altos costos relacionados con ellos, por lo tanto, un motivo de preocupación social y económica. Un caso de estudio en Kenia se presenta para indicar cómo el crecimiento de la demanda de viajes, lleva consigo al aumento de la tasa de accidentes de tráfico.

Este caso presenta la manera de aliviar el problema de los accidentes de tráfico a través de la inclusión de las nuevas tecnologías en los países en desarrollo, de modo que las decisiones puedan ser adoptadas para precisamente poner remedio a las ocurrencias de accidentes de tráfico. Sistema de Información Geográfica (SIG) es una tecnología que cuando se incorpora en el análisis de las carreteras y accidentes de tráfico, puede aliviar esta amenaza. Este enfoque se argumenta como posible, ya que facilitará una forma rápida de recuperación de datos, además de ser un medio para precisas correcciones de diseños de ingeniería para mejorar los tramos de carretera que son propensos a los accidentes de tráfico.

La demanda de viajes surge como resultado del desarrollo de la tierra en una región. El tipo de desarrollo hará que la generación y la atracción de determinadas categorías de tráfico a la región. Uno de los efectos de la urbanización es el aumento en las instalaciones de la demanda de transporte, por lo tanto, la demanda de medios de medios de transporte. Y debido a la debilidad de la economía con experiencia en los países en desarrollo, existe una gran cantidad de adquisiciones de automóviles en gran estima como un medio de transporte de pasajeros y mercancías, por lo tanto, el rápido crecimiento de la propiedad de vehículos en estos países.

¹⁷³ Dr. Josphat K. Z. Mwatelah, "Application of Geographical Information Systems (Gis) to Analyze Causes of Road Traffic Accidents", Case Study of Kenya, Kenya, (October 2001): 1-7, <http://www.fig.net/pub/proceedings/nairobi/mwatelah-TS11-3.pdf> , (Consultado Mayo, 2013).

A nivel mundial, se estima que en promedio, los accidentes de tráfico cuestan hasta el 1% del bruto interno bruto (PIB) en países en vías de desarrollo y en África sub-Sahariana tiene la más alta tasa de muerte por accidente en términos de muertes por vehículo registrado, en comparación con cualquier otra región del mundo. También se informa que la seguridad vial en la región de África es una gran preocupación social y económica, si bien la región tiene cerca del 4% de los vehículos de motor del mundo, el 11% de las muertes reportadas en el mundo son de esta zona. Además, el costo de los accidentes de tráfico se estima crudamente en \$ 3.7 billones de dólares en 1997.

En Kenia, el transporte por carretera representa aproximadamente el 45% de las mercancías a granel y los servicios de transporte de viajeros (Economic Review, 1997). Sin embargo, este servicio tiene su parte adversa a la economía del país, como resultado de los altos costos de los accidentes de tráfico.

Identificación de los puntos de la carretera de accidentes de tráfico.

La tendencia de los accidentes de tránsito a concentrarse en algunos puntos en los tramos de carretera por lo general se conoce como "manchas negras" o "puntos accidente" es muy común en nuestras carreteras. Estos puntos pueden ser considerados como fuentes de información espacial sobre los accidentes de tráfico.

La identificación de estos puntos ayuda a que el brazo ejecutivo del gobierno, en conjunto con los organismos de ejecución del gobierno puedan poner medidas correctivas para disminuir las ocurrencias de accidentes. Sin embargo, la información más precisa puede ser aprovechada identificando las causas de estos accidentes para que las medidas adecuadas puedan ser tomadas, todo esto para mejorar las instalaciones de las carreteras para que la conducción en estas se pueda hacer con seguridad en estos puntos.

Creación del sistema de información geográfica de bases de datos.

Sistema de Información Geográfica (SIG) es visto como una herramienta que puede utilizarse como complemento del análisis de la información de los accidentes de tránsito con el fin de identificar con precisión los factores que contribuyen a estos mediante el análisis de la alineación de la carretera en tres dimensiones, los datos de información sobre las causas de los accidentes reportados por los funcionarios competentes, y por lo tanto tratar de correlacionar estos dos aspectos.

Este enfoque puede proporcionar información útil a fin de llegar a los principios pertinentes de la autopista de diseño geométrico para reducir los casos de accidentes en las carreteras.

Varios intentos se han hecho para tratar de identificar los puntos negros de accidentes por métodos diferentes, incluyendo las técnicas de evaluación subjetivas. Sin embargo la técnica más adecuada y que ha funcionado en Kenia es mediante la georeferenciación de los datos en un SIG y en función de análisis sobre esta información, desarrollar las medidas adecuadas para reducir los accidentes de tránsito.

Las medidas de seguridad para carreteras debe incluir el diseño de la ingeniería contemporánea de nuevas carreteras y mejoras de las existentes. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es la nueva herramienta informática de gran alcance para la gestión de grandes cantidades de datos heterogéneos y sería muy valiosa en el tratamiento de tramos de carreteras con frecuentes accidentes de tráfico.

Aunque el análisis de la información de los accidentes de tránsito utiliza como base el SIG, el cual se inició hace más de 10 años, todavía no se ha utilizado a su máximo potencial. Una de las razones principales para esto es la falta de coordinación interinstitucional. Recopilación de los registros de datos de un choque involucra a varias agencias y requiere que las jurisdicciones trabajen juntas. Además, algunos organismos tienen y hacen uso de los SIG de forma independiente el uno del otro, dando como resultado la duplicación de datos, la incompatibilidad entre los sistemas, y uso ineficiente de los recursos. Otra razón fundamental es que el análisis de accidentes utilizando un SIG requiere de personal adicional, hardware y software y los fondos necesarios no siempre están disponibles.

Estas dificultades se pueden superar mediante la coordinación entre los organismos y departamentos de financiamiento común y la eliminación de la duplicidad de datos y esfuerzo. Mediante el uso de un SIG para los análisis de la información de los accidentes de tránsito, el análisis de datos, el tiempo y el esfuerzo necesarios para analizarlos y tomar decisiones se puede reducir. Recursos previamente asignados al personal se pueden aplicar de manera más eficiente a otras cuestiones de seguridad vial. Al mismo tiempo, un creciente número de escenarios y alternativas posibles se pueden evaluar con estas herramientas antes de implementarse y mejorar la seguridad del tráfico.¹⁷⁴

¹⁷⁴ Noriel Christopher C. Tiglaco, "Development of Traffic Accident Information System using Geographic Information System (GIS)", National Center for Transportation Studies, University of the Philippines Diliman, (2007): 1-10.

Tercer caso.

Estos métodos se están aplicando en varias partes del mundo obteniendo resultados satisfactorios como por ejemplo en Turquía, el cual se muestra a continuación.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha sido una herramienta popular para la visualización de los datos de los accidentes y el análisis de puntos críticos en las carreteras. Muchas agencias de tráfico han estado utilizando SIG para el análisis de accidentes. Estudios en el análisis de los accidentes tienen por objeto la identificación de lugares de alto índice de accidentes y zonas de seguridad deficientes en las carreteras. Por lo tanto, los funcionarios de tránsito pueden aplicar medidas cautelares y las disposiciones necesarias para la seguridad del tráfico. Dado que los informes de accidentes se preparan en formato de texto en Turquía, esta situación hace que sea difícil analizar los resultados. En este estudio han desarrollado un sistema de transformación de estos datos de texto a un cuadro y a continuación estos datos tabulares fueron geo referenciados en las carreteras. Posteriormente, las condiciones de accidente en estos puntos calientes se examinaron y se dieron cuenta de que los puntos calientes, determinado con dos métodos, reflejan realmente los lugares problemáticos, como cruce de caminos, puntos de unión, etc. La importancia de este estudio fue utilizar el SIG como un sistema de gestión de análisis de accidentes y la determinación de los puntos calientes en Turquía con los métodos de análisis estadístico.¹⁷⁵

En México el método basado en los Sistemas de Información Geográfica se utiliza también como herramienta más común de análisis de la información de los accidentes de tránsito, siguiendo la misma metodología descrita en los casos anteriores, esto se muestra con la herramienta presentada por la UNAM con el fin de disminuir los accidentes de tránsito en el Distrito Federal la cual se describe en los siguientes párrafos.

Por medio de estadística, mapeos y estudios geográficos, el Diagnóstico Espacial de Accidentes de Tráfico otorga datos para generar programas preventivos; es un estudio realizado por el Instituto de Geografía.

El libro Diagnóstico Espacial de los Accidentes de Tráfico en el Distrito Federal, impulsado por investigadores del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México

¹⁷⁵ Yilmaza, Tamer Bayburaa and Mevlut Gullua, "Geographical information systems aided traffic accident analysis system case study: city of Afyonkarahisar", *Elsevier*, Volume No. 40, (15 June 2007): 174-181.

(UNAM), estudio pionero en su tipo, fue presentado hoy, en el marco de la XXXI Feria Internacional del Libro del Palacio de Minería.

Cerca del 75 por ciento de los accidentes son por colisiones y atropellamientos, mientras que el 60 por ciento de los fallecimientos son de peatones, y el mayor número de atropellados se registra en el Centro Histórico de la Ciudad de México y sus inmediaciones “lo que deja claro que se presta poca atención a los peatones, los más desprotegidos y vulnerables, y todas las campañas van hacia el cuidado de los conductores”.

La investigación tiene como base un concepto espacial, de acuerdo con patrones territoriales, de cómo se distribuyen los accidentes de tránsito en los límites jurídico-administrativos del Distrito Federal. Con esta información, se pueden concretar campañas de prevención de bajo costo, porque se tienen detectadas las zonas de conflicto, que representan menos del 20 por ciento de la red vial.

El diagnóstico, aseguró, es de los primeros documentos que se hacen en materia de accidentes con la contribución de la Geografía. Con ello se demuestra “que la Universidad cumple con su rol de analizar problemas sociales de alto impacto”, mediante herramientas de alta tecnología, con los sistemas de información geográfica que resultan de combinar datos estadísticos y cartográficos.

Es un insumo para que las autoridades competentes puedan planear programas de prevención de accidentes viales para todo el Distrito Federal y cada una de las delegaciones, de acuerdo con sus características, consideró.

El Diagnóstico Espacial cumple con el propósito de identificar y caracterizar los patrones territoriales de los accidentes que se registran en la ciudad de México en dos escalas de análisis: por delegaciones e intersecciones viales. Para el análisis de la información por delegaciones se construyeron mapas en los que se presenta la distribución de accidentes de tránsito por frecuencia o considerando tasas por habitantes o vehículos.

Con esta información fue posible identificar grupos de delegaciones con patrones de “accidentalidad” vial similares, que pueden servir de apoyo para generar propuestas preventivas diferenciadas, zonificando delegaciones y estableciendo prioridades en función de las responsabilidades y metas de las instituciones federales o locales involucradas con la atención y prevención de accidentes.

Para la identificación de los patrones territoriales que presentan los accidentes de tránsito a nivel de intersección, en toda la red vial de Distrito Federal, se generaron seis mapas para cada delegación con las siguientes temáticas: frecuencia de colisiones y atropellamientos; frecuencia de caída de pasajeros, volcaduras y de rapamientos; tipo de involucrados en accidentes como peatones, conductores y pasajeros; frecuencia de involucrados por condición, es decir, muertos, lesionados e ilesos; intersecciones y áreas de alto riesgo vial y corredores con alto riesgo vial.

Además, para cada delegación se generó información estadística referente a las intersecciones, áreas y corredores de alto riesgo vial que permiten apreciar las particularidades de esos sitios, por tipo de accidente, tipo de involucrado y condición del involucrado.¹⁷⁶

4.3. Métodos basados en redes neuronales.

Las redes neuronales son la herramienta preferida para muchas aplicaciones de minería de datos predictiva por su potencia, flexibilidad y facilidad de uso. Las redes neuronales predictivas son especialmente útiles en las aplicaciones cuyo proceso subyacente sea complejo; por ejemplo:

- Prever la demanda de los consumidores, para racionalizar los costes de producción y entrega.
- Predecir la probabilidad de respuesta al marketing, mediante correo directo, para determinar a qué unidades familiares de una lista de correo debe enviarse una oferta.
- Puntuar a un solicitante para determinar el riesgo que supone concederle un crédito.
- Detectar transacciones fraudulentas en una base de datos de reclamaciones de seguros.

Las redes neuronales utilizadas en las aplicaciones predictivas, como las redes de perceptrones multicapa (MLP) y las de función de base radial (RBF), se supervisan en el sentido de que los resultados pronosticados por el modelo se pueden comparar con los valores conocidos de las variables de destino. La opción de redes neuronales de SPSS le permite ajustar las redes MLP y RBF y guardar los modelos resultantes para la puntuación.

¹⁷⁶ Universia, "Presenta UNAM herramienta para disminuir accidentes de tránsito en el DF", <http://noticias.universia.net.mx/en-portada/noticia/2010/02/23/181621/presenta-unam-herramienta-disminuir-accidentes-transito-df.html> , (Consultado Febrero, 2010).

Una red neuronal es un procesador distribuido en paralelo de forma masiva con una propensión natural a almacenar conocimiento experimental y convertirlo en disponible para su uso. A semeja al cerebro en dos aspectos:

- El conocimiento se adquiere por la red mediante un proceso de aprendizaje.
- Las fuerzas de conexión inter neuronal, conocidas como ponderaciones sinápticas, se utilizan para almacenar el conocimiento.¹⁷⁷

La función de las redes neuronales y de sus algoritmos de aprendizaje consiste en producir arquitecturas y conjuntos de fuerzas de conexión que generan las relaciones correctas de entrada-salida entre los patrones. En un sentido, esto es una trivialidad, ya que lo que queremos de cualquier sistema de cómputo es poner los datos de un lado y obtener la respuesta correcta del otro. Una peculiaridad de las redes neuronales es que memorizan las respuestas correctas en lugar de calcularlas.

Los modelos de redes neuronales son algoritmos matemáticos de aprendizaje que en función de los datos de entrada y los de salida establecen una función que simulen los mismos comportamientos, la esencia del algoritmo es reproducir el mismo patrón de comportamiento de los datos de entrada en función de los de salida, para con esta poder hacer predicciones futuras, este es el objetivo principal de una red neuronal. La asociación lineal de datos ilustra la arquitectura clásica de una red neuronal, este asociador lineal es similar a una regresión lineal. Cuando está aprendiendo, tenemos un conjunto de patrones de entrada conocidos que queremos asociar con un conjunto de patrones de salida. Hacemos esto al modificar las ponderaciones en la matriz de conexión, acoplando a dos grupos de neuronas. Para juzgar el desempeño de una red algunas medidas de exactitud y capacidad son fáciles de calcular y muy informativas que generalmente se mide el comportamiento de los resultados pronosticados contra los reales.¹⁷⁸

Para poder diferenciar las redes neuronales de los métodos estadísticos tradicionales podemos definir lo siguiente: el modelo de regresión lineal tradicional puede adquirir conocimiento a través del método de mínimos cuadrados y almacenar ese conocimiento en los coeficientes de regresión. En este sentido, es una red neuronal. De hecho, se puede argumentar que la regresión lineal es un caso especial de determinadas redes neuronales. Sin embargo, la

¹⁷⁷ SSPSS Company, "Manual de consulta del software SSPSS versión 16.0, 2007", <http://min.webs.upv.es/wp-content/uploads/2011/03/Manual-SPSS16.pdf>, (Consultado Enero, 2012).

¹⁷⁸ James A. Anderson, "Redes Neuronales", Alfa Omega Grupo Editor, S.A. de C.V., Primera Edición Agosto 2007.

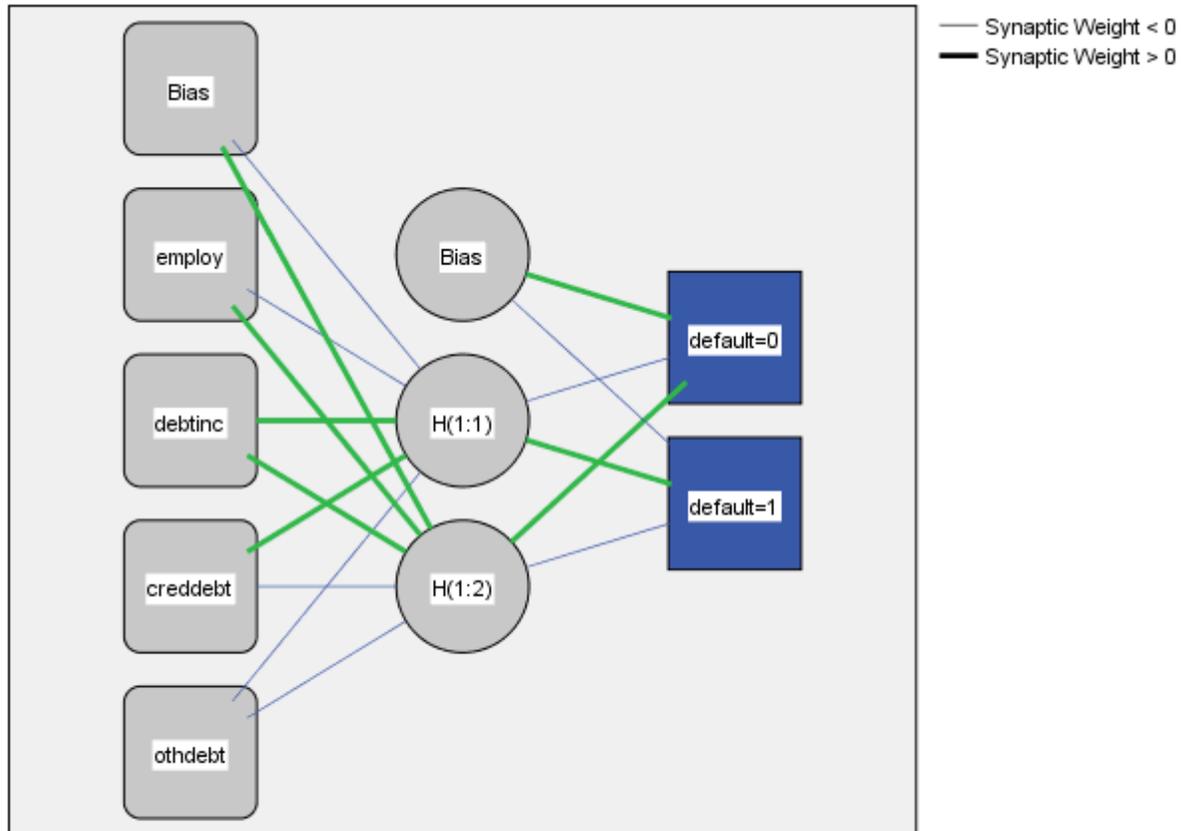
regresión lineal tiene una estructura de modelo rígida y un conjunto de supuestos que se imponen antes de aprender a partir de los datos. Por lo contrario, la definición anterior plantea exigencias mínimas sobre la estructura y los supuestos del modelo. Por tanto, una red neuronal puede aproximar una amplia gama de modelos estadísticos sin que tenga que hipotetizar de antemano determinadas relaciones entre las variables dependientes e independientes. En lugar de eso, la forma de las relaciones se determina durante el proceso de aprendizaje. Si una relación lineal entre las variables dependientes e independientes es adecuada, los resultados de la red neuronal deben aproximarse lo máximo posible a los del modelo de regresión lineal. Si una relación no lineal es más adecuada, la red neuronal se aproximará automáticamente a la estructura del modelo “correcto”. El inconveniente que supone esta flexibilidad radica en que las ponderaciones sinápticas de una red neuronal no pueden interpretarse fácilmente. Por tanto, si intenta explicar un proceso subyacente que produce las relaciones entre las variables dependientes e independientes, sería mejor usar un modelo estadístico más tradicional. Sin embargo, si la interpretación del modelo no es importante, puede obtener rápidamente modelos con buenos resultados mediante una red neuronal.

Las redes neuronales son algunos de las técnicas más utilizadas en la predicción de los accidentes de tránsito, aquí se presentan dos casos en los cuales se utilizan para hacer pronósticos.

Estructura de red neuronal

Aunque las redes neuronales plantean exigencias mínimas sobre los supuestos y la estructura del modelo, resulta útil comprender la arquitectura general de la red. La red de perceptrones multicapa (MLP) o de función de base radial (RBF) es una función de predictores (denominados también entradas o variables independientes) que minimiza el error de predicción de las variables de destino (también denominadas salidas).

Tomemos como ejemplo un conjunto de datos, en el que desea poder identificar a los posibles morosos entre un grupo de solicitantes de préstamos. Una red MLP o RBF aplicada a este problema es una función de las medidas que minimiza el error al pronosticar la posibilidad de mora. La figura siguiente resulta muy útil para ilustrar la forma de esta función.



Hidden layer activation function: Hyperbolic tangent

Output layer activation function: Softmax

Figura 4.1. Arquitectura Feedforward con una capa oculta.¹⁷⁹

Esta estructura se denomina arquitectura feedforward porque las conexiones de la red fluyen unidireccionalmente desde la capa de entrada hasta la capa de salida sin ciclos de retroalimentación. En esta figura:

- La capa de entrada contiene los predictores.
- La capa oculta contiene nodos (o unidades) no observables. El valor de cada unidad oculta es una función de los predictores; la forma exacta de la función depende, por un lado, del tipo de red y, por otro lado, de especificaciones controlables por el usuario.
- La capa de salida contiene las respuestas. Como el historial de moras es una variable categórica con dos categorías, se recodifica como dos variables de indicador. Cada unidad

¹⁷⁹ SSPSS Company, "Manual de consulta del software SSPSS versión 16.0, 2007", <http://min.webs.upv.es/wp-content/uploads/2011/03/Manual-SPSS16.pdf>, (Consultado Enero, 2012):12.

de salida es una función de las entradas ocultas. Nuevamente, la forma exacta de la función depende, por un lado, del tipo de red y, por otro lado, de especificaciones controlables por el usuario.

La red MLP permite una segunda capa oculta; en ese caso, cada unidad de la segunda capa oculta es una función de las unidades de la primera capa oculta, y cada respuesta es una función de las unidades de la segunda capa oculta.¹⁸⁰

Primer caso.

Los accidentes de tráfico resultan en una pérdida importante de la sociedad y las familias en general. En los últimos años, los accidentes de tráfico suben rápidamente en China, y la correspondiente pérdida es notable. Al descubrir y dominar los daños y las pérdidas en los accidentes de tráfico en tiempo, podemos analizar sus causas y reconocer la probabilidad que se produzcan, lo cual es útil en la toma de medidas para evitar que se produzcan nuevamente. Por lo tanto, es importante dejar en claro la relación entre los factores de impacto de tráfico cualitativamente y cuantitativamente. Con el rápido desarrollo de la economía moderna, los ingresos de los residentes ha aumentado y la producción de vehículos y su propiedad y esto ha originado un incremento en el número de accidentes y como consecuencia el número de muertes de las personas y las heridas. Sin embargo, la relación entre ellos es difícil que se exprese en una función especial de análisis matemático tal que:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$$

Donde Y denota la magnitud de la pérdida de accidentes de tráfico, X1 a Xn son los factores de impacto de la pérdida de accidentes de tráfico. Sin embargo, múltiples factores por lo general reducen la eficiencia de los pronosticadores, y lo que nos interesa es cómo encontrar un método que nos reduzca el impacto de los factores y mantener la exactitud del modelo de predicción. A continuación, aplicamos el análisis de componentes principales para la selección de factores de impacto. Los enfoques son los siguientes:

- Paso 1. Los valores de los factores de impacto son normalizados por el método de valores Z.
- Paso 2. Calcular la matriz relativa para los datos indexados.
- Paso 3. Calcula los vectores y centros de características no negativas para la ecuación.

¹⁸⁰ SSPSS Company, "Manual de consulta del software SSPS versión 16.0, 2007", <http://min.webs.upv.es/wp-content/uploads/2011/03/Manual-SPSS16.pdf> , (Consultado Enero, 2012).

Paso 4. Calcula el rango de contribución de cada variable indexada usando sus características centrales. Si el rango de contribución acumulada de las primeras variables es más del 85% el principal componente es $X=(x_1, x_2, \dots, x_p)$.

Por el análisis principal de componentes, nosotros seleccionamos el número de accidentes, muerte de gente y gente herida como los factores de impacto para el cálculo de las pérdidas por accidentes. Sin embargo esas relaciones son difíciles de ser expresadas en una función matemática del tipo:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3)$$

Donde Y denota las pérdidas de los accidentes de tránsito, X_1, X_2, X_3 son el número de accidentes de tráfico, el número de gente muerta y la gente herida respectivamente. Los métodos matemáticos típicos no están diseñados para resolver tal complejidad no lineal.

Recientemente, la red neuronal artificial, es una herramienta para la aproximación de funciones no lineales, ha demostrado grandes ventajas en la predicción, la identificación de patrones, técnicas de optimización y procesamiento de señales. La técnica de redes neuronales reprogramadas (BP), es una de las técnicas más utilizadas dentro de las redes neuronales para el ajuste de funciones. A diferencia de los métodos matemáticos clásicos, las redes de BP pueden establecer la aproximación de funciones específicas para datos específicos de entrada y salida relacionándolos dentro de un mismo modelo. Por lo tanto, tratamos de establecer un modelo de BP para la predicción de accidentes de tráfico. Sin embargo la red tradicional de BP tiene algunas debilidades, es fácil caer en el punto mínimo local y la velocidad de convergencia de la computación es algo más lento, que afectan a la función de predicción. La red neuronal wavelet es un método de análisis prevaleciente en el mundo, es una combinación de características de localización de tiempo-frecuencia, de la transformada de wavelet y una función de redes neuronales artificiales. Es una serie que surgió en el proceso de traducción y de dilatación llevado a cabo en la descomposición wavelet y tiene las características de la función de aproximación e identificación de estilo de la descomposición wavelet. Debido a la introducción de dos factores, a saber, el factor de traducción y de dilatación, red neuronal wavelet posee tales habilidades como función de aproximación válida, la identificación de patrones de comportamiento y la audición de errores. Por su algoritmo principal no es el mismo algoritmo de BP para la red neuronal clásica, es capaz de superar las debilidades inherentes del algoritmo BP ese proceso de formación a menudo se instalan en los mínimos deseables locales de la superficie de error o convergen muy

lentamente y se acompañan de cálculo complejo. Aunque sólo unas pocas aplicaciones prácticas de la red neuronal wavelet se reportan hasta el momento, su superioridad para resolver complicados problemas no lineales se ha demostrado en investigaciones y los investigadores han mostrado interés en esta poco a poco.

En este ejemplo, se aproximó y ajusto la relación funcional entre el número de accidentes, la muerte de las personas, las personas heridas y la pérdida de accidentes utilizando la teoría de wavelets, y el algoritmo de aprendizaje correspondientes de la red neuronal de wavelet.

Todo este desarrollo se hizo encontrando una ecuación que nos relacionara las variables antes mencionadas, la ecuación es la siguiente y el desarrollo se puede ver consultando la referencia.¹⁸¹

$$f(o) = \left(\sum_{j=1}^q \right) * h \left[\left(\sum_{i=1}^n ((w_{ij}x_i) - b_j) \right) / a_j \right]$$

Donde a_j , b_j son los factores de dilatación y traslación respectivamente y q es el número de los wavelons en el estudio propuesto.

Esta ecuación se complementa con el algoritmo de aprendizaje el cual se resume en las siguientes formulas:

$$n(t) = n(t-1)O \quad a = a, AE < 0$$

$$n(t) = n(t-1)F \quad a = 0, AE > 0$$

donde $n(t)$, $n(t-1)$ son los factores de aprendizaje de este tiempo y del último tiempo, O y F son constantes, $O > 1$, $F < 1$, $AE = E(t) - E(t-1)$, donde $E(t)$, $E(t-1)$ son errores del sistema del tiempo presente y del último.

La aplicación que se hace en este caso es encontrar una evaluación de la perdida por accidentes. En el proceso de aprendizaje se estableció que la precisión de la red fue de 0.001 y los resultados fueron muy cercanos a los reales los cuales se muestran en la siguiente tabla:

¹⁸¹ Shag Li and Dongmei Zhao, "Prediction of Road Traffic Accidents Loss Using Improved Wavelet Neural Network", *Institute of Intelligent Information Engineering Zhejiang University, Southwest Jiaotong University*, (Junio, 2010):87-98.

Comparación de valor actual y valor pronosticado.

Valor actual 5732170 4939500 4934950 5909100

Pronosticado 5738475 4932091 4944820 5919736

Valor actual 5625250 3800770 4215810 3818290

Pronosticado 5636500 3793168 4225085 3810272

Segundo caso.

La sociedad por completo ha puesto más atención en los accidentes de tráfico en China. Con el fin de atacar el problema científicamente y poder predecirlos por cuestiones de seguridad, los principales factores que se consideran como causas fueron analizados. Las muertes por accidentes fue considerada como la principal variable que nos describe este fenómeno y otros tres factores fueron tomados como parámetros, incluyendo la cantidad de vehículos, las millas de autopista y las pérdidas per capital por accidentes. Los dos modelos de predicción la red neural BP y un algoritmo híbrido basado en redes neuronales y algoritmos genéticos fueron construidos respectivamente. Los modelos neurales usaron datos de accidentes desde 1978 hasta 1998 como datos de aprendizaje del modelo. Y datos desde 1999 hasta el 2004 fueron usados para validar los modelos. Los pronósticos resultantes muestran que el modelo basado en algoritmos genéticos tiene más alto nivel de predicción que la red neuronal BP; el pronóstico determina que los valores de muertes por accidentes de tránsito para el año 2010 serán de 139,000 gentes y para el 2020 de 167,000 gentes.

El algoritmo genético (GA) basado en la teoría de la evolución de Darwin y la teoría de la variación genética de Mendel, en esta investigación se formó un nuevo algoritmo adicionando a la red neuronal BP el algoritmo genético, en este proceso se elimina el algoritmo de BP y se reemplaza por el genético. La principal idea es: primero el algoritmo genético es introducido para optimizar los iniciales pesos de los BP y entonces se introduce la red de aprendizaje de acuerdo con gradiente de la dirección negativa. El proceso matemático de este estudio se puede ver en la referencia.¹⁸²

¹⁸² Qin Liyan and Shag Chunfu, "Macro prediction model of road traffic accident based on neural network and genetic algorithm", Intelligent Computation Technology and Automation, Volume No. 1, (2009): 354-357.

Al final de este Capítulo podemos concluir lo siguiente:

- a. Los métodos que mayormente se utilizan, para la modelación y proyección de los accidentes de tránsito, son estáticos los cuales no representan los cambios de los diferentes elementos a través del tiempo, ni su interacción entre los elementos que los componen.
- b. Los dos tipos de modelos que se utilizan para la reducción de los accidentes de tránsito son los que utilizan como base los sistemas de información geográfica y la geoestadística, y los basados en redes neuronales, estos tipos de modelos son estáticos y la base para su entendimiento y proyección es la información histórica, en función de esta se determinan los puntos en donde sucede la mayor cantidad de accidentes, lo que se denominan puntos rojos, así como también se determinan las ecuaciones que se ajustan al comportamiento de las variables que influyen en estos.
- c. Este tipo de modelos tienen la característica de representar cualquier tipo de fenómeno que sucede en la superficie de la tierra, pero sin mostrar los cambios en el tiempo.
- d. Del análisis de estos casos de estudio se desprenden las oportunidades de mejorar este tipo de modelación a través de la representación de sistemas complejos a través de modelos dinámicos, los cuales reflejen la complejidad de las situaciones.

Esta hoja se dejó en blanco de manera intencional

Capítulo 5

Aplicación de modelos de accidentes de tránsito

Contenido

5.1.	Modelo basado en un SIG.....	232
5.2.	Modelo basado en redes neuronales.....	242
5.3.	Comparación de las características de los modelos basados en SIG con respecto a los que utilizan redes neuronales.....	248
5.4.	Modelo basado en geosimulación.....	250

Este Capítulo es el más importante, ya que se desarrolla un caso de estudio, con el fin de mostrar las ventajas y desventajas de los modelos basados en geosimulación en relación a los modelos tradicionales, que es el objetivo principal de esta investigación.

El primero se hizo utilizando un sistema de información geográfica, el segundo utilizando redes neuronales y el tercero utiliza la técnica de geosimulación y de manera específica la simulación basada en agentes, además de su desarrollo, se hace un análisis más a fondo de cómo funciona cada uno de estos, con el fin de conocer las ventajas y desventajas para la representación y predicción de los accidentes de tránsito, así como conocer sus áreas de oportunidad entre estos.

Se modeló la Avenida Insurgentes Norte, ya que de acuerdo con el Instituto de Acceso a la Información Pública y Protección de Datos Personales del Distrito Federal,¹⁸³ y a datos de la Secretaría de Seguridad Pública,¹⁸⁴ esta es una de las Avenidas con mayor cantidad de accidentes

¹⁸³ Instituto de Acceso a la Información Pública y Protección de Datos Personales del Distrito Federal, "Vías con mayor cantidad de accidentes", http://www.infodf.org.mx/pdfs/resoluciones/recur05/RI_0058.pdf, (Consultado Febrero, 2012).

¹⁸⁴ Política Digital, "Los cruceros más peligrosos en el DF", Serie Política Digital, <http://www.politicadigital.com.mx/?P=leernoticiaprint&Article=21038>, (Consultada en Diciembre, 2010).

de tránsito. Esta fue la principal razón por la cual se decidió modelar este corredor y que los resultados tuvieran un mayor impacto que si lo realizaríamos en otros.

5.1. Modelo basado en un sistema de información geográfico (SIG).

El primer modelo que se estudió es el basado en un sistema de información geográfica (SIG), que es uno de los métodos tradicionales que hemos estudiado, a la vez que se fueron describiendo los pasos para su realización, se fue procesando la información para su elaboración.

- a. Primeramente se necesitó tener la ubicación geográfica (latitud y longitud) de los accidentes en donde sucedieron, ya con esta referencia espacial se georeferenciaron. Esta información se obtuvo del documento “Diagnostico Espacial de los Accidentes de Tránsito en el DF”¹⁸⁵ editado el año 2005 por la Secretaria de Salud en conjunto con el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, así como también información de una Compañía Aseguradora (información confidencial) que nos proporcionó datos históricos, los accidentes registrados se muestran en la tabla 5.1.
- b. Una vez que se tuvo el número de accidentes con su dirección, estos se geo codificaron, esto se puede realizar aplicando algunas herramientas que ya vienen integradas en algunos sistemas de información geográfica, en nuestro caso utilizamos una de desarrollo propio hecha sobre la plataforma del software MapInfo en el lenguaje MapBasic, los resultados de la geo codificación se muestran en la figura 5.1. En la figura 5.2., se muestra un mapa temático sobre el número de accidentes por crucero, en este el tamaño de cada círculo es proporcional al número de accidentes en el crucero.

¹⁸⁵ Secretaría de Salud, “Diagnostico Espacial de los Accidentes de Tránsito en el DF”, http://www.cenapra.salud.gob.mx/sites/cenapra/imgs/htm2/2009/trabajos_de_investigacion/2.Atlas_DF.pdf, (Consultado Diciembre, 2010).

Accidentes por cruceo			
Calle 1	Calle 2	Año 2005	Por mes
Av. Insurgentes Norte	Eje 5 Norte Av. Montevideo	18	1.5
Av. Insurgentes Norte	Av. Acueducto de Guadalupe	17	1.4
Av. Insurgentes Norte	Eje 4 Norte Av. Euzkaro	19	1.6
Av. Insurgentes Norte	Av. Ticoman	16	1.3
Av. Insurgentes Norte	Av. Ferrocarril Industrial (Clave)	10	0.8
Av. Insurgentes Norte	Circuito Interior	11	0.9
Av. Insurgentes Norte	Poniente 112	11	0.9
Av. Insurgentes Norte	Fortuna	6	0.5
Av. Insurgentes Norte	Av. Cuitlahuac	4	0.3
Av. Insurgentes Norte	Moctezuma	3	0.3
Av. Insurgentes Norte	Tenochtitlan	3	0.3
Av. Insurgentes Norte	Excelsior	4	0.3
Total de accidentes en los cruceos		122	10.2
Accidentes por corredor			
Calle 1	Calle 2	Año 2005	Por mes
Av. Insurgentes Norte		140	11.7
Accidentes no en cruceos			
Calle 1	Calle 2	Año 2005	Por mes
Accidentes no en cruceos		18	1.5

Tabla 5.1. Información de accidentes de tránsito por dirección.¹⁸⁶

¹⁸⁶ Secretaría de Salud, "Diagnostico Espacial de los Accidentes de Tránsito en el DF", http://www.cenapra.salud.gob.mx/sites/cenapra/imgs/htm2/2009/trabajos_de_investigacion/2.Atlas_DF.pdf, (Consultado Diciembre, 2010).

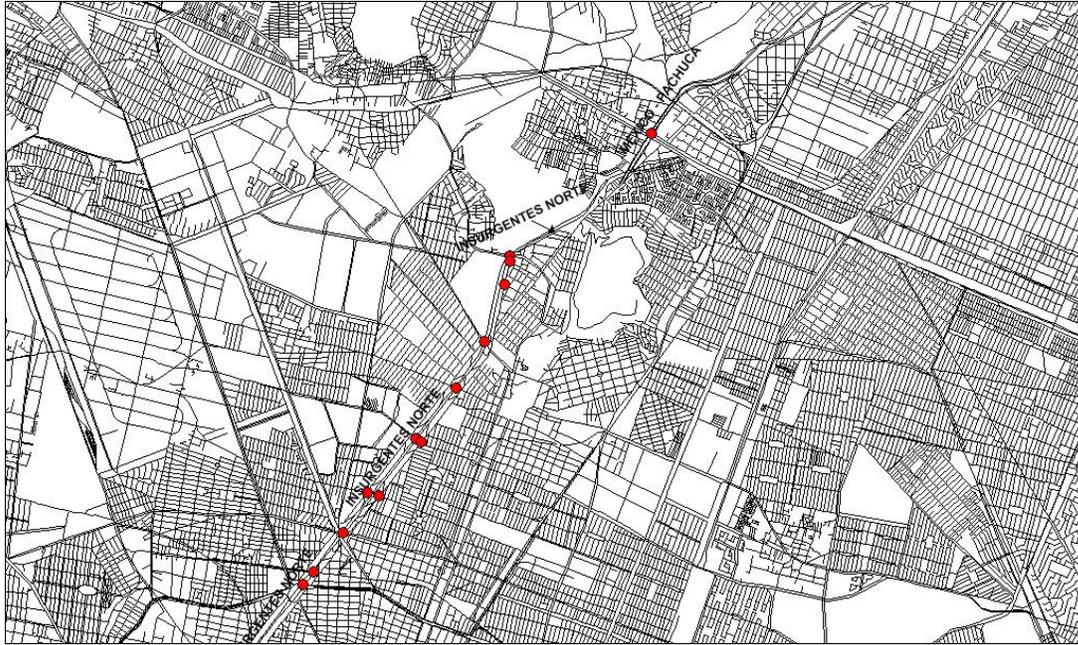


Figura 5.1. Accidentes geo codificados.



Figura 5.2. Mapa temático del número de accidentes en cada cruce de la Avenida Insurgentes Norte.¹⁸⁷

¹⁸⁷ Elaboración propia.

- c. Ya con los valores geocodificados por periodo de tiempo, se aplicó una función de estadística geoespacial que realizó la proyección de estos valores con el tiempo, en la figura 5.3, se muestra está para el corredor de la Avenida Insurgentes Norte, estos se presentan por crucero y en la tabla 5.2, los resultados. Para esta proyección se utilizó la herramienta de geoestadística del software MapInfo, la técnica que se utilizó fue la denominada kriging, que es una técnica de estimación local que ofrece el mejor estimador lineal insesgado de una característica que se estudia¹⁸⁸. Otra de las funciones que se muestran es un mapa de calor, en el cual se muestran las zonas en donde se concentra la mayor cantidad de accidentes, dependiendo de la concentración de estos es el color, en este caso las zonas rojas nos muestran las áreas en donde se presentan la mayor cantidad de accidentes, esto lo podemos ver en las figuras de la 5.4 a la 5.7. Este tipo de mapas forman parte de algunas técnicas de análisis espacial en donde se resaltan los puntos en donde se tiene la mayor incidencia del fenómeno o proceso que se está estudiando. Las zonas rojas son aquellas en donde se deberá de poner más atención para hacer una evaluación de sus condiciones y poder tomar medidas para la reducción de los accidentes.

¹⁸⁸ Martín A. Díaz Viera, *Geoestadística Aplicada* (México, D.F., Cuba: Instituto de Geografía de la UNAM y el Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA), 31.

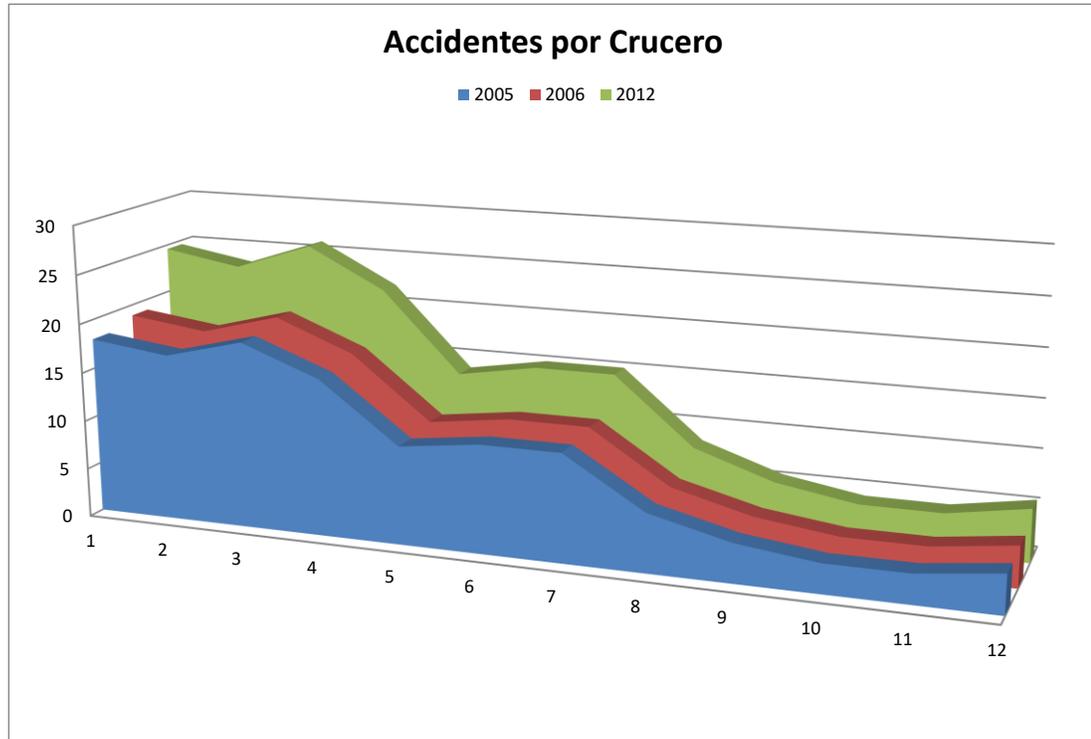


Figura 5.3. Proyección de accidentes por crucero.¹⁸⁹

Intersección	Calle 1	Calle 2	2005	2006	2012
1	Av. Insurgentes Norte	Eje 5 Norte Av. Montevideo	18	19	25
2	Av. Insurgentes Norte	Av. Acueducto de Guadalupe	17	18	23
3	Av. Insurgentes Norte	Eje 4 Norte Av. Euzkaro	19	20	26
4	Av. Insurgentes Norte	Av. Ticoman	16	17	22
5	Av. Insurgentes Norte	Av. Ferrocarril Industrial (Clave)	10	11	14
6	Av. Insurgentes Norte	Circuito Interior	11	12	15
7	Av. Insurgentes Norte	Poniente 112	11	12	15
8	Av. Insurgentes Norte	Fortuna	6	6	8
9	Av. Insurgentes Norte	Av. Cuitlahuac	4	4	5
10	Av. Insurgentes Norte	Moctezuma	3	3	4
11	Av. Insurgentes Norte	Tenochtitlan	3	3	4
12	Av. Insurgentes Norte	Excelsior	4	4	5
	Total de accidentes en los cruces		122	128	167

Tabla 5.2. Resultados de la proyección de accidentes por crucero.¹⁹⁰

¹⁸⁹ Elaboración propia.

¹⁹⁰ Elaboración propia.

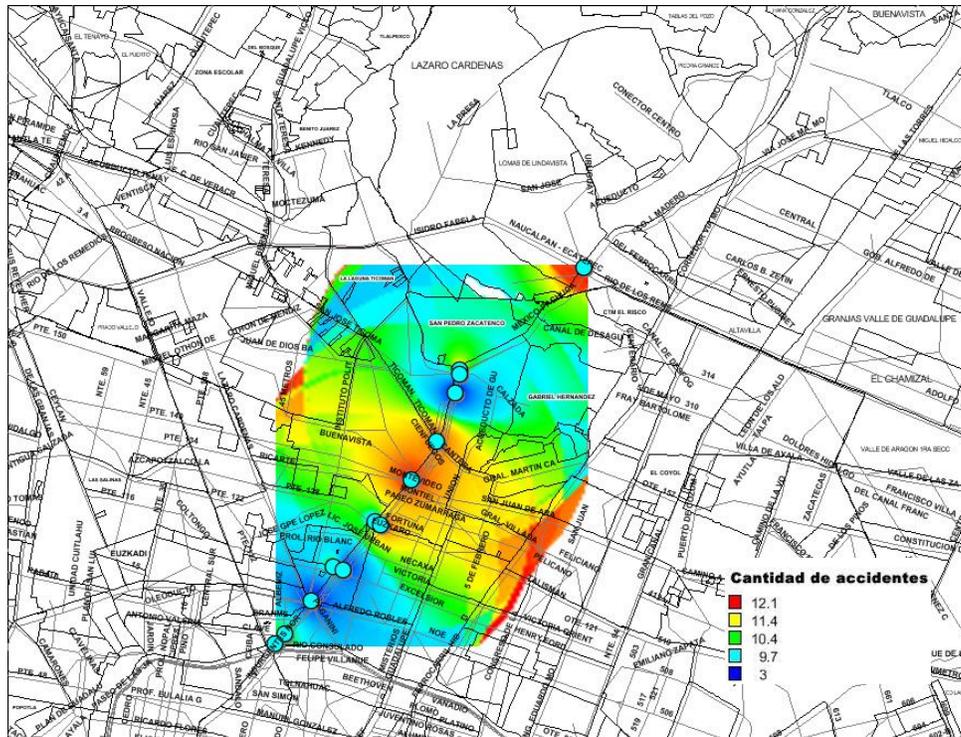


Figura 5.4. Zonas de ocurrencia de accidentes en el corredor Insurgentes Norte.¹⁹¹

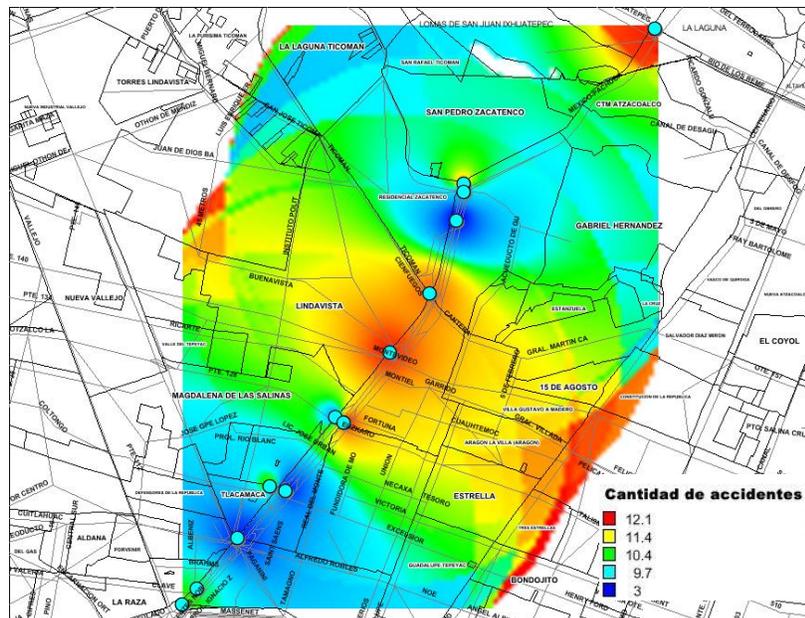


Figura 5.5. Zoom de las zonas de ocurrencia de los accidentes del corredor Insurgentes Norte.¹⁹²

¹⁹¹ Elaboración propia.

¹⁹² Elaboración propia.

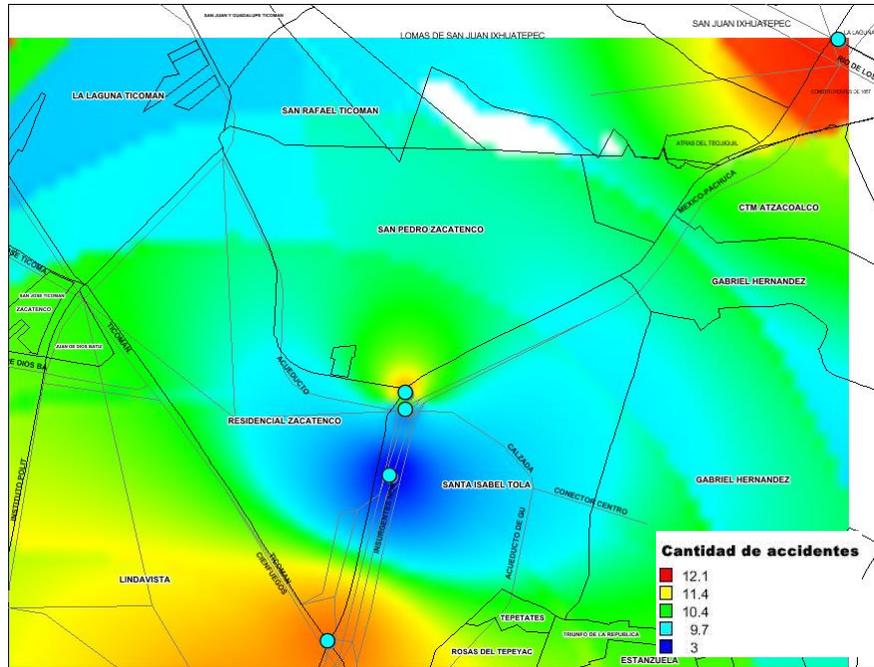


Figura 5.6. Zoom de las zonas de ocurrencia de los accidentes en el corredor Insurgentes Norte.¹⁹³

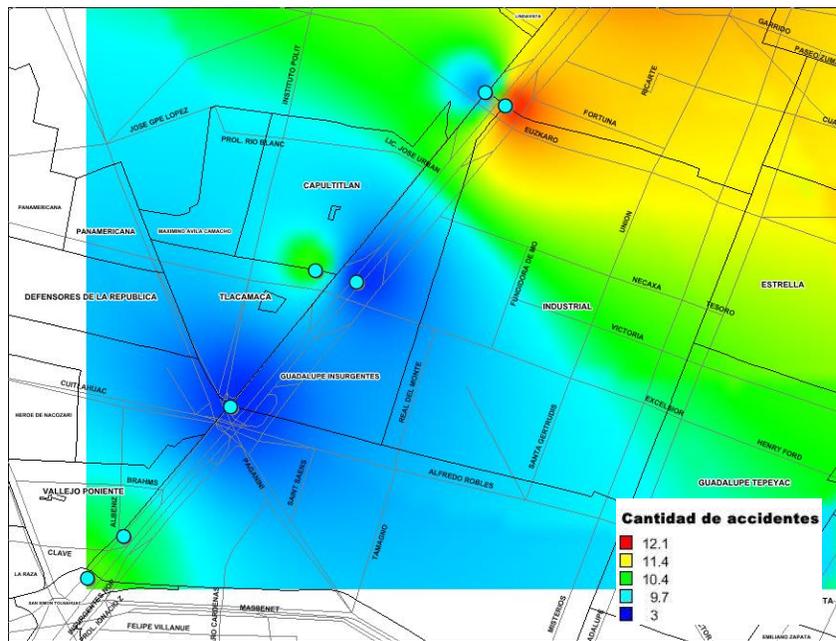


Figura 5.7. Zoom de las zonas de ocurrencia de los accidentes en el corredor Insurgentes Norte.¹⁹⁴

¹⁹³ Elaboración propia.

¹⁹⁴ Elaboración propia.

Lo que hace el modelo basado en un SIG, es proporcionarnos información, no de manera directa, sobre el fenómeno o proceso que estamos analizando, a través de este podemos saber las zonas de riesgo en donde existen más accidentes así como una proyección de estos, en función de esta podremos realizar visitas al lugar y hacer análisis más profundo, con el fin de tomar medidas para reducir el número de accidentes de tránsito. Se puede tener información sobre como suceden los fenómenos o procesos en un lapso de tiempo, a través de la comparación de información al principio y al final de este, pero no podemos saber que paso durante ese lapso.

Es de suma importancia recalcar que se pueden realizar un análisis de tipo espacial en función de la ubicación de otros elementos que intervienen en el ambiente, como por ejemplo considerar zonas de bares, aforo vehicular, etc., en los siguientes párrafos se hace un análisis considerando los aforos vehiculares.

La tabla 5.3 muestra el aforo vehicular por minuto de las intercepciones, si estos los geocodificamos y hacemos un mapa temático, en donde el tamaño de cada circulo es proporcional al valor de la variable, de los accidentes y de los aforos vehiculares, podremos ver, en la figura 5.2 y 5.8, que existe un comportamiento similar de la cantidad de accidentes con respecto a los aforos. De las imágenes, podemos concluir que existe una relación directa entre la cantidad de accidentes y los aforos vehiculares de manera proporcional, este tipo de comportamiento lo podemos inferir a partir de la relación espacial entre las diferentes variables.

Intersección	Calle 1	Calle 2	2005	Aforo vehicular
1	Av. Insurgentes Norte	Eje 5 Norte Av. Montevideo	18	50
2	Av. Insurgentes Norte	Av. Acueducto de Guadalupe	17	45
3	Av. Insurgentes Norte	Eje 4 Norte Av. Euzkaro	19	40
4	Av. Insurgentes Norte	Av. Ticoman	16	20
5	Av. Insurgentes Norte	Av. Ferrocarril Industrial (Clave)	10	15
6	Av. Insurgentes Norte	Circuito Interior	11	25
7	Av. Insurgentes Norte	Poniente 112	11	15
8	Av. Insurgentes Norte	Fortuna	6	10
9	Av. Insurgentes Norte	Av. Cuitlahuac	4	9
10	Av. Insurgentes Norte	Moctezuma	3	10
11	Av. Insurgentes Norte	Tenochtitlan	3	8
12	Av. Insurgentes Norte	Excelsior	4	7
	Total de accidentes en los crueros		122	254

Tabla 5.3. Aforo vehicular, en vehículos por minuto.¹⁹⁵

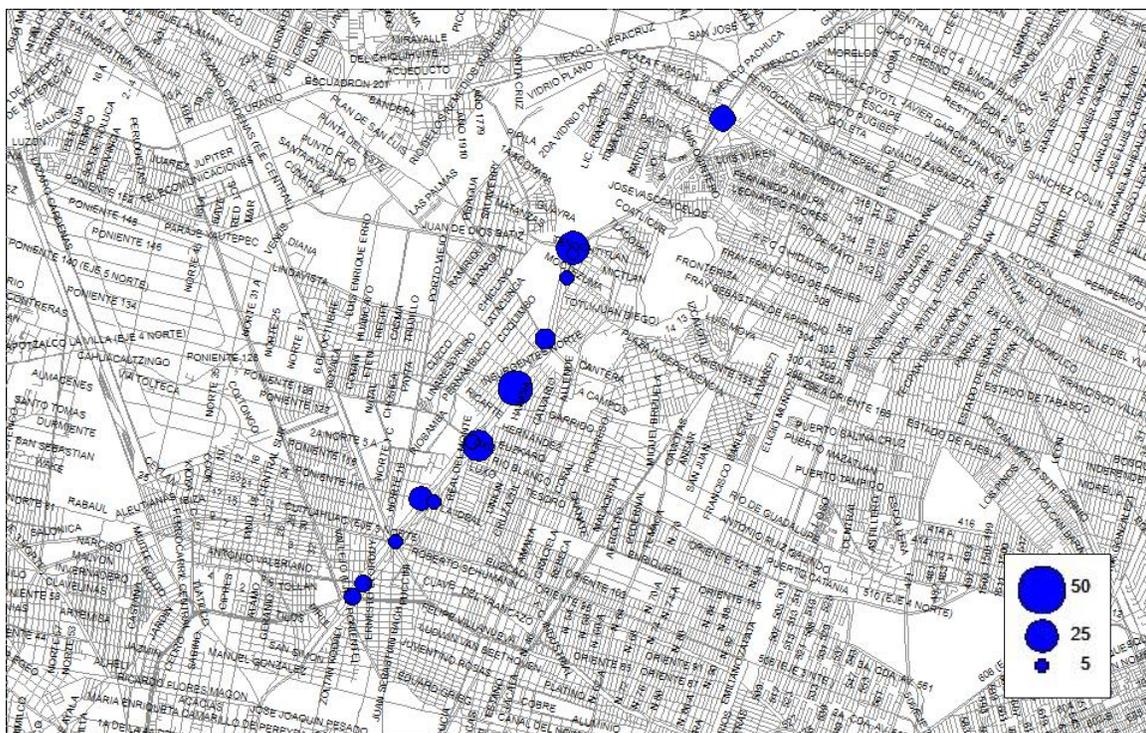


Figura 5.8. Aforo vehicular en cada cruceo.¹⁹⁶

¹⁹⁵ Elaboración propia.

¹⁹⁶ Elaboración propia.

Tipo de información obtenida:

- a. La información que nos proporcionó no es a un nivel de agregación por elemento del sistema, es decir, nos dice que en esa zona hay accidentes y cuál sería el patrón en estos puntos, pero no nos proporciona información puntual sobre qué fue lo que ha provocado estos accidentes. Esto requiere de otro tipo de análisis con más profundidad o incluso visita al lugar con el fin de conocer cuáles son los elementos que están causando los accidentes.
- b. No nos ayuda a entender el fenómeno del accidente de una manera directa, aunque es posible conocer el comportamiento de estos a través de la comparación de sus posiciones espaciales.
- c. No nos dice el comportamiento de las restantes variables que pudieran propiciar el accidente, únicamente si son dependientes de estas o se pueden obtener de manera directa.
- d. El número de accidentes es dependiente de un conjunto de variables, se basa en el enfoque causa-efecto.
- e. Es posible conocer el comportamiento de los variables en relación al tiempo por medio de imágenes durante diferentes etapas del periodo.
- f. El realizar este tipo de modelos son sencillos y no requiere de gran capacidad de computación y la curva de aprendizaje de los software de las herramientas de geo estadística son muy verticales, es decir, se requiere de poco tiempo para su aprendizaje.

El objetivo de este trabajo es demostrar que un modelo dinámico basado en geosimulación nos da mayores ventajas sobre los puntos antes señalados.

5.2. Modelo basado en redes neuronales.

Las Redes de Neuronas Artificiales (RNA) se han hecho muy populares debido a la facilidad en su uso, implementación y su habilidad para aproximar cualquier función matemática. Las Redes de Neuronas Artificiales, con su marcada habilidad para obtener resultados de datos complicados e imprecisos, pueden utilizarse para extraer patrones y detectar tramas que son muy difíciles de apreciar por humanos u otras técnicas computacionales.

Una de las definiciones que se estima más certera de Red de Neuronas Artificiales es la siguiente: “Las redes neuronales son conjuntos de elementos de cálculo simples, usualmente adaptativos, interconectados masivamente en paralelo y con una organización jerárquica que le permite interactuar con algún sistema del mismo modo que lo hace el sistema nervioso biológico”.¹⁹⁷

Su aprendizaje adaptativo, auto-organización, tolerancia a fallos, operación en tiempo real y fácil inserción dentro de la tecnología existente, han hecho que su utilización se haya extendido en áreas como: la biológica, financiera, industrial, medio ambiental, militar, salud, etc. Estas funcionan en aplicaciones que incluyen identificación de procesos, detección de fallos en sistemas de control, modelación de dinámicas no lineales, control de sistemas no lineales y optimización de procesos.

En general, se puede encontrar que una Red de Neuronas Artificiales se suele caracterizar por tres partes fundamentales: la topología de la red, la regla de aprendizaje y el tipo de entrenamiento.

El término red neuronal se aplica a una familia de modelos, que relaciona de manera aproximada variables, se caracteriza por un gran espacio de parámetros y una estructura flexible y que proviene de los estudios sobre el funcionamiento del cerebro. Conforme fue creciendo la familia, se diseñó la mayoría de los nuevos modelos para aplicaciones no biológicas, aunque gran parte de la terminología asociada refleja su origen.

En este caso lo que se trató de explicar es el comportamiento de los accidentes en función de la variable de flujo vehicular por minuto o aforo vehicular, lo que se realizó con una red neuronal fue ajustar una función que nos describa el comportamiento de los accidentes en función del

¹⁹⁷ Anderson James A., “Redes Neuronales”, Alfa Omega Grupo Editorial, México, Agosto 2008.

aforo vehicular. Este procedimiento nos permite incorporar una cantidad innumerable de variables que tengan relación con la que vamos a predecir.

Para realizar este cálculo se utilizó el software SPSS, ocupando el método de perceptron multicapa, el procedimiento Perceptron multicapa (MLP) generó un modelo predictivo para una o más variables dependientes (de destino) basada en los valores de las variables predictivas, los resultados de este cálculo se muestra en la tabla 5.4.

Los datos iniciales con los cuales se realizó el cálculo son los siguientes:

Intersección	Calle 1	Calle 2	2005	Aforo vehicular
1	Av. Insurgentes Norte	Eje 5 Norte Av. Montevideo	18	50
2	Av. Insurgentes Norte	Av. Acueducto de Guadalupe	17	45
3	Av. Insurgentes Norte	Eje 4 Norte Av. Euzkaro	19	40
4	Av. Insurgentes Norte	Av. Ticoman	16	20
5	Av. Insurgentes Norte	Av. Ferrocarril Industrial (Clave)	10	15
6	Av. Insurgentes Norte	Circuito Interior	11	25
7	Av. Insurgentes Norte	Poniente 112	11	15
8	Av. Insurgentes Norte	Fortuna	6	10
9	Av. Insurgentes Norte	Av. Cuitlahuac	4	9
10	Av. Insurgentes Norte	Moctezuma	3	10
11	Av. Insurgentes Norte	Tenochtitlan	3	8
12	Av. Insurgentes Norte	Excelsior	4	7
	Total de accidentes en los cruces		122	254

Tabla 5.4. Información de accidentes de tránsito relacionados al aforo vehicular.¹⁹⁸

¹⁹⁸ Elaboración propia.

Los resultados obtenidos del software SPSS fueron los siguientes:

Multilayer Perceptron

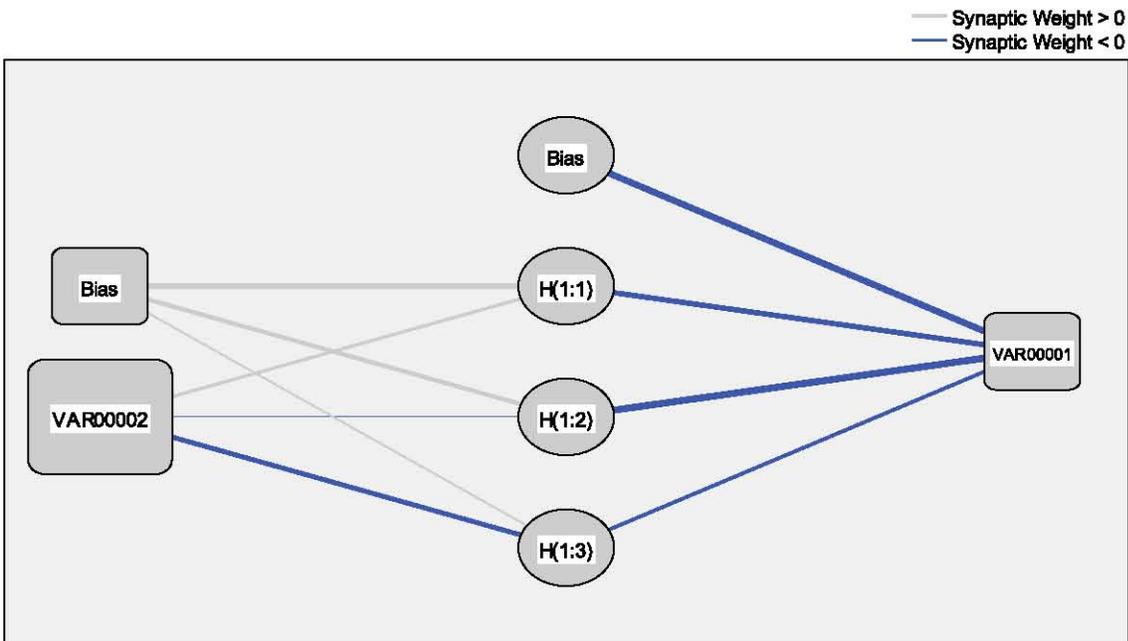
Case Processing Summary

		N	Percent
Sample	Training	8	88.9%
	Testing	1	11.1%
Valid		9	100.0%
Excluded		0	
Total		9	

Network Information

Input Layer	Covariates	1	VAR00002
		Number of Units ^a	1
Hidden Layer(s)		Rescaling Method for Covariates	None
		Number of Hidden Layers	1
		Number of Units in Hidden Layer 1 ^a	3
		Activation Function	Hyperbolic tangent
Output Layer	Dependent Variables	1	VAR00001
	Number of Units		1
	Rescaling Method for Scale Dependents		Standardized
	Activation Function		Identity
	Error Function		Sum of Squares

a. Excluding the bias unit



Hidden layer activation function: Hyperbolic tangent

Output layer activation function: Identity

Model Summary

Training	Sum of Squares Error	1.794
	Relative Error	.512
	Stopping Rule Used	1 consecutive step (s) with no decrease in error ^a
	Training Time	0:00:00.000
Testing	Sum of Squares Error	4.435E-8
	Relative Error	. ^b

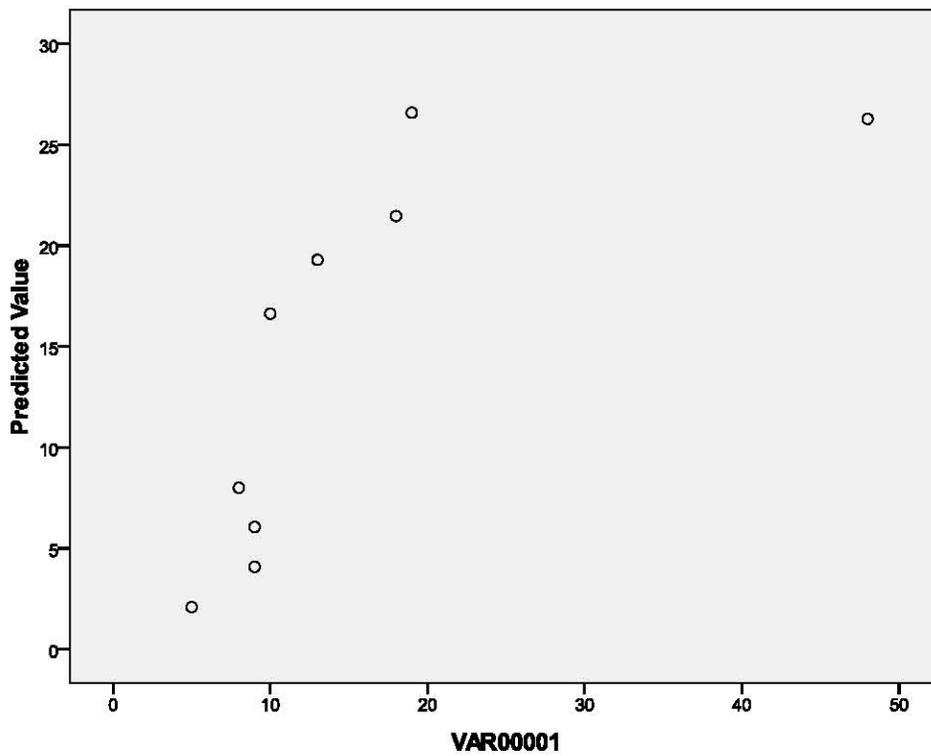
Dependent Variable: VAR00001

a. Error computations are based on the testing sample.

b. Cannot be computed. The dependent variable may be constant in the testing sample.

Parameter Estimates

Predictor		Predicted			
		Hidden Layer 1			Output Layer
		H(1:1)	H(1:2)	H(1:3)	VAR00001
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



Los resultados pronosticados utilizando la red neuronal se muestran en la tabla 5.5, como se puede ver los valores son aproximados a los reales aunque en situaciones en donde existan picos este comportamiento no se refleja.

Intersección	Calle 1	Calle 2	2005	Aforo vehicular	Valores pronosticados
1	Av. Insurgentes Norte	Eje 5 Norte Av. Montevideo	18	50	26
2	Av. Insurgentes Norte	Av. Acueducto de Guadalupe	17	45	23
3	Av. Insurgentes Norte	Eje 4 Norte Av. Euzkaro	19	40	20
4	Av. Insurgentes Norte	Av. Ticoman	16	20	10
5	Av. Insurgentes Norte	Av. Ferrocarril Industrial (Clave)	10	15	8
6	Av. Insurgentes Norte	Circuito Interior	11	25	13
7	Av. Insurgentes Norte	Poniente 112	11	15	8
8	Av. Insurgentes Norte	Fortuna	6	10	5
9	Av. Insurgentes Norte	Av. Cuitlahuac	4	9	5
10	Av. Insurgentes Norte	Moctezuma	3	10	5
11	Av. Insurgentes Norte	Tenochtitlan	3	8	4
12	Av. Insurgentes Norte	Excelsior	4	7	4
Total de accidentes en los cruces			122	254	130

Tabla 5.5. Estimación de datos de acuerdo con la red neuronal.¹⁹⁹

Los resultados obtenidos a través de este procedimiento fueron los siguientes:

- a. Se pronosticaron los valores de los accidentes a través del ajuste o de la obtención de una ecuación no lineal, que relaciona el comportamiento de estos con algunas variables dependientes.
- b. Se entiende el comportamiento del número de accidentes, en función del comportamiento de sus variables.
- c. Los análisis son a un nivel de agregación a nivel global, es decir, no se analiza cada factor que origina el fenómeno.
- d. Todo el análisis se realiza en función de repetir el patrón del comportamiento de las variables dependientes.
- e. El número de accidentes de tránsito depende de los valores de las funciones independientes, se basa en el principio de causa – efecto.

¹⁹⁹ Elaboración propia.

- f. La variable de tiempo es considerada de manera lineal, es decir, con periodos de tiempo fijos.
- g. No se requiere de gran capacidad de cómputo para resolver el modelo.
- h. La curva de aprendizaje es muy vertical es decir no se requiere de mucho tiempo para aprender a manejar software que resuelven este tipo de modelos.

5.3. Comparación de las características de los modelos basados en geo estadística con respecto a los que utilizan redes neuronales.

Haciendo una comparación de las principales características de los dos modelos vistos en los puntos anteriores, elaboramos la tabla 5.6 en la cual se analizan las diferencias.

Característica	En el estudio de los accidentes de tránsito	
	Basado en SIG y geo estadística	Redes Neuronales
Tipo de modelos a resolver.	De cualquier proceso, que tenga información espacial.	De cualquier proceso que involucre información sobre las variables que lo generan.
Datos requeridos.	De los accidentes producidos y variables que se relacionan con el, todos con referencia espacial, para poder representarlos en un SIG.	Históricos de entrada y salida, de los accidentes producidos y de las variables que se relacionen con la generación de estos.
Nivel de datos.	A nivel macro, no tenemos la información a detalle de cada uno de sus elementos que se presentan en este.	Depende del nivel de agregación de las variables que se utilizan para la predicción del comportamiento.
Representación gráfica del modelo.	A través de los SIG se puede visualizar la información tanto de los datos de entrada como de salida y en graficas en dos o tres dimensiones.	A través de gráficas de varias dimensiones se pueden visualizar tanto los datos de entrada como de salida, así como la representación de la ecuación resultante. No se tiene una representación espacial del fenómeno o proceso.
Representación del tiempo.	Se puede analizar la variable de tiempo a través de estados estáticos del fenómeno o proceso, al inicio y al final del periodo.	Se introduce como una variable más en la generación de la ecuación utilizada para predecir el comportamiento del proceso.
Resultado del método.	Nos determina los valores de la cantidad de accidentes por ubicación.	Nos proporciona una ecuación en la cual nos da el número de accidentes producidos en función de las variables que se consideraron en su calculo.
Función de los SIG.	Se utilizan para la georeferenciación de los accidentes así como para determinar las zonas en las cuales ocurren estos.	No se utilizan.
Software requerido para resolverlo.	Regularmente cualquier SIG tienen un modulo de geo estadística que realizara de manera muy sencilla los análisis espaciales básicos en puntos determinados, entre ellos están: ArcGis, MapInfo y de código libre GRASS.	Cualquier software de manejo de datos estadísticos como SPSS, MiniTab, etc., tienen un modulo para hacer proyecciones tomando como base las redes neuronales.
Dificultad para resolver la proyección con software.	Muy sencillo, no se requiere una capacitación especial para poderlo resolver.	Muy sencillo, no se requiere una capacitación especial para poderlo resolver.
Variaciones que se pueden realizar en el modelo con el fin de analizar su comportamiento.	Se pueden introducir otras variables que tengan información espacial y relacionarlas con el fin de poder deducir comportamientos.	Se pueden hacer modificaciones en las variables que generaron la ecuación que sirve para predecir los accidentes, las cuales nos muestran sus efectos sobre estos.

Tabla 5.6. Comparación de los métodos de proyección utilizando geo estadística y redes neuronales.²⁰⁰

²⁰⁰ Elaboración propia.

5.4. Modelo basado en la geosimulación.

En esta sección, se muestra a detalle cómo se elaboró y cómo funciona el modelo de accidentes de tránsito basado en la técnica denominada geosimulación y de manera específica en la de simulación basada en agentes; este modelo es la herramienta principal, que forma parte de la metodología, que se utilizó para demostrar las ventajas de representar un ambiente vial, con el objeto de reducir los accidentes de tránsito, mediante la utilización de un modelo dinámico.

En este punto se describen los pasos que se llevaron a cabo para el diseño y elaboración de un modelo basado en geosimulación, utilizando la técnica de simulación basada en agentes. Como en los modelos anteriores, se representó el corredor de la Avenida Insurgentes Norte, en la figura 5.9 se visualiza los límites que se consideraron en el caso de estudio, que son de la terminación de la Autopista México Pachuca hasta el metro Indios Verdes.

La Avenida Insurgentes Norte, en el tramo descrito en este estudio, es una de las principales vías de acceso desde los Municipios del Estado de México al Distrito Federal; esto ocasiona que durante las primeras horas del día existan niveles elevados de tráfico, entendiéndolo en función de la densidad de vehículos, lo que trae como consecuencia que debido a esta, suceda una mayor cantidad de accidentes, esto de acuerdo con cifras oficiales como se mencionó previamente.

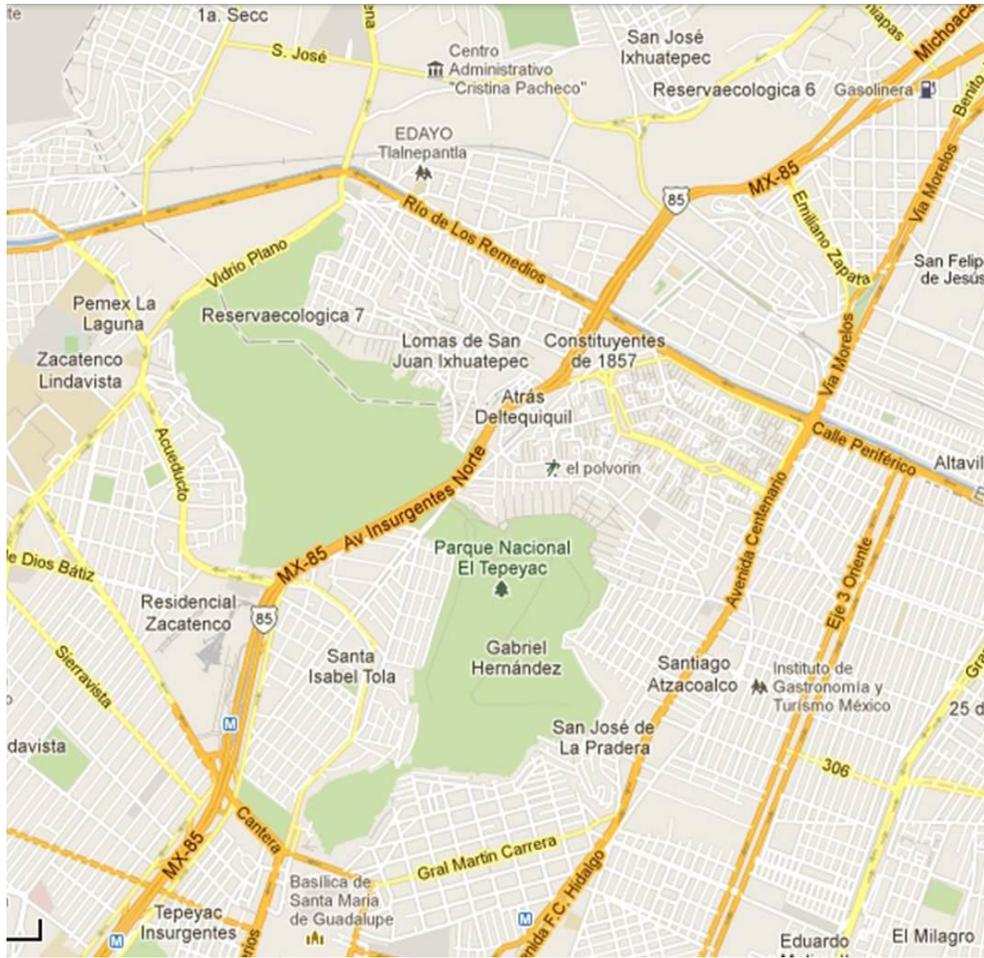


Figura 5.9. Zona del corredor Insurgentes Norte a modelar.²⁰¹

La metodología utilizada para el desarrollo del modelo fue de diseño propio y para su elaboración se tomó como base la desarrollada por el Doctor Walid Ali²⁰², el cual en su proyecto de tesis nos da como aportación una metodología para desarrollar modelos multi agentes de dos y tres dimensiones; se siguieron algunos de los pasos generales que nos propone, debido a que en su metodología no detalla el cómo hacer la programación del modelo; esa fue una de nuestras aportaciones.

Se describe primeramente, la forma en cómo se virtualizó la situación real de este corredor, la cual nos ayudó a entender el comportamiento de cada uno de los elementos que lo forman y su

²⁰¹ Google Maps, <https://www.google.com.mx/maps/@19.5068908,-99.0979626,14z>, (Consultado Mayo, 2013).

²⁰² Wald Ali, *2D/3D MultiAgent GeoSimulation, the case of shopping behavior in square one mal (Toronto)*, (Germany: VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken, 2008).

interacción con su medioambiente; el modelo se describió utilizando la metodología llamada “El Proceso Unificado de Desarrollo de Software” y haciendo uso del lenguaje unificado de modelación (UML), esto para representar cada una de sus funcionalidades. Por último, se desarrolló un módulo en el programa de cómputo Traffix, el cual fue la base del modelo; este nos cuantifica la cantidad de accidentes en un determinado periodo de tiempo y se hizo en el lenguaje de programación Java, posteriormente se realizó la calibración y validación del modelo. Se realizaron una serie de pruebas con el fin de contrastarlo con la realidad, obtener y analizar el tipo de información que genera y su comparación con la generada por los otros modelos.

5.4.1. Características del modelo basado en agentes.

Antes de proceder a la elaboración del modelo se explican sus diferentes componentes y características que debe de tener así como las de nuestro modelo, las cuales son incluidas en este.

La estructura de un modelo basado en agentes está compuesta por actividades de los agentes que interactúan entre sí y con su medioambiente, las cuales son conocidas. Estos modelos suelen ser considerados como constitutivos de un laboratorio en miniatura donde los atributos y el comportamiento de los agentes y del medioambiente en el que se alojan, se puede alterar y las repercusiones pueden ser observadas durante varias corridas de simulación. La capacidad de simular las acciones individuales de muchos agentes diferentes y medir el comportamiento del sistema resultante y los resultados en el tiempo (por ejemplo, cambios en los patrones de salida de urgencia para peatones), significa que los modelos basados en agentes pueden ser herramientas útiles para el estudio de los efectos sobre los procesos que operan a múltiples escalas y niveles de organización.

Las cinco características que se incluyeron en los modelos son las siguientes: 1. el propósito del modelo, 2. la dependencia del modelo de la teoría, 3. la representación de los agentes y sus dinámicas, 4. calibración, validación y verificación del modelo frente a la teoría y los datos reales, y 5. el desarrollo del modelo en forma operativa a través de un programa de cómputo.²⁰³

²⁰³ Andrew Crooks, Christian Castle, And Michael Batty, “Key Challenges in Agent-Based Modelling for Geo-Spatial Simulation”, Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), University College London, (Mayo 2013): 1-10.

a. Propósito del modelo.

Es frecuente que en la modelación basada en agentes, el propósito real y la posición en este sea clara, en gran parte debido a las concepciones cambiantes de la forma de hacer ciencia y también al hecho de que modelos basados en agentes se ocupan de sistemas complejos, de composición abierta, por lo tanto, emergentes y presenten la novedad y la sorpresa. Sin embargo, un modelo es tan útil como la finalidad para la que fue construido y para el modelo basado en agentes. Un modelo tiene que ser construido en el nivel adecuado para la descripción de cada fenómeno, el detalle de este depende para lo que el modelo va a servir, depende de su propósito. Esto sigue siendo más un arte que una ciencia. El propósito del modelo basado en agentes va desde los motivos de predicción hasta la prescripción.

El modelo que se elaboró en este trabajo es un modelo que involucra los elementos principales de un ambiente vial (de acuerdo con las principales definiciones y teorías que fueron estudiadas en el capítulo dos): vehículos, conductores y vías, y algunos elementos del ambiente como los semáforos, las variaciones en la cantidad del flujo vehicular durante el trayecto de la vía en estudio y sus pendientes; el propósito de este fue mostrar la manera en cómo está constituido, las partes de que se forma, la metodología que se utiliza para su elaboración, el tipo de información que nos proporciona y sus ventajas frente a otros tipos de modelos, a los que hemos denominado tradicionales, y que servirá para tomar acciones para reducir el número de accidentes de tránsito; este último modificando los diferentes factores que influyen en la generación de estos. Este modelo no incluye a detalle todos los componentes a detalle de que está formado un ambiente vial, pero consideramos que se incluyen los más importantes, el incluir más detalles se sugiere para futuros trabajos.

b. Teoría y Modelo.

Los modelos deben basarse en la teoría y el papel tradicional de un modelo, es como una traducción de la teoría, en una forma mediante la cual puede ser probada y refinada. En este sentido, un modelo de computadora ofrece un laboratorio para la experimentación virtual, y por lo tanto, un vehículo para refinar la teoría a través de experimentos de tipo "qué pasaría si". De hecho, como método científico se ha ido difuminando de esta tradición clásica, luego cada vez más modelos, como los basados en agentes se están utilizando para desarrollar la teoría o contrastarla. Sin embargo, nuestra preocupación aquí es que las implicaciones teóricas de muchos

modelos basados en agentes permanecen implícitas y ocultas, a menudo cubiertas por un espeso velo de hipótesis específicas sobre la estructura y el proceso, así como una capa de interfaz de software. En muchos modelos, es difícil de averiguar para qué sirven, ya que son simplemente aplicaciones adicionales de algún tipo de estructura simple, que es ajustado para el contexto local y la aplicación. El conocimiento del dominio es a menudo insuficiente y cada vez más modelos basados en agentes se encuentran en período considerado como genérico, independiente de cualquier campo o aplicación en particular, y por lo tanto sujetos a usarlos para cualquier propósito que se plantean de una manera específica. En resumen, las normas científicas del pasado están enterradas en el desarrollo de un modelo acorde a los requerimientos específicos.

El modelo elaborado en este trabajo, se basó en los comportamientos de los elementos que intervienen en un ambiente vial, los que de acuerdo con las teorías revisadas, las que se consideran como los más influyentes en la generación de los accidentes; estos comportamientos se basan en la teoría expuesta en los primeros capítulos y en las funciones de cada una de las clases que nos proporciona la plataforma de desarrollo Traffix, la información con que se alimentó al modelo fue obtenida directamente de campo y otra proporcionada por una Empresa de consultoría, la cual realizó un levantamiento de información vial para el diseño del sistema de metrobús en la zona; el comportamiento del modelo con respecto a la teoría y la realidad se analiza más adelante en la sección de verificación y calibración; podemos adelantar que el modelo que estamos presentando simula el comportamiento de cada uno de sus elementos que lo forman, de acuerdo con la teoría y lo más importante, estos concuerdan con la realidad, se realizaron algunas pruebas, las cuales se explican más adelante, para contrastarla.

c. Representación, Agregación y Dinámica del Agente.

En los sistemas espaciales, lo que constituye un agente es un tema crítico, en el que se aplicó el término a cualquier agrupación de objetos en cualquier escala espacial y a través de diferentes horizontes temporales. Además, no se limitan necesariamente a los objetos humanos pero podría pertenecer a cualquier objeto que existe en el espacio y/o el tiempo. Una definición un poco más restrictiva de los agentes ha sido adoptada en algunos modelos espaciales y nos adherimos a esta, en que consideramos modelos basados en agentes espaciales para hacer frente a los agentes que tienen algún tipo de movilidad. Los agentes que no se mueven como autómatas celulares no se definen como agentes en este contexto. La escala de los agentes es también un problema como el

más fino de la escala, menos ambigua la definición, aunque somos conscientes de que esto es discutible. Esto significa que hay mayores dificultades para especificar las reglas para la definición de los agentes que son agrupaciones de unidades de nivel inferior, es decir, grupos dentro de una población humana, o la definición de los agentes genéricos, como los bosques o un agricultor o una ciudad que se refieren a los modelos que en sí mismas son de carácter genérico. En particular, a medida que se agregan, sin darse cuenta que puede cambiar los tipos de procesos que permiten a los agentes, los tipos de movilidad intrínseca a su ubicación y la escala a la que existen. A medida que se agregan, es más y más difícil de definir los procesos pertinentes; éstas también son agregaciones de rutina de bajo nivel y los comportamientos. Otro aspecto a considerar es el gran número de agentes y el gran número de atributos y procesos que están comprometidos. Por otra parte, las opciones son necesarias en términos del número de agentes y procesos que se reflejan en el software utilizado, el tiempo de cálculo involucrado, y por supuesto la capacidad de obtener datos que coinciden con el nivel de especificación del modelo. En general, la mayoría de los modelos basados en agentes, se analiza una fracción de los datos que se podría aplicar a ellos en que muchos de los supuestos implícitos acerca de los comportamientos no pueden ser probados cuando los datos no existen.

El comportamiento de cada uno de los agentes que se incluyen en este modelo, fueron tomados de la plataforma de desarrollo Traffix; esta plataforma ya tiene definido cada uno de estos a través de sus clases, todas hechas en el lenguaje de programación Java, lo que nos da la facilidad de poder modificar estas características o crearles nuevas capacidades; en este modelo los agentes principales son los conductores que le dan el movimiento a cada vehículo y los mismos son los que tienen el movimiento a través de todo el sistema; existen otros agentes como los semáforos, los cuales no tienen movimiento, pero su desempeño es de suma importancia para el ambiente vial, todos los agentes del sistema tienen características a escala real, por lo que hacen que el modelo cumpla con la segunda característica. A este programa se le agregó un módulo que es el que nos define el momento en que sucede un accidente, que es cuando dos vehículos tocan un mismo punto.

d. Calibración, Verificación y Validación.

La calibración consiste en perfeccionar el modelo en un contexto particular y esto significa el establecimiento de un conjunto único de parámetros de las dimensiones del modelo al contexto

local. Esta no es la validación de la calibración, pero a menudo puede implicar la validación ya que los parámetros se eligen para que el rendimiento de este modelo sea óptimo, de alguna manera, en términos de algún criterio de bondad de ajuste, por ejemplo. Esta es un área grande y basta con decir, muchos, si no la mayoría de los modelos basados en agentes adolecen de una falta de unicidad en la estimación de parámetros en esta etapa. La calibración del modelo fue posible realizarla a través del movimiento de algunos parámetros que fueron estimados, como el nivel de distracción del conductor y los porcentajes a rebasar al vehículo de enfrente, con el movimiento de estos parámetros se logró que la salida de nuestro modelo fuera más cercana al número de accidentes reales; sin embargo, no lo hicimos, porque consideramos que este porcentaje de diferencia se debe a factores que no se incluyeron en el modelo y deben de ser investigados e incluidos para lograr una mejor aproximación.

La verificación se refiere a las pruebas de la lógica del modelo a través de su programa de computadora. Se trata de comprobar que el modelo se comporta como se espera, lo que se refiere a menudo como la "validez interna" del modelo. La validación se refiere a la medida en que representa adecuadamente el sistema que se modela y en este sentido, se trata de la bondad de ajuste del modelo a los datos. Sin embargo, la validez de un modelo no debe ser pensado como un binario (es decir, un modelo no sólo puede ser clasificado como válido o no válido), un modelo puede tener un cierto grado de validez. La validez puede determinarse mediante la comparación de la salida del modelo con datos comparables recopilados a partir de un sistema del mundo real. Por ejemplo, para entender la salida de un modelo basado en agentes a menudo es necesario para evaluar los detalles de la "historia" de una simulación específica. Se han expresado preocupaciones relativas a la verificación y la validación por parte de numerosos investigadores (por ejemplo, Batty y Torrens, 2005; Parker, 2002). Batty y Torrens (2005) escriben que con respecto a los modelos tradicionales de desarrollo, dos normas se han tomado como central en el proceso de diseño de modelos de las ciencias sociales. El primero es el que sugiere que un mejor modelo es aquel que puede explicar el mismo fenómeno con un menor número de construcciones intelectuales. El segundo principio se refiere a la independencia en su verificación. Una teoría que se induce mediante un conjunto de datos debe ser validado en contra de otro grupo independiente. Aunque a veces es posible lograr esto con los modelos tradicionales, este no es el caso de los modelos desarrollados usando principios de modelos basados en agentes, en particular cuando se trata de sistemas humanos que evolucionan con el tiempo. Modeladores están

adoptando estructuras de modelos cada vez más diversas y ricas que contienen un gran número de parámetros. A menudo, con los modelos tradicionales, que era la vinculación de las variables dependientes e independientes, mientras que modelos basados en agentes tienen múltiples causas que muestran la heterogeneidad de los procesos que son imposibles de observar en su totalidad (Batty y Torrens, 2005). Así, con estos nuevos modelos de estructuras no es probable que se validen en su totalidad los datos, sino que son demasiado ricos y los datos necesarios para probar demasiado pobres (Batty, 2006). La verificación se logró al comparar que los parámetros principales que describen a un sistema vial, como son: flujo vehicular, velocidades, densidad de vehículos, etc., se comportan de la misma manera que nuestro modelo; esto se hizo corriendo el modelo durante un periodo determinado de tiempo y comparando el comportamiento de estos parámetros con los reales, los cuales correspondieron. Estas pruebas se alimentaron de los datos reales del ambiente que se simuló y de los cuales se pudo disponer.

Una vez que se realizó la verificación y la calibración del modelo podemos decir que el modelo es válido, ya que su comportamiento es similar al de un sistema vial y su salida es posible ajustarla para representar el número de accidentes muy similar a los reales.

e. Modelado Operacional.

En cuanto a la modelación basada en agentes como en otras áreas de la simulación y la representación, en el software genérico se han desarrollado diversas herramientas que permiten a los modeladores adaptar su contexto del problema con el programa en cuestión, la aplicación de su modelo a través de secuencias de comandos de alto nivel permite que pueda ser modelado con este tipo de herramientas. Esto abre los modelos para una amplia comunidad de investigadores que hasta ahora no lo habían hecho, también obliga a los modeladores sin los conocimientos o recursos para desarrollar sus propios modelos a partir de cero. Sin embargo, el desarrollo de modelos basados en agentes puede ser facilitado mediante el uso de sistemas de simulación / modelización (por ejemplo, Repast, NetLogo, OBEUS). Se proporcionan plantillas confiables para el diseño, ejecución y visualización de modelos basados en agentes, lo que permite que los modeladores se centran en la investigación (es decir, la construcción de modelos), en lugar de construir las herramientas fundamentales necesarias para ejecutar una simulación por ordenador. En particular, el uso de kits de herramientas ayudan a reducir el tiempo de los modeladores frente a tener que desarrollar sus propios códigos de programación (por ejemplo, una interfaz de usuario

gráfica (GUI), los datos de importación y exportación, la visualización / pantalla de la modelo). También aumenta la fiabilidad y la eficiencia del modelo, ya que las piezas complejas se han creado y optimizado por los desarrolladores profesionales, como la simulación estándar / funciones de modelado. Además, la programación orientada a objetos permite la integración de la funcionalidad adicional de las bibliotecas no proporcionado por el kit de herramientas de simulación / modelado, ampliando las capacidades de estas herramientas. De particular interés es la integración de la funcionalidad de las bibliotecas de software SIG (por ejemplo, OpenMap, GeoTools, ArcGIS de ESRI, etc.), que proporcionan herramientas de modelación basada en objetos con una mayor gestión de datos espaciales y la capacidad analítica necesaria para modelación geoespacial.²⁰⁴ Existen herramientas de código abierto como es el programa que utilizamos, el cual fue desarrollado sobre la plataforma Repast, el cual nos proporciona módulos para el diseño de este tipo de modelos, el problema que tiene este tipo de programas es la falta de documentación y como consecuencia el tiempo para aprenderlo.

En este caso el modelo operacional se realizó utilizando como base la plataforma de desarrollo Traffix, la cual nos proporciona la plantilla de clases para el armado de modelos de ambientes viales basados en agentes; esta herramienta fue elaborada con el software Repast 3 y les llevo a un grupo de 30 investigadores su desarrollo en un tiempo de 3 años, apoyados por el gobierno de Hungría y la Empresa AITIA, S.A. de C.V. El modelo que se elaboró contiene los elementos fundamentales para representar un sistema vial, de acuerdo con el enfoque que se está utilizando, que es el de la Organización Mundial de la Salud, que cumple con el comportamiento de sus elementos de acuerdo con la teoría y parámetros reales de estos (en la sección 5.4.5 se contrasta esto con los resultados de la calibración y validación) y nos permite tener un laboratorio para entender y solucionar problemas de ambientes viales.

²⁰⁴ Andrew Crooks, Christian Castle, And Michael Batty, "Key Challenges in Agent-Based Modelling for Geo-Spatial Simulation", Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), University College London, (Mayo 2013): 1-10.

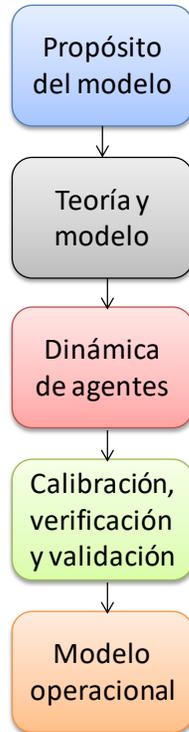


Figura 5.10. Características que debe de tener un modelo basado en agentes.²⁰⁵

5.4.2. Virtualización de la situación real.

En esta sección se describe la forma en cómo se representó la situación real en la cual se desarrollan los accidentes de tránsito desde una forma virtual, es decir, cómo se simuló este ambiente mediante la utilización de la técnica de geosimulación llamada modelación basada en agentes, elaborada usando los principios de la programación orientada a objetos.

Primero se analizó la información que tuvimos disponible para que a partir de esta, de las teorías revisadas en los capítulos previos y los comportamientos de los objetos que nos ofrezca la plataforma de desarrollo Traffix y sus modificaciones necesarias, elaborar el modelo virtual.

Para poder elaborar un modelo basado en agentes se necesitó como información inicial datos sobre el comportamiento de todos los elementos que intervienen en el sistema y cada una de estas para diferentes zonas, el tipo de información que se utilizó fue la siguiente:

Vehículos.- Velocidades máximas y mínimas, desaceleraciones máximas y mínimas, tipos de vehículos, distancias entre los vehículos y aforo vehicular en determinadas horas.

²⁰⁵ Elaboración propia.

Semáforos.- Ubicación física, tiempos de duración de cada una de las luces y sincronización de tiempos entre los semáforos involucrados.

Conductores.- Tipos de conductores existentes, propensión a: cambiarse de carril, respetar los semáforos, decidir si irse por caminos cerrados o por el camino más corto.

Vía.- Condiciones de la carretera en cuanto al número de carriles, el efecto de este sobre los accidentes no se están considerando.

Aforos vehiculares.- Cantidad de vehículos por unidad de tiempo que pasan por una determinada parte de la vía en estudio.

Pendiente de la vía.- Esto se refiere a las diferentes subidas y bajadas que tiene la vía, las cuales se representaron por el incremento en los niveles de aceleración y desaceleración, cuando los vehículos pasan por estas.

Situaciones específicas que suceden en la vía.- En esta parte se incluyen paradas en lugares no planeados del transporte público.

Hasta este punto son los elementos que se consideraron en el modelo desarrollado y son los que nos dice la teoría que, en su mayor parte, son los que provocan los accidentes de tránsito; existen otros factores adicionales que se pueden incluir a través de la programación de los elementos, como son:

Condiciones ambientales.- Periodos y horarios de lluvia o nieve que pudieran afectar el comportamiento de los vehículos que pudieran ocasionar accidentes.

Situaciones específicas.- Condiciones de cada lugar que pudieran causar accidentes, obstáculos que limitan la visibilidad en algunas avenidas, incremento en la cantidad de tipos de vehículos, paradas de los vehículos públicos en dobles o triples filas, reflejo del sol la cual afecta la visibilidad de los conductores, el efecto de la carretera sobre las llantas, etc.

Para generar este tipo de modelos la información real que se utilizó fue necesaria recopilarla en campo y esta cambiara de manera permanente dependiendo de la zona a modelar, se visitó el lugar y se recopiló la información sobre el comportamiento de cada uno de los elementos antes descritos. También se utilizó información de algunas variables como el flujo vehicular y

velocidades de una Empresa de Consultoría, la cual realizó en meses recientes algunos estudios para la implementación de un proyecto de transporte colectivo Metro Bus en la zona, esta nos fue proporcionada como apoyo para el desarrollo del proyecto.

La manera en cómo se virtualizó la situación real de acuerdo con la información disponible y las teorías de los accidentes fue la siguiente:

1. Elementos pasivos.

Los elementos pasivos considerados en este modelo fueron:

- a. La vía, sobre la cual circulan los vehículos, está formada de 4 carriles y en este modelo no tiene ningún efecto sobre el desempeño de los vehículos de manera individual, pero desde la perspectiva de conjunto esta situación permite que debido al número de carriles se tenga una alta densidad vehicular.
- b. Semáforo: estos están en posiciones fijas y se alimentan de la información real de sus tiempos para funcionar, se programan de acuerdo con sus tiempos reales de operación.
- c. Pendiente de la vía: su efecto se ve sobre el incremento de la aceleración y desaceleración de los vehículos.
- d. Flujo vehicular, el cual se mide por el número de vehículos por unidad de tiempo, este depende de la cantidad de carriles en cada zona y de las velocidades de cada uno de estos.

2. Elementos activos.

Los elementos activos considerados en el modelo basado en agentes y sus principales funciones son los siguientes:

- a. Vehículo, las variables de los vehículos son las siguientes:
 - I. La cantidad de vehículos que ingresan en la vía dependen del aforo vehicular que nosotros le designemos, este valor nosotros se lo proporcionamos como una cantidad fija la cual podemos variar y es una de las que afectan en la cantidad de accidentes producidos.
 - II. El tipo de vehículo, en este caso tenemos cuatro tipos diferentes y cada uno de estos entra en el sistema de acuerdo con una función de valores aleatorios entre

uno y cuatro y dependiendo de este número es el tipo de vehículo que ingresara. Este tipo de vehículo va de acuerdo con su velocidad principalmente, de acuerdo con la cual los podemos clasificar en vehículos estándar, vehículos lentos, vehículos de carga y de pasajeros o transporte público.

- III. Las características físicas de cada tipo de vehículo tiene dimensiones definidas fijas y así como sus colores, la asignación de estos depende de la función de valores aleatorios. Con el fin de complementar el modelo el número de vehículos se deben de incrementar, así como definir una función de distribución de probabilidad para cada uno de estos.
- IV. El vehículo tiene la capacidad de detenerse, esta característica depende de una función de números aleatorios enteros positivos y cuando el valor es un número menor a 100 el vehículo se detiene. También cuando tiene un carro delante de él lo suficientemente cerca el vehículo tiene la facultad de poder detenerse.
- V. Cuando dos vehículos tocan el mismo punto del nodo se dice que se produce un accidente de tránsito.
- VI. Cada uno tiene una aceleración máxima y una desaceleración mínima que va en función del tipo de vehículo y de la pendiente del tramo de la avenida en la cual se encuentre.

b. Conductor, sus comportamientos son los siguientes:

- I. Se le asigna un conductor a cada vehículo, en este modelo el conductor es de un solo tipo, el número de estos depende de la cantidad de vehículos que ingresan al sistema.
- II. Los conductores son independientes es decir los comportamientos de unos no afectan a los demás.
- III. Para avanzar un conductor, antes de avanzar un tramo de carretera, primero revisa el recorrido que va a realizar y una vez que está seguro que lo puede hacer avanza.
- IV. En caso de que un vehículo se detenga frente de él, este después de cierto tiempo tiene la característica para rebasar, este tiempo es predeterminado.

- V. El conductor tiene la facultad de no respetar los altos, esto depende de una función de números aleatorios y si esta nos da un valor menor a 100 el conductor se puede pasar el semáforo. Estos son criterios que se consideraron de manera aleatoria, se tendrían que realizar mayores estudios con el fin de tener la precisión para determinar estos valores.

3. Elemento de tiempo.

Todo el modelo está regido por un tiempo común para todo el sistema el cual tiene una unidad de medida del tiempo llamado Tick, todos los movimientos y actividades de los diferentes agentes se deben de poner en función de esta unidad de tiempo.

Como todos los modelos de simulación, se tiene la ventaja de poder modelar grandes periodos de tiempo en algunos segundos o minutos.

4. Otros elementos.

Dentro del sistema, la programación orientada a objetos nos da la facilidad de poder ingresar al sistema otros elementos para hacer más complejo el sistema.

5.4.3. Descripción del modelo basado en agentes utilizando la metodología “El Proceso Unificado de Desarrollo de Software”.

El proceso unificado es un proceso de desarrollo de software que en este caso se utilizó para describir y entender a más detalle cómo está formado y cómo funciona; de esta metodología nos centramos en la descripción del sistema a través de los diagramas de casos de uso y de su arquitectura.

5.4.2.1. ¿Qué es el Proceso Unificado de Desarrollo de Software?

Un proceso define quien está haciendo qué, cuándo y cómo alcanzar un determinado objetivo. En la ingeniería de software el objetivo es construir un producto nuevo o mejorar uno existente. Un proceso efectivo proporciona normas para el desarrollo eficiente de software de

calidad. En consecuencia reduce el riesgo y hace el proyecto más predecible y entendible. Un proceso de desarrollo de software es el conjunto de actividades necesarias para transformar los requisitos de un usuario en un sistema software. Sin embargo, el proceso unificado es más que un simple proceso, es un marco de trabajo genérico que puede especializarse para una gran variedad de sistemas de software, para diferentes áreas de aplicación, diferentes tipos de organizaciones, diferentes niveles de aptitud y diferentes tamaños de proyectos.

El Proceso Unificado está basado en componentes, lo cual quiere decir que el sistema software en construcción está formado por componentes interconectados a través de interfaces bien definidas.

El Proceso Unificado utiliza el Lenguaje Unificado de Modelación (UML) para preparar todos los esquemas de un sistema software. De hecho UML es una parte esencial del Proceso Unificado – sus desarrollos fueron paralelos.

No obstante, los verdaderos aspectos definitorios del Proceso Unificado se resumen en tres fases claves: dirigido por casos de uso, centrado en la arquitectura, interactivo e incremental. Esto es lo que hace único al Proceso Unificado.

Para la descripción de este modelo se hizo en función de diagramas de casos de uso y centrado en la arquitectura, así como una referencia que se describió en función de su diagrama de clases.

Un sistema software ve la luz para dar servicio a sus usuarios. Por tanto para construir un sistema con éxito debemos de conocer lo que sus futuros usuarios necesitan y desean. En este caso lo que nuestros usuarios necesitan es poder entender, de manera dinámica, como se generan los accidentes y en función de esta información poder tomar medidas para su reducción, lo cual se cumple.

El termino usuario no solo hace referencia a los usuarios humanos sino a otros sistemas. En este sentido el término usuario representa algo o alguien (como otro sistema fuera del sistema) que interactúa con el sistema que estamos desarrollando. Un ejemplo de interacción sería una persona que utiliza un cajero automático. Él o ella inserta la tarjeta de plástico, responde a las preguntas que hace la maquina en su pantalla y recibe una suma de dinero. La respuesta a la tarjeta del usuario y a sus contestaciones, el sistema lleva a cabo una secuencia de acciones que proporcionan al usuario un resultado importante, en este caso, la retirada del efectivo.

Una interacción de este tipo es un caso de uso. Un caso de uso es un fragmento de funcionalidad del sistema que proporciona al usuario un resultado importante. Los casos de uso representan los requisitos funcionales. Todos los casos de uso juntos constituyen el modelo el cual describe la funcionalidad total del sistema; los casos de uso no son solo una herramienta para especificar los requisitos del sistema, también guían su diseño, implementación y prueba, guían el proceso de desarrollo.

Aunque es cierto que los casos de uso guían el proceso, no se desarrollan aisladamente. Se desarrollan a la vez que la arquitectura del sistema. Es decir los casos de uso guían la arquitectura del sistema y la arquitectura del sistema influye en la selección de los casos de uso.

El papel de la arquitectura del software es parecida al papel que juega la arquitectura en la construcción de los edificios, el edificio se contempla desde varios puntos de vista: estructuras, servicios, construcción de la calefacción, electricidad, etc. Esto permite a un constructor ver una imagen completa antes de que comience la construcción. Análogamente la arquitectura en un sistema de software se describe mediante diferentes vistas del sistema en construcción.

El concepto de arquitectura de software incluye los aspectos estáticos y dinámicos más significativos del sistema. La arquitectura surge de la necesidad de las empresas, como las perciben los empresarios y los inversionistas y se refleja en los casos de uso. Sin embargo, también se ve influenciada por muchos otros factores, como la plataforma sobre la que funciona el software (arquitectura hardware, sistema operativo, sistema de gestión de base de datos, protocolos para comunicaciones en red, etc.). La arquitectura es una vista del diseño completo con las características más importantes resaltadas, dejando los detalles de lado. Debido a que lo que es significativo depende en parte de una valoración que a su vez se adquiere con la experiencia, el valor de una arquitectura depende de las personas que se hayan responsabilizado de su creación. No obstante, el proceso ayuda a su arquitecto a centrarse en los objetivos adecuados, como la comprensibilidad, la capacidad de adaptación al cambio y la reutilización.

¿Cómo se relacionan los casos de uso y la arquitectura? cada producto tiene una función y una forma. Ninguna es suficiente por sí misma. Estas dos fuerzas deben de equilibrarse para obtener un producto con éxito. En esta situación la función corresponde a los casos de uso y la forma de la arquitectura. Debe de haber interacción entre los casos de uso y la arquitectura. Por un lado, los casos de uso deben de encajar en la arquitectura cuando se llevan a cabo. Por otro lado, la arquitectura debe de permitir el desarrollo de todos los casos de uso requeridos, ahora y

en el futuro. En realidad, tanto la arquitectura como los casos de uso deben de evolucionar en paralelo.

El desarrollo de un producto software supone un gran esfuerzo que debe de durar entre varios meses hasta probablemente un año o más. Es práctico dividir el trabajo en partes más pequeñas o mini proyectos. Cada mini proyecto es una interacción que resulta en un incremento. Las iteraciones hacen referencia a pasos en el flujo de trabajo, y los incrementos, al crecimiento del producto. Para una efectividad máxima, las iteraciones deben de estar controladas; esto es, deben seleccionarse y ejecutarse de una forma planificada. Es por esto que son mini proyectos.

En cada iteración, los desarrolladores identifican y especifican los casos de uso relevantes, crean un diseño utilizando la arquitectura seleccionada como guía, implementan el diseño mediante componentes y verifican que los componentes satisfacen los casos de uso. Si una iteración cumple con sus objetivos los desarrolladores deben de revisar sus decisiones previas y probar un nuevo enfoque.

Para alcanzar el mayor grado de economía en el desarrollo, un equipo de proyecto intentara seleccionar solo las iteraciones requeridas para lograr el objetivo del proyecto. Intentará seleccionar las iteraciones en orden lógico. Un proyecto con éxito se ejecutará de una forma directa, solo con pequeñas desviaciones del curso que los desarrolladores planificaron inicialmente. Por supuesto en la medida que se añadan iteraciones o se altere el orden de las mismas por problemas inesperados, el proceso de desarrollo consumirá más esfuerzo y tiempo. Uno de los objetivos de la reducción del riesgo es minimizar los problemas inesperados.

Estos conceptos –los de desarrollo dirigido por casos de uso, centrado en la arquitectura, interactivo e incremental- son de igual importancia. La arquitectura proporciona la estructura sobre la cual guiar las iteraciones, mientras que los casos de uso definen los objetivos y dirigen el trabajo en cada iteración. La eliminación de una de las partes reducirá drásticamente el valor del Proceso Unificado.²⁰⁶

²⁰⁶ Ivar Jacobson, Grady Booch y James Rumbaugh, *El Proceso Unificado de Desarrollo de Software*, Pearson Addison Wesley, (Madrid: Pearson Education, S.A. de C.V., 2000).

5.4.3.2. Diagramas de casos de uso.

Pasemos a dar ahora una visión general de cómo funciona el sistema a través del análisis de los flujos de trabajo. Nos centramos como se dijo anteriormente en los casos de uso. Los requisitos funcionales se expresaron como casos de uso.

El modelo de casos de uso ayuda al cliente, a los usuarios y a los desarrolladores a un acuerdo sobre cómo utilizar el sistema. La mayoría de los sistemas tienen muchos usuarios, cada tipo de usuario se representa mediante un actor, los actores utilizan el sistema al interactuar con los casos de uso. Todos los actores y los casos de uso del sistema forman un modelo de casos de uso, este diagrama describe parte del modelo y muestra un conjunto de casos de uso y actores con una asociación entre cada par actor/caso de uso que interactúan.

Caso general. Se muestra el comportamiento del funcionamiento del modelo. Este consiste la captura de la información real, en función de esta se diseña cada uno de los elementos, se cargan estos elementos en el modelo, se ejecuta de tal forma que todos los elementos interactúen y finalmente se generen los resultados de este proceso.

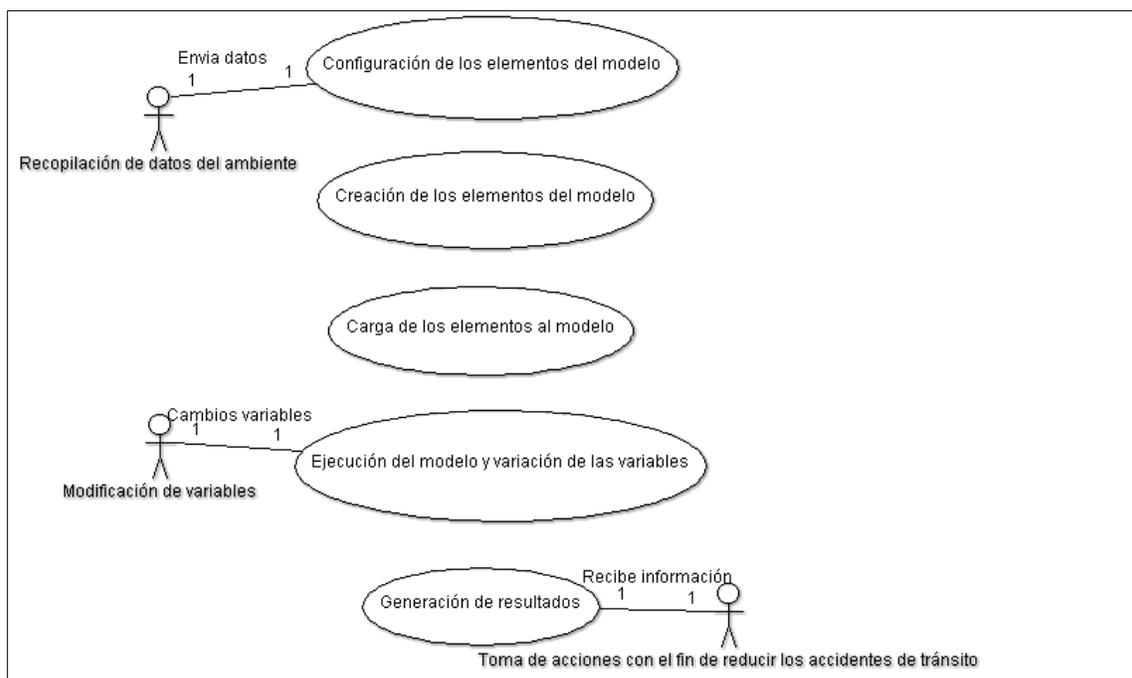


Figura 5.11. Caso de uso general del modelo basado en agentes sobre la prevención de accidentes de tránsito.²⁰⁷

²⁰⁷ Elaboración propia.

Configuración de los elementos del modelo. El primer paso para generar el modelo fue la obtención de la información en campo; una vez que se obtuvo fue necesario diseñar cada uno de los elementos que se observarían con los valores obtenidos, la información que utiliza el modelo como insumo principal hace que este modelo se esté calibrando con información real.

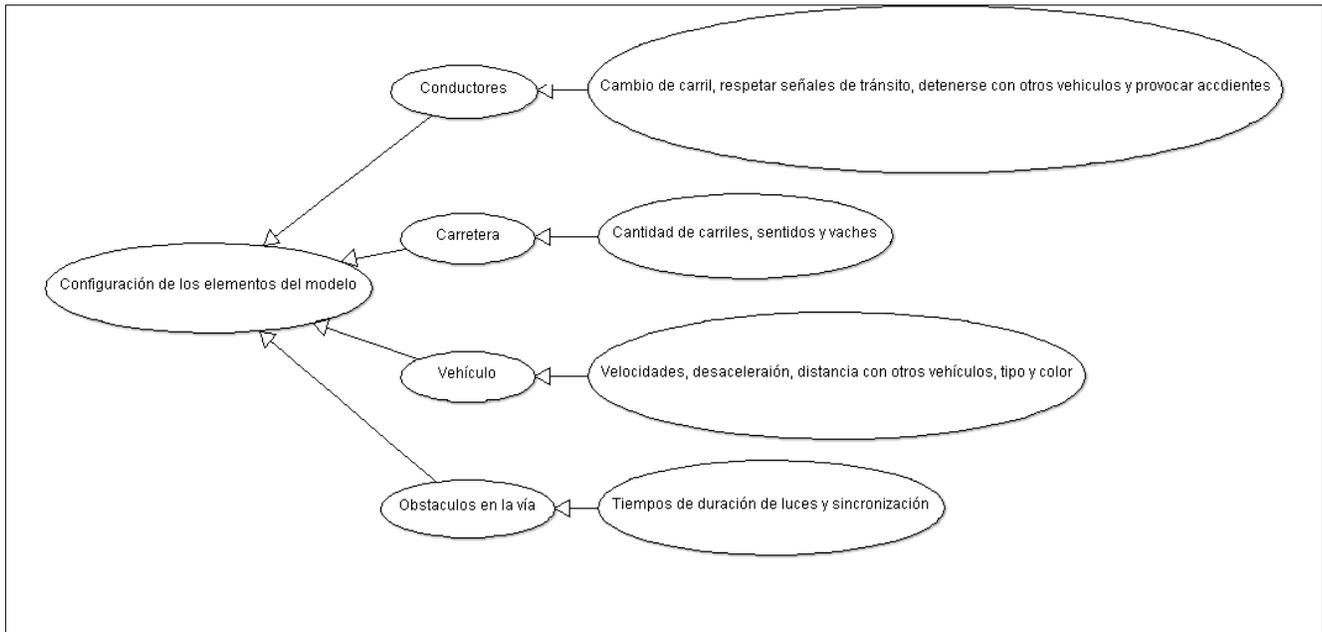


Figura 5.12. Configuración de los elementos del modelo en función de la información recopilada en campo.²⁰⁸

Creación de los elementos del modelo. Con la información obtenida en campo los elementos involucrados en el modelo fueron creados de acuerdo con las características tomadas y se introdujeron al modelo de acuerdo con funciones de números aleatorios.

²⁰⁸ Elaboración propia.

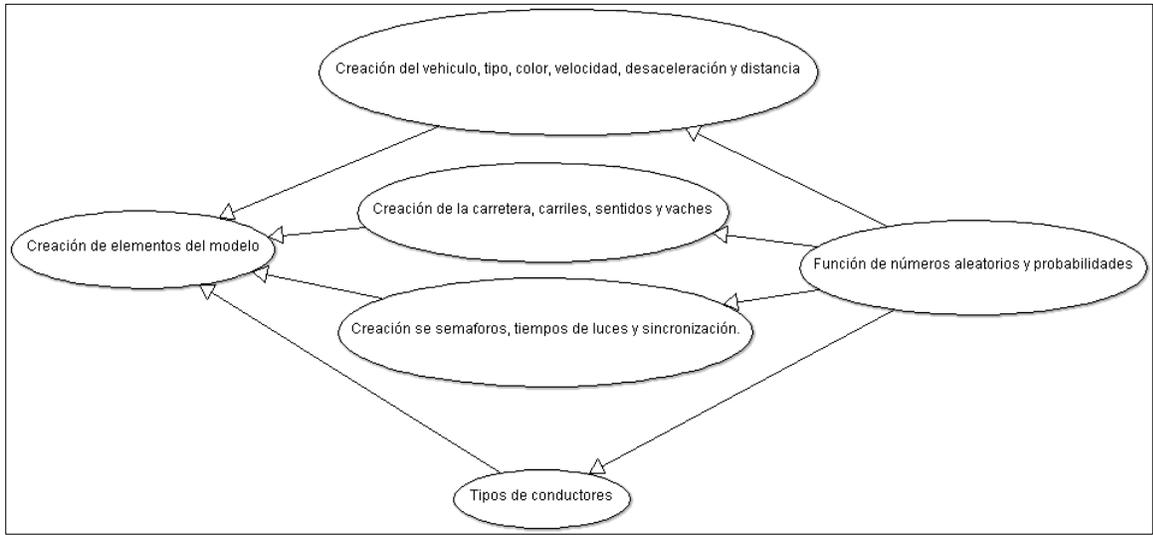


Figura 5.13. Creación de los elementos del modelo de acuerdo con las características tomadas de la teoría e información en campo.²⁰⁹

Carga de los elementos del modelo. Una vez que se crearon los elementos del modelo de acuerdo con las características e información tomada de campo se procedió a cargar todos estos elementos en un ambiente común.

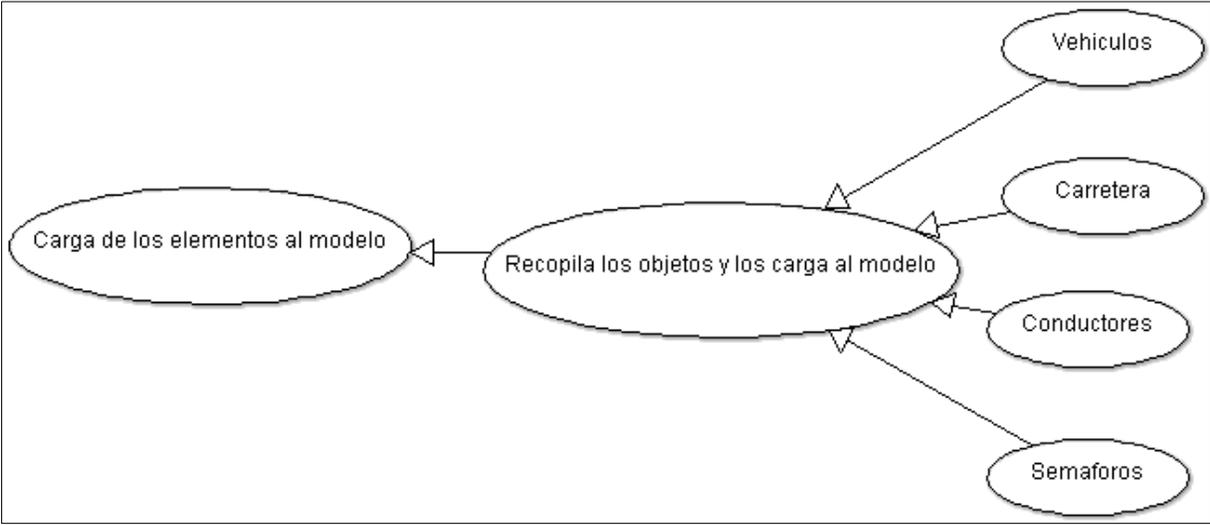


Figura 5.14. Una vez que los elementos del modelo fueron creados se cargan todos a un ambiente común.²¹⁰

²⁰⁹ Elaboración propia.
²¹⁰ Elaboración propia.

comportamiento de cada uno de sus elementos y, lo más importante, vemos situaciones que no estábamos considerando que sucedieran, para con esto poder tomar acciones que nos ayuden a reducir el número de accidentes. Este modelo nos permite hacer pequeños cambios en cada una de las variables de los diferentes elementos que forman parte del modelo y ver su efecto sobre el resultado global.

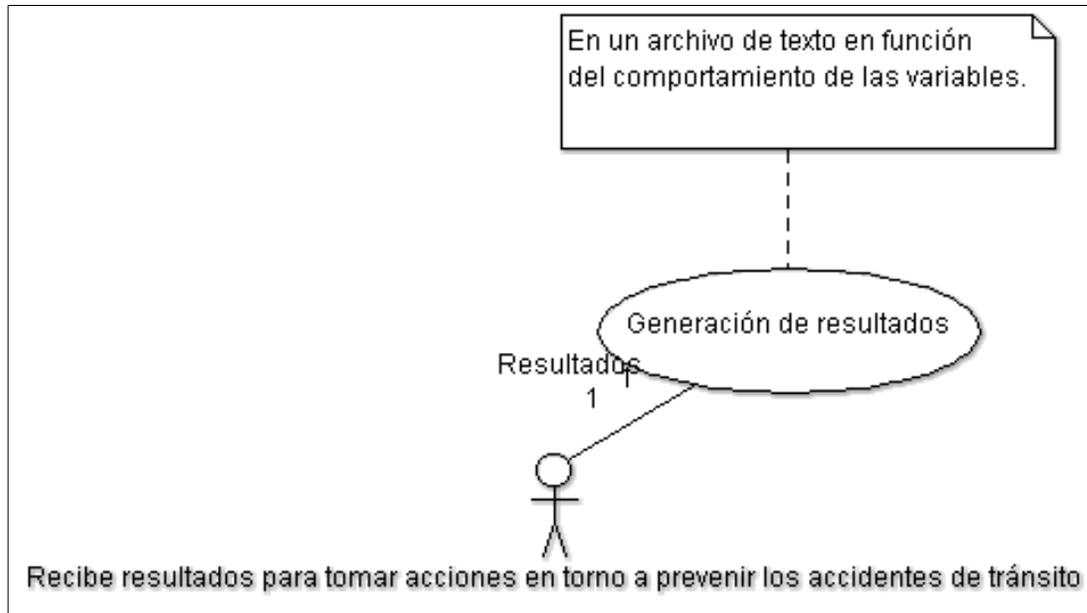


Figura 5.16. Obtención de los resultados del modelo con el fin de tomar acciones y reducir el número de accidentes de tránsito.²¹²

5.4.3.3. Arquitectura del modelo.

La arquitectura de este modelo son los requisitos vistos como un programa de computación que tiene el modelo para que cumpla con su objetivo y estos elementos son los siguientes:

1. Está basado en el principio orientado a objetos de tal manera que el armar un nuevo escenario no es complicado, al tener la facilidad de reutilizar el código ya existente.

²¹² Elaboración propia.

También esto permite agregar más elementos al ambiente para que pueda ser tan complejo como se requiera.

2. Tiene una interfaz en la cual podemos cambiar los parámetros de configuración o cambiar los archivos los cuales contienen esta información.
3. Muestra el comportamiento del modelo de manera gráfica con el fin de que podamos entender cómo está funcionando el sistema y que también sirve para fines didácticos.
4. La plataforma utilizada cuenta con un reloj que rige el comportamiento de todo el sistema, la unidad mínima de tiempo es la llamada Tick.
5. Los resultados arrojados por el sistema son entendibles y fáciles de interpretar, ya que es un archivo de texto que nos proporciona el número de accidentes en el tiempo programado.
6. Nos permite visualizar algunos comportamientos que no estaban previstos que sucedieran, que es una de las ventajas de este.

5.4.4. Implementación del modelo en una plataforma de computación.

A partir de este punto se empezó a trabajar en la realización de todas las actividades necesarias para que este modelo se ejecutara utilizando una plataforma de computación, que es lo que se trata en los siguientes puntos.

5.4.4.1. Directrices para la elección de la herramienta de modelación.

Debido a que no se posee amplia experiencia en el diseño de modelos y de herramientas para determinar cuál herramienta utilizar, para la elección de la herramienta usamos una tabla de ponderación en la cual se valoraron diferentes factores, algunos basados en los trabajos de varios autores (Najlis *et al*, 2001; Serenko y Detlor, 2002; Tobías y Hofmann, 2004; Rixon *et al*, 2005; Roberson, 2005; Dugdale, 2006) de los cuales se han examinado una serie de criterios los cuales identifican y deben de ser considerados antes de tomar una decisión en cuanto a la elección de la plataforma a utilizar.

Los criterios generales que se utilizaron fueron los siguientes:

- a. Facilidad de desarrollar el modelo y utilización del sistema.
- b. El tamaño de la comunidad que opera el sistema.
- c. Disponibilidad de ayuda o apoyo (muy probablemente de la comunidad de usuarios).
- d. El tamaño de la comunidad que conoce el lenguaje de programación en el que se implementa el sistema (si es un lenguaje de programación es necesario aplicar el modelo).
- e. El sistema aún se mantiene y se está actualizando.
- f. Disponibilidad de modelos de demostración o plantillas.
- g. Disponibilidad de detalles técnicos y de “cómo hacer” (documentación).

Los criterios relativos específicamente a la funcionalidad de modelado de un sistema que se utilizaron fueron los siguientes:

- a. El número de agentes que pueden ser modelados.
- b. El grado de interacción entre los agentes.
- c. Capacidad para representar niveles múltiples de una organización y niveles jerárquicos de los agentes.
- d. La variedad de entornos de modelo (de la red, raster y vector) y la posible relación topológica entre los agentes.
- e. Gestión de las relaciones espaciales entre los agentes y los agentes con su entorno.
- f. Mecanismos para la programación y la secuencia de eventos, etc.

Estos criterios generalmente se ponderan de forma diferente dependiendo de las preferencias personales del modelador y sus habilidades (por ejemplo, la especificación del modelo a desarrollar, experiencia en programación y los conocimientos, etc.).

Otra importante distinción en que nos basamos para la elección de la plataforma fueron las políticas de licencias, si son de código abierto, shareware / freeware, o de propiedad, optando por la de código abierto debido a que tiene la ventaja de que los sistemas constituyen herramientas o software cuyo código fuente está publicado y puesto a disposición del público, permitiendo que cualquiera pueda copiar, modificar y redistribuir, sin tener que pagar regalías o derechos. Una ventaja clave de código abierto se refiere a la transparencia de su funcionamiento interno. El usuario puede explorar el código fuente, permitiendo su modificación, ampliación y corrección

del sistema si es necesario. La fuente predominante de los sistemas abiertos son sistemas de herramientas (por ejemplo, MASON, REPASt, SWARM, etc.). Por otro lado los sistemas shareware / freeware (por ejemplo, StarLogo, NetLogo, OBEUS, etc.) no tienen la misma flexibilidad, extensibilidad o potencial para la verificación (acceso a su código fuente), como los sistemas de código abierto y por último los sistemas de propiedad que son principalmente software, desarrollados por una organización que ejerce el control sobre su distribución y uso, la mayoría requieren una licencia a un costo muy elevado para el usuario; estos sistemas tienen la ventaja de ser profesionalmente diseñados y construidos para un uso específico, y son a menudo relativamente fáciles de usar; sin embargo, a menudo carecen del apoyo de la comunidad que se encuentran con el código abierto o shareware / freeware, por otra parte, ya que el acceso a su código fuente está prohibido, un modelo desarrollado con el software propietario es esencialmente una caja negra, por lo tanto se pueden quedar dudas sobre la validez interna de un modelo construido con un sistema de este tipo.

Se consideraron, para hacer la valoración de los factores, además varios estudios en torno a la comparación de varios ambientes y programas para el desarrollo de modelos de basados en agentes, algunos de ellos son los siguientes:

- a. Comparison of agent-based modeling software de Wikipedia²¹³.
- b. Tools of the Trade: A Survey of Various Agent Based Modeling Platforms²¹⁴.
- c. Survey of Agent Based Modelling and Simulation Tools²¹⁵
- d. Evaluation of free Java-libraries for social-scientific agent based simulation²¹⁶.
- e. Agent Toolkits: A General Overview of the Market and an Assessment of Instructor Satisfaction with Utilizing Toolkits in the Classroom²¹⁷.

²¹³ Wikipedia, "Comparison of agent based modeling software", http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_agent-based_modeling_software, (Consultado Mayo, 2013).

²¹⁴ Journal of Artificial Societies and Social Simulation, "Tools of the Trade: A Survey of Various Agent Based Modeling Platforms", <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/2/2.html>, (Consultado Abril, 2013).

²¹⁵ Rob Allan, "Survey of Agent Based Modelling and Simulation Tools", *Computational Science and Engineering Department*, (June, 2009): 1-15...

²¹⁶ Journal of Artificial Societies And Social Simulation, "Evaluation of free Java-libraries for social scientific agent based simulation", vol. 7, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/1/6.html>, (Consultado Marzo, 2013).

²¹⁷ Alexander Serenko and Brian Detlor Michael G. Degroote, "Agent Toolkits: A General Overview Of The Market And an Assessment of Instructor Satisfaction With Utilizing Toolkits In The Classroom", *School of Business, McMaster University Hamilton*, Working Paper #455, (July, 2002): 1-10.

Lograr un equilibrio entre los criterios antes mencionados es difícil, pero una relación que hemos encontrado es que la dificultad de modelar un fenómeno está en relación directa con el poder de la herramienta de simulación, es decir, los modelos más complejos se tienen que resolver con herramientas más poderosas.

Tabla 5.7. Cuadro final de comparación.²¹⁸

CRITERIO DE DECISIÓN	SWARM	MASON	REPAST
Lenguaje de programación	50	50	100
Requiere experiencia de programación	50	50	50
Integra funcionalidad de SIG	50	0	100
Disponible modelos de demostración	50	50	50
Disponible el código de modelos de demostración	50	50	50
Tutoriales y documentación	50	50	50
Apoyos de la comunidad y tamaño	50	50	100
Facilidad para desarrollar el modelo y la utilización del sistema	100	100	50
Tamaño de la comunidad para propiciar apoyo	50	50	100
El sistema aun se mantiene y se esta actualizando	50	50	100
Número de agentes que pueden ser modelados	50	50	100
Grado de interacción entre los agentes	50	50	100
Capacidad para representar diferentes niveles	50	50	100
Variedad de entornos de modelado	50	50	100
Gestión de las relaciones espaciales entre los agentes y los agentes de su entorno	50	50	100
Mecanismos para la programación y la secuencia de eventos	50	50	100
PUNTUACIÓN FINAL	850	800	1350

De acuerdo a la valuación que realizamos (ver Tabla 5.7) tomamos la decisión de elegir la herramienta de simulación Repast (the REcursive Porous Agent Simulation Toolkit), aunque presenta mayores dificultades para modelar y no existe mucha documentación para su estudio, es la herramienta más completa con la cual se pueden realizar modelos con un alto grado de complejidad, es una de las herramientas más utilizadas en el mundo, fue originalmente desarrollada por Sallach, Collier y otros en la Universidad de Chicago en el año 2000 y ampliado por el Argonne National Laboratory; Repast es ahora administrado por una organización no lucrativa de voluntarios llamada Repast Organization for Architecture and Design (ROAD). Repast es por el momento la herramienta de simulación más adecuada para la modelación de

²¹⁸ Elaboración propia.

fenómenos sociales, la comunidad es grande y sigue creciendo, por ejemplo Repast 3 ha tenido 7,000 descargas frente a 3,000 para la versión anterior.²¹⁹

Cuando se empezó a trabajar en el desarrollo del modelo sobre accidentes a través de la organización de intercambio de información de Repast²²⁰ logramos obtener la librería desarrollada en Repast 3 en el lenguaje Java que se utiliza para el desarrollo de modelos basados en agentes para fenómenos de tráfico, el ambiente de desarrollo de software llamado Traffix desarrollado por la Empresa AITIA, Inc.; estas clases son las que se utilizaron para el desarrollo del modelo presentado en este trabajo.

Antes de pasar al diseño del modelo, primero se presenta una explicación de los principios básicos de la programación orientada a objetos y de los ambientes de desarrollo Repast y Traffix.

5.4.4.2. Descripción del kit de modelación Repast.

Repast significa Recursive Porous Agent Simulation Toolkit. Repast Symphony - a menudo se abrevia como Repast S, o simplemente Repast - forma parte de una familia de las herramientas de modelación. Repast es un sofisticado entorno de modelado que soporta no sólo la programación de modelos, sino también su visualización y el análisis de datos. Mientras que las visualizaciones son a menudo innecesarios una vez que un modelo o simulación ha sido desarrollado plenamente, su valor para garantizar que el modelo está funcionando como debería en las primeras etapas de desarrollo no puede ser sobrestimada, y Repast hace particularmente fácil la creación de visualizaciones y otras formas de muestra. Repast se ha hecho disponible como un plug-in para el programa gratuito de código abierto llamado Eclipse. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la guía Repast es esencialmente independiente de Eclipse, y los programas desarrollados con él se pueden ejecutar de forma independiente de Eclipse. Esto se vuelve particularmente importante cuando hemos ido más allá de la etapa de desarrollo y cuando se empieza a generar resultados de la simulación en múltiples escenarios. En un entorno de programación de propósito general, Eclipse proporciona una plataforma conveniente dentro del cual se facilita la creación de programas en Repast. La desventaja de usar Repast dentro de un IDE de propósito general es que Eclipse contiene una gran cantidad de características que no

²¹⁹ Douglas Samuelson and Charles Macal, "Agent-based Simulation Comes of Age," *OR/MS Today*, Vol. 33, Number 4, (Agosto, 2006): 34-38.

²²⁰ Repast, "Lista de consulta de apoyo a desarrolladores", <https://lists.sourceforge.net/lists/listinfo/repast-interest>, (Consultado Febrero, 2011).

necesariamente tienen nada que ver con Repast y se pierde el distinguir que partes del medioambiente son Eclipse y qué partes son de Repast. La parte positiva importante, es que Eclipse ofrece una gran cantidad de programación sofisticada y depuración de apoyo que va probablemente más allá de los recursos que a los desarrolladores les puede proporcionar Repast, además de la funcionalidad del modelado. Como modeladores, podemos beneficiarnos significativamente de la sinergia entre estas dos aplicaciones.

Repast también es compatible con modelos de agentes hechos a través de diagramas de flujo y de código Groovy. Todos los diagramas de flujo se convierten automáticamente en el código fuente correspondiente, y es posible ver las dos formas una junto a la otra durante el desarrollo del modelo. Incluso si uno no está familiarizado con Groovy, de esta forma a veces puede ser útil cuando se depura un modelo y el error no está claro cuando se trata de detectar en el diagrama de flujo.

Sea cual sea el lenguaje se utiliza para el programa, los agentes de Repast corresponden a Objetos Java en tiempo de ejecución en la forma que hemos descrito anteriormente. En la terminología de Repast los agentes se definen en términos de las propiedades y comportamientos. Como se ilustra arriba, en la terminología orientada a objetos, las propiedades son las variables de instancia y los comportamientos son los métodos de su clase.

5.4.4.2.1. Contextos y Proyecciones.

Dentro de un modelo es probable que haya cientos o incluso cientos de millones de casos de agentes individuales. Es inevitable que estos deban organizarse de alguna manera. Por ejemplo, si nuestro modelo utiliza un algoritmo síncrono, por tiempo, entonces deben ser capaces de "visitar" cada agente en cada paso del tiempo y decirle de la ejecución de sus correspondientes comportamientos. Las bibliotecas del lenguaje de programación a menudo contienen estructuras en forma de lista que son adecuados para este propósito, por ejemplo, un ArrayList, lista de las normas de API's en Java, o la clase vector del estándar C++. Sin embargo, aparte de la necesidad de organizar a los agentes por el bien de la lógica general de la simulación, probablemente también sea necesario organizar los agentes dentro del "Medio ambiente" que es una parte explícita del modelo. Por ejemplo, la distribución geográfica de la zona habitada por los mosquitos, o la estructura celular ocupado por proteínas. Las características de estos ambientes tienden a tener un efecto significativo sobre el estado de los agentes y las interacciones entre

ellos, la proximidad física de los seres humanos y los mosquitos afecta a su capacidad de infectar a los demás, por ejemplo.

Repast ofrece dos dispositivos diferentes de estructuración de la organización de los agentes: contextos y proyecciones. Estos siempre se utilizan en combinación. La modelación exitosa dentro de Repast implica saber la diferencia entre ambas.

- Los contextos proporcionan una forma de agrupar a los agentes sin tener en cuenta algún espacio o estructura que se encuentre entre los elementos. Un contexto se utiliza, por lo tanto, para indicar que un conjunto de agentes están relacionados de alguna manera. Ni los agentes ni las proyecciones tienen alguna razón de existencia útil fuera de los contextos en los modelos hechos en Repast.

- Las proyecciones están subordinadas a los contextos. Imponen una disposición espacial o estructural de los agentes dentro de un contexto dado.

Una vez que un agente ha sido creado, se debe de ser agregado a un contexto. La proyección aplica a ese contexto que describe las relaciones entre los agentes entre sí dentro del contexto. Por ejemplo, en el inicio de la simulación de mosquitos, nosotros pudimos haber creado todos los agentes de los humanos y los mosquitos que requiriéramos y ponerlos juntos en un contexto único, ya que queremos que estén juntos unos de otros y sean capaces de interactuar. Con el fin de imponer una estructura geográfica para ellos debemos de crear una proyección y añadirla al contexto. Por ejemplo, podría ser una proyección de una red de dos dimensiones discretas, o una proyección continua de dos dimensiones. La proyección elegida determinaría los aspectos del espacio físico ocupado por los agentes. La escala de la proyección utilizada para los mosquitos y los seres humanos estaría relacionada con sus tamaños y los movimientos de los agentes. Una amplia gama de tipos de proyección están disponible dentro de las API's de Repast: redes celulares de n dimensiones, espacios continuos de n dimensiones, sistemas de coordenadas geoespaciales basadas en un SIG y redes que permiten una multi relación entre los elementos.

Siempre hay un contexto raíz, que es un contexto de alto nivel para que todos los agentes que pertenecen de forma predeterminada. En muchos modelos, este contexto solo será suficiente, pero los contextos también se pueden organizar en una estructura anidada, jerárquica para satisfacer las necesidades de un modelo. Un segundo nivel de múltiples contextos puede anidar en el contexto de la raíz. Tal acuerdo sería una forma ideal para el reparto de las bacterias entre diferentes hospederos en un modelo de fibrilación, por ejemplo. Un individuo bacteria se coloca

en un solo sub-contexto, pero el modelo podría permitir su paso a otro diferente durante de la simulación. En otros tipos de modelos, un solo agente puede existir simultáneamente en múltiples contextos. Además, los contextos se pueden anidar a cualquier nivel con el fin de ofrecer diferentes sub-grupos de agentes dentro de un contexto general de la raíz; por ejemplo, los individuos suelen ser miembros de grupos de familias, grupos de trabajo, y otras agrupaciones sociales. Cada uno de los grupos en cuestión puede ser representada como un contexto diferente en Repast.

Hay que tener en cuenta que la agrupación en un contexto no nos dice nada acerca de la ubicación física o la conexión de los agentes, sólo que entre algún tipo de relación de la figura de agentes existentes. Cada marco tendrá su propia proyección que proporcionará la estructuración. De esto se desprende que un solo agente puede estar relacionado en muchos aspectos a otros agentes a través de diferentes proyecciones al mismo tiempo si es que existen en múltiples contextos. Pensemos, por ejemplo, relaciones mientras un individuo trabaja, su lugar de trabajo será físicamente situado en una zona geográfica determinada, con conexiones de trabajo físicas con colegas, sin embargo, también puede estar en contacto a través de teléfono o correo electrónico con otros colegas que se encuentran geográficamente muy distantes entre sí. Esta conectividad puede ser representada por una proyección de red aplicada al contexto de trabajo de esa persona en Repast. Una proyección de la red no implica necesariamente en resumen un espacio acotado físicamente, mientras que un contexto de una sola proyección de vinculación para todos los agentes puede ser suficiente; por ejemplo cajeros automáticos para muchos, todavía vale la pena ser conscientes de la complejidad de que se dispone dentro de Repast con respecto a la organización de los agentes, a través de la anidación de contextos y la aplicación de las proyecciones.

Una consecuencia importante del uso de proyecciones para indicar tanto espacial como estructuralmente arreglos es que los agentes son liberados tanto de la responsabilidad del mantenimiento de su localización y como del seguimiento de las acciones de sus vecinos. Este enfoque a menudo se simplifica considerablemente la estructura interna básica de un agente, y permite sofisticadas operaciones relacionales que debe facilitar la proyección especializada de objetos.

5.4.4.2.2. Parametrización del modelo.

Tener una descripción disponible detallada de la estructura general y los parámetros de un modelo pueden ser importantes y útiles. En Repast, los detalles de todos los elementos esenciales de un modelo que hemos visto hasta ahora: los agentes, los contextos y las proyecciones son capturados en un archivo de definición de modelos especiales que Repast llama `model.score` ("el archivo de puntuación"). Este archivo es independiente del código del modelo y es generalmente el primer aspecto que se define al crear un nuevo modelo. Una de las razones porque es importante este archivo en Repast se debe a que la información es mantenida y usada por otras herramientas, como para la visualización del modelo, el almacenamiento de datos y gráficos. Por ejemplo, la herramienta de visualización toma el conjunto de tipos de agente definido en el archivo de resultados y proporciona una representación visual por defecto para cada uno, lo que permite obtener una representación visual del progreso de la simulación sin ningún esfuerzo de codificación. Si se desea, la pantalla por defecto se puede personalizar, por ejemplo, para el uso diferentes colores para indicar los diferentes estados de infección en los agentes de la malaria. La visualización también ofrece la inspección interactiva de estado de agente, que es muy útil cuando la depuración de un mal comportamiento de un nuevo modelo, sin costo de programación para el modelista. Características como éstas hacen que Repast sea muy atractivo de usar, todos los esfuerzos de programación se gastan de manera creativa en el modelo y no en su representación exterior.

Cuando la visualización de los agentes individuales es demasiada fina en un nivel de detalle, una función de herramientas de gráficos ofrecen la posibilidad de presentar los datos agregados, tales como el número de agentes de cada tipo, ya sea en cada paso de tiempo o intervalos periódicos definidos por el usuario.

Otra función del archivo de resultados es apoyar a la inicialización del modelo externo y correr la variación. Al definir parámetros tales como el número de agentes, el tamaño de la proyección y así sucesivamente - fuera del código del modelo, se hace mucho más fácil de manejar modelos con conjuntos de parámetros diferentes. El acceso a los parámetros externos se obtiene desde dentro del código del modelo a través de clases de la biblioteca que forman parte de las API's de Repast.

Hay otras herramientas que facilitan las diferentes formas de cargar y guardar los datos desde el entorno de ejecución. Por ejemplo, las clases de datos del cargador que se proporcionan puede

leer los datos del modelo y agentes de un archivo de texto externo o la especificación XML. Del mismo modo, clases de congelación y rehidratación permiten a los estados dinámicos programas para guardarlas y restaurarlas, mientras que en productores proporcionan una manera conveniente a la salida de los resultados de una simulación sin tener que escribir su propio código. Por último, para cada modelador es esencial la generación de números aleatorios requisito que se apoya en la biblioteca de Repast, proporciona muchos tipos de diferentes distribuciones, como uniforme, exponencial, Poisson, etc.

Hay un conjunto de herramientas sofisticadas con que cuenta Repast, hay muchas características bien desarrolladas que hacen la vida del modelador mucho más sencilla que si se tratara de escribir todo desde cero.

5.4.4.3. Entorno de desarrollo Traffix.

Traffix es el ambiente de desarrollo bajo el cual se desarrolló el modelo basado en geosimulación; en esta parte se explican algunas de sus características principales de su ambiente basándonos en un artículo publicado por la Empresa que lo desarrollo.²²¹

Las organizaciones eficaces de transporte pueden ahorrar enormes cantidades de tiempo y dinero, reducir la contaminación y hacer una conducción más segura. Pensando las cosas idealmente todos los participantes en el tráfico podrían actuar al unísono, dejando de lado sus intereses personales, para que el tráfico fuera más eficaz posible. En este caso, un ser omnisciente central "cerebro" puede determinar la velocidad, la posición, la aceleración y todos los otros parámetros relevantes de cada vehículo en cada momento en una red de tráfico modelado. Pero en la vida real, los conductores tienen conceptos diferentes de la conducta correcta en las carreteras. Algunos de ellos observan estrictamente las reglas, mientras que otros ni siquiera saben algunas de ellas. Algunos son amables y cooperativos, pero algunos de ellos se refieren a los demás como competidores a batir. Además, incluso los actos de un mismo individuo pueden ser diferentes cuando está enojado, con sueño o con prisa. El cerebro central se encontraría con enormes dificultades cuando se tratará de modelar el comportamiento de estos conductores en las carreteras. La simulación basada en agentes es mucho más capaz de lidiar con este problema. Los

²²¹ Balázs Bálint and László Gulyás, "Traffix: a Framework for Agent-Based Traffic Simulations", (In Proceedings of the 5th European Social Simulation Association Conference (ESSA 2008), Brescia, Italy, 29th October, 2008).

agentes pueden tener características diferentes, comportamientos de diferentes maneras, y pueden cambiar su comportamiento durante del tiempo.

El ambiente de Traffix, ha sido desarrollado como un esfuerzo de colaboración de AITIA International Inc. y el Centro Cooperativo de Investigación en la Informática, proporciona una plataforma general, flexible y altamente configurable para las simulaciones basadas en agentes de tráfico, o donde intervengan objetos como vehículos, conductores y avenidas.

El ambiente de Traffix puede ser utilizado para estudiar diversos escenarios, como por ejemplo, los efectos de la sincronización de los semáforos, cómo los límites de velocidad o los cierres de carreteras como afectan el flujo del tráfico, etc., tiene el énfasis de representar el realismo de cada uno de sus elementos; también se puede utilizar para estudiar los efectos de los diferentes comportamientos de los conductores, por ejemplo, ¿cómo afecta al tráfico en general un conductor que es agresivo, cambia de carril cada vez que puede, trata de buscar una nueva ruta a su destino cuando se encuentra con un atasco de tráfico, ignora ciertas reglas?, cómo estos comportamientos, y el número de conductores que les siguen afectan al tráfico en general.

5.4.4.3.1. El ambiente de Traffix basado en la simulación basada en agentes.

Las características más a detalle de la plataforma se describen a continuación, basándonos en el artículo señalado anteriormente.²²²

El ambiente de Traffix es un ambiente de trabajo para la simulación basada en agentes construido sobre la plataforma de Repast 3.1., en su corazón y con la plataforma de simulación basada en agentes MultiAgent Simulation Suite (MASS). Traffix es adecuado para el modelado y la simulación de una amplia gama de escenarios de tráfico, que van desde las intersecciones individuales o intercambios a toda la red vial de una ciudad completa (Figura 5.17 muestra un ejemplo).

²²² Balázs Bálint and László Gulyás, "Traffix: a Framework for Agent-Based Traffic Simulations", (In Proceedings of the 5th European Social Simulation Association Conference (ESSA 2008), Brescia, Italy, 29th October, 2008).



Figura 5.17. Simulación de tráfico de la autopista con la visualización en 3D.²²³

Los cuatro componentes principales de los modelos Traffix son: la red vial, el tráfico de objetos (es decir, semáforos o señales, bloqueos de carreteras, etc.), los coches y los pilotos (conductores).

El gráfico de tráfico de la red vial se compone de nodos que representan las uniones o simplemente los puntos de quiebre en el poli-línea que representa una carretera. Los bordes representan los segmentos rectos de las carreteras. Una ventaja es que tiene uno o más carriles asignados a la misma (es decir, Traffix puede simular las carreteras de varios carriles). Los carriles pueden tener objetos de tráfico (por ejemplo, las señales de tráfico o semáforos) que se les asignan, y están pobladas por los coches. Un agente de auto tiene los atributos físicos del vehículo tales como la longitud, anchura, aceleración, color, tipo, etc., los atributos que describen su posición real en la red de carreteras y la ruta que se propone seguir en el próximo paso, y ejecuta el cambio de carril, unión de cruce, coches siguientes, los comportamientos de los semáforos. El agente controlador determina el destino del vehículo y la ruta de acceso a la misma. El comportamiento básico es que los conductores elijan la ruta más corta con al menos el cambio de carril. Una simulación utiliza un archivo que describe cuando un coche debe comenzar su curso, desde donde hasta su destino. El tipo de vehículo (coche estándar, camión, etc.) es elegido al azar. El porcentaje de los conductores que se comportan de cierta manera (por ejemplo, saber de antemano, que los caminos están cerrados) se puede establecer en cada simulación. Una consideración especial para permitir a los coches para cruzar intersecciones del modo más realista

²²³ Balázs Bálint, "Traffix Developer Guide", Aitia Company, (Budapest: November 2007): 32.

posible. Esto implica que el conductor observa ciertas normas, dando paso, haciendo un esfuerzo para evitar la colisión. Simulación realista y toma de decisiones individuales de los controladores implica que los agentes del conductor no se comunican directamente entre sí, o cualquier otro componente del modelo. En su lugar, observan el movimiento de los otros vehículos. Para implementar esto, un supuesto básico de este marco es que los automóviles marcan los nodos y líneas que tienen la intención de tocar en su próximo paso. De esta manera, los conductores de otros vehículos pueden observar la dirección del coche y la velocidad y donde le gustaría ir. En cada paso de simulación de un coche trata de moverse de forma determinada en el final de su etapa anterior. Se calcula cómo se puede mover, teniendo en cuenta los semáforos, los coches de delante de él y los coches que se podrían cruzar su ruta en un cruce. Al final de su paso el auto determina la ruta que desea tomar en el siguiente paso.

Para hacer un nuevo modelo utilizando el ambiente de Traffix, uno simplemente tiene que heredar una nueva clase del modelo de la clase TrafficModel. En esta clase del modelo se definen los archivos que el modelo debe de utilizar para determinar la red vial, las posiciones y órdenes de trabajo de los semáforos, y / o rutas de los vehículos de seguir y la frecuencia en que entran en la red de carreteras. Habiendo hecho esta simulación el nuevo modelo está listo para funcionar.

La estructura permite a los modeladores con rudimentarios conocimientos de Java, construir complejos escenarios de tráfico y experimentar con diferentes comportamientos del conductor en el mismo escenario global de Traffix. Nuevos objetos de tráfico y los comportamientos avanzados de conductores también pueden llevarse a cabo de forma relativamente sencilla mediante la extensión de las clases correspondientes del programa.

El ambiente óptimo para el manejo de Traffix es el IDE Eclipse, Traffix está formado por 8 paquetes cada uno de los cuales tiene una función específica dentro de la construcción del modelo y a la vez cada paquete está formado por diferentes clases que son las que se utilizan para la construcción del modelo.

A continuación realizaremos una breve descripción de cada uno de estos paquetes:

- a. trafficModelvis.- Contiene las clases para que los modelos se puedan visualizar en tres dimensiones.
- b. trafficModelVehicles.- Contiene las clases que nos definen el tipo de vehículo que intervendrá en cada simulación y sus características de comportamiento.

- c. trafficModelsPainters.- Son las clases que le dan los colores a cada uno de los elementos del modelo.
- d. trafficModelsGraph.- Contiene las clases que nos representan gráficamente cada uno de los elementos del modelo.
- e. trafficModelGis.- Contiene las clases que nos representan gráficamente los elementos del modelo pero tomando como base capas en formato Shape.
- f. trafficModelDrivers.- Las clases de este paquete definen las características de cada uno de los conductores.
- g. trafficModel.- Este paquete contiene la clase que integra todas las demás para darle forma final al modelo.

En el Anexo A se describen las características principales y funciones del ambiente Traffix²²⁴, en donde se muestra que a través de la aplicación de la programación orientada a objetos y haciendo uso de las clases conformadas en cada paquete pueden hacerse ambientes tan complicados como la simulación de todo el sistema vial de una ciudad completa. En este capítulo se incluyen sus diagramas de clases.

El ambiente de desarrollo Traffix nos permite tener un marco realista para la toma de simulaciones basadas en agentes de tráfico. En este ambiente se es capaz de modelar las carreteras con varios carriles, diferentes sincronizaciones de semáforos, diversos comportamientos del conductor y puede simular los movimientos de varios miles de vehículos. En el uso de este marco, se hicieron estudios de casos para investigar los efectos de la duración de los giros en las bahías y los comportamientos de los conductores en los cambios de carril. Hay una gran cantidad de modelos computacionales y diferentes enfoques propuestos para simular diversos aspectos del tráfico. Entre estos muchos utilizan sólo las carreteras de un solo carril²²⁵. Muchos modelos están concebidos para simular un solo aspecto del tráfico, como el cambio de carril modelo MOBIL²²⁶ o la intersección modelos de mecanismo de control como el modelo de

²²⁴ Balázs Bálint, "Traffix Developer Guide", Aitia Company, (Budapest: November 2007): 1-35.

²²⁵ R. Van Tongeren, O. Gietelink, B. de Schutter, M. Verhaegen, "Traffic modelling validation of advanced driver assistance systems", (Trabajo presentado en el IEEE Intelligent Vehicles Symposium en Istanbul, Turkey, Junio, 2007).

M. Schreckenberg, A. Schadschneider, K. Nagel, "Discrete stochastic models for traffic flow", *Physical Review* No. 51(1995): 1-24.

²²⁶ M. Treiber, D. Helbing, "Realistische Mikrosimulation von Straßenverkehr mit einem einfachen Modell", (Trabajo presentado en el Symposium de Simulations technik ASIM 2002 el 13 de Septiembre del 2002).

mecanismo de reserva basada en la intersección de control de Kurt Dresner y Peter Stone²²⁷. Hay modelos que pueden manejar las carreteras de varios carriles y simular diversas situaciones de tráfico (VisSim y CORSIM²²⁸, por ejemplo), pero la mayoría de ellos son modelos microscópicos de simulación y no son capaces de simular miles de coches. El enfoque de los modelos más populares de tráfico tiene un flujo uniforme de vehículos sobre la base del modelado tradicional de la física (Greenshields²²⁹, Greenberg²³⁰). Este enfoque hace que sea casi imposible de estudiar los efectos de la conducta individual de los conductores.

5.4.4.4. Diseño del modelo basado en agentes y bases de su operación.

Se presenta una explicación de cómo se estructura un programa en Repast 3, que es la misma de un modelo hecho sobre la plataforma Traffix.²³¹

Para usar Repast es necesario tener instalada alguna versión del programa Java, como compilador.

Un modelo básico de Repast incluye los siguientes elementos:

1. Un objeto como modelo completo que actúa como el mismo.
2. Un objeto como espacio que controla el ambiente en el cual la acción toma lugar.
3. Un objeto como Agente.

El objeto como modelo es una extensión de la clase llamada SimModelImpl; este objeto es el más importante porque en este se maneja todo el ambiente de modelación en Repast.

El objeto del modelo es diseñado para reaccionar a la barra de control de Repast, mostrada en la figura 5.18.

²²⁷ K. Dresner And P. Stone, "Multiagent Traffic Management: A Reservation-Based Intersection Control Mechanism", (Presentado en the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, en New York, Julio 19 – 23, 2004).

²²⁸ L. Bloomberg, J. Dale, "Comparison of VISSIM and CORSIM Traffic Simulation Models on a Congested Network", *Transportation Research Record*, núm. 1727, (National Research Council, Washington, 2000): 52—60.

²²⁹ B. D. Greenshields, "A Study of Traffic Capacity", *Highway Research Board Proceedings*, Vol. 14 (Traffic Bureau of the Ohio State Highway Department, 1984): 448-477.

²³⁰ H.Greenberg, "An Analysis of Traffic Flow", *Operations Research*, Vol. 7, (united States, 1989): 79-85.

²³¹ John T. Murphy, "A RePast Tutorial, University of Arizona & Arizona State University, 2011", <http://www.perfectknowledgedb.com/Tutorials/H2R/HowTo00.htm> , (Consultado Enero, 2011).



Figura 5.18. Barra de control de Repast.²³²

Con los botones de la barra de control de Repast podemos hacer el manejo del modelo, el folder si se oprime abre un nuevo modelo, la cruz roja cierra la aplicación y el modelo el cual está operando, la figura de foco nos permite introducir o cambiar los parámetros iniciales del modelo, la flecha significa que el modelo empieza, el botón de flecha con un rectángulo es la opción de STEP la cual nos muestra un ciclo del proceso del modelo a la vez, la flecha curva si la oprimimos reinicia el modelo, el botón con un cuadrado detiene el modelo, el de dos rectángulos verticales es para ponerle pausa al modelo y el ultimo botón de dos flechas curvas es el de SETUP y con ese botón llevamos al modelo a la posición inicial con los valores predeterminados. Estas mismas funciones pueden ser accionadas con los botones para ejecutar un modelo en la plataforma Traffix.

El modelo debe de tener ciertos métodos obligatorios, por ejemplo tiene un método llamado "getName" que retorna el nombre del modelo de simulación cuando este comienza, su nombre aparece en la barra superior del modelo, para un primer modelo esta parte quedaría con el siguiente código:

```
import uchicago.src.sim.engine.SimModelImpl;
public class MyFirstRePastModel extends SimModelImpl {
    public String getName(){
        return "Mi Primer Modelo";
    }
}
```

²³² John T. Murphy, "A RePast Tutorial, University of Arizona & Arizona State University, 2011", <http://www.perfectknowledgedb.com/Tutorials/H2R/HowTo00.htm> , (Consultado Enero, 2011).

Sin embargo, hay más requerimientos. Cuando oprimimos el botón de inicializar Repast nos lleva a empezar el método "begin", que es el responsable de inicializar el modelo. El código de este es como sigue:

```
import uchicago.src.sim.engine.SimModelImpl;
public class MyFirstRePastModel extends SimModelImpl {
    public String getName(){
        return "Mi Primer Modelo";
    }
    public void begin(){
    }
}
```

En términos técnicos, la clase `SimModelImpl` es una clase abstracta que implementa una interfaz, esta requiere de ciertos métodos -algunos ya vistos, dos de ellos, `getName ()` y `begin ()` - y hay algunos otros por venir. Sin embargo, existe una estructura adicional de Repast, para los modelos, no es impuesta por ningún requisito de Java o el paquete de Repast, sino es simplemente una manera habitual y útil para organizar el programa. Los modelos en Repast tradicionalmente consisten en "mapas" de las clases en el modelo. En este caso, el tradicional 'mapa' establece que el método de "Inicio" debe de dividir sus responsabilidades en otros tres métodos: `buildModel`, `buildSchedule` y `buildDisplay`. Por lo tanto la estructura del código quedará de la siguiente forma:

```
import uchicago.src.sim.engine.SimModelImpl;
public class MyFirstRePastModel extends SimModelImpl {
    public String getName(){
        return "Mi Primer Modelo";
    }
    public void begin(){
        buildModel();
    }
}
```

```
    buildSchedule();
    buildDisplay();
}
public void buildModel(){
}
public void buildSchedule(){
}
public void buildDisplay(){
}
}
```

Esta estructura no es necesaria, puede hacerse de otra manera. Sin embargo, encontramos que muchos modelos de Repast se estructuran de esta manera, y hay ciertas ventajas por lo que lo convierten en un buen procedimiento a seguir.

No existe un método explícito para el funcionamiento de los botones 'play', 'pause', 'stop' y las funciones de 'step', aunque se basan en cosas que son ingredientes esenciales en el modelo.

La primera es la función 'setup', que se llama cuando el botón con las dos flechas curvas que se pulsa. Por lo general establece la configuración antes de empezar el modelo. El código con esta función quedaría de la siguiente forma:

```
import uchicago.src.sim.engine.SimModelImpl;
public class MyFirstRePastModel extends SimModelImpl {
    public String getName(){
        return "Mi Primer Modelo";
    }
    public void setup(){
    }
    public void begin(){
        buildModel();
    }
}
```

```

    buildSchedule();
    buildDisplay();
}
public void buildModel(){
}
public void buildSchedule(){
}
public void buildDisplay(){
}
}

```

La segunda es una función llamada `getSchedule`, que debe devolver un objeto de tipo 'Schedule'. Todos los modelos en Repast tienen al menos un objeto de horario. Normalmente este es creado mediante la adición de un objeto de horario como una variable de clase. Por lo tanto el código sería de la siguiente manera:

```

import uchicago.src.sim.engine.SimModelImpl;
import uchicago.src.sim.engine.Schedule;
public class MyFirstRePastModel extends SimModelImpl {
    private Schedule schedule;
    public String getName(){
        return "Mi Primer Modelo";
    }
    public void setup(){
    }
    public void begin(){
        buildModel();
        buildSchedule();
        buildDisplay();
    }
}

```

```
public void buildModel(){
}
public void buildSchedule(){
}
public void buildDisplay(){
}
public Schedule getSchedule(){
    return schedule;
}
}
```

Al añadir al programa el horario (schedule), el objeto de horario se importa en la parte superior del archivo, una variable de horario se declara en la sección de declaraciones de variables, y la propia función se agrega en la parte de abajo.

Hay un poco de extrañeza aquí en que el objeto de horario que se declara como interno en el modelo, lo que normalmente significa que no se puede acceder directamente a los programas externos u otros objetos. Entonces, el método 'getSchedule' se presenta como un método público, y lo que hace es pasar el objeto de horario directamente al programa sin protección o cualquier otro objeto. Efectivamente, esto permite el acceso directo al objeto de horario. Puede parecer una buena alternativa que el objeto de horario sea público, pero esto sería una mala elección. En este momento el motor de Repast, que tiene acceso al horario del modelo, consigue este acceso llamando al método 'getSchedule', y este método es requerido por la interfaz SimModelImpl, por lo que el compilador impone esto. La alternativa sería que el objeto horario 'schedule' fuera público, lo que significaría que el motor de Repast accediera a él directamente, pero esto no sería una forma elegante de hacerlo. En este ejemplo, hemos llamado 'schedule' mi horario, pero no se tenía que hacer, y otro nombre podría haber sido más claro. Aún más importante, pudimos haber creado un hijo de la clase Schedule y agregarle más funcionalidad. Por último, observamos que el público / privado es menos importante de lo que podría ser, que podíamos hacer "público" nuestro objeto de horario, sin preocuparse demasiado, porque vamos a tener un conocimiento más completo de cómo en nuestro modelo se utilizará.

El último ingrediente necesario es bastante complicado, es la función `getInitParam`, que devuelve una matriz de variables en cadena, cada lista contiene un nombre de un parámetro en particular que se desea que estén disponibles para variar el panel de control de Repast.

Suponga que desea realizar una simulación en la que los agentes de N se implementan, pero desea ser capaz de ejecutar la simulación con diferentes números de agentes N, simplemente haciendo clic en los botones de 'setup' e 'inicializar' (sin cambiar el código), Repast permitirá esto a través de los siguientes requerimientos:

1. Debemos de proporcionar a Repast una lista de los parámetros que se desea modificar, en este caso número de agentes "NumAgents".
2. Debe crear los métodos 'get' y 'set' para cada parámetro de la lista.

Así, supongamos que queremos tener una variable llamada "numAgents", el código quedaría de la siguiente manera:

```
import uchicago.src.sim.engine.SimModelImpl;
import uchicago.src.sim.engine.Schedule;
public class MyFirstRePastModel extends SimModelImpl {
    private Schedule schedule;
    private int numAgents;
    public String getName(){
        return "Mi Primer Modelo";
    }
    public void setup(){
    }
    public void begin(){
        buildModel();
        buildSchedule();
        buildDisplay();
    }
    public void buildModel(){
    }
}
```

```

public void buildSchedule(){
}
public void buildDisplay(){
}
public Schedule getSchedule(){
    return schedule;
}
}

```

Para añadir estos parámetros se requiere que se incluyan los métodos get y set de la siguiente manera:

```

import uchicago.src.sim.engine.SimModelImpl;
import uchicago.src.sim.engine.Schedule;
public class MyFirstRePastModel extends SimModelImpl {
    private Schedule schedule;
    private int numAgents;
    public String getName(){
        return "Mi Primer Modelo";
    }
    public void setup(){
    }
    public void begin(){
        buildModel();
        buildSchedule();
        buildDisplay();
    }
    public void buildModel(){
    }
    public void buildSchedule(){

```

```

}
public void buildDisplay(){
}
public Schedule getSchedule(){
    return schedule;
}
public int getNumAgents(){
    return numAgents;
}
public void setNumAgents(int na){
    numAgents = na;
}
}

```

Finalmente en Repast se podrán variar los parámetros del panel de control a través del método `getInitParam` como se muestra en el siguiente código:

```

import uchicago.src.sim.engine.SimModelImpl;
import uchicago.src.sim.engine.Schedule;
public class MyFirstRePastModel extends SimModelImpl {
    private Schedule schedule;
    private int numAgents;
    public String getName(){
        return "Mi Primer Modelo";
    }
    public void setup(){
    }
    public void begin(){
        buildModel();
        buildSchedule();
    }
}

```

```

    buildDisplay();
}
public void buildModel(){
}
public void buildSchedule(){
}
public void buildDisplay(){
}
public Schedule getSchedule(){
    return schedule;
}
public String[] getInitParam(){
    String[] initParams = { "NumAgents" };
    return initParams;
}
public int getNumAgents(){
    return numAgents;
}
public void setNumAgents(int na){
    numAgents = na;
}
}

```

Estas son las formas básicas y la estructura que se requiere para desarrollar un modelo utilizando el ambiente de desarrollo Repast o Trafix.

El modelo que se desarrolló, en este trabajo, tiene como objetivo principal dar a conocer a fondo como está formado y ayudar a la prevención de los accidentes de tránsito, basándonos en la simulación basada en agentes, esto en función de la información que nos proporciona, todo esto soportado por el ambiente de desarrollo Trafrix.

El ambiente Traffix se basa principalmente en la creación de ambientes viales soportada por la simulación basada en agentes, en donde sus principales elementos son: vehículos, conductores y la vía, figura 5.19.

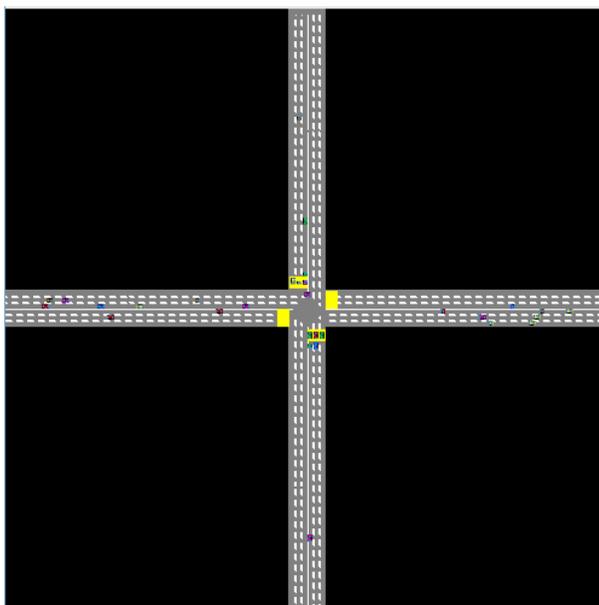


Figura 5.19. Elementos utilizados en el modelo: vehículos, avenidas, conductores y semáforos.²³³

La plataforma de desarrollo Traffix, utiliza los principios de la programación orientada a objetos y el lenguaje de programación Java, tiene clases para cada uno de los elementos del modelo, como son los vehículos, las carreteras, los objetos dentro de las avenidas y lo más importante sus conductores y comportamientos; Traffix trabaja sobre el entorno de desarrollo eclipse (www.eclipse.org), ver figura 5.20.

El ambiente Traffix nos permite desarrollar cualquier tipo de escenario que involucre la interacción entre vehículos, conductores, carreteras y objetos sobre el camino (semáforos, señales, peatones, etc.) y es posible a través de la programación orientada a objetos crear nuevos agentes que intervengan en los escenarios y hacer el modelo tan complejo como sea requerido.

²³³ Elaboración propia.

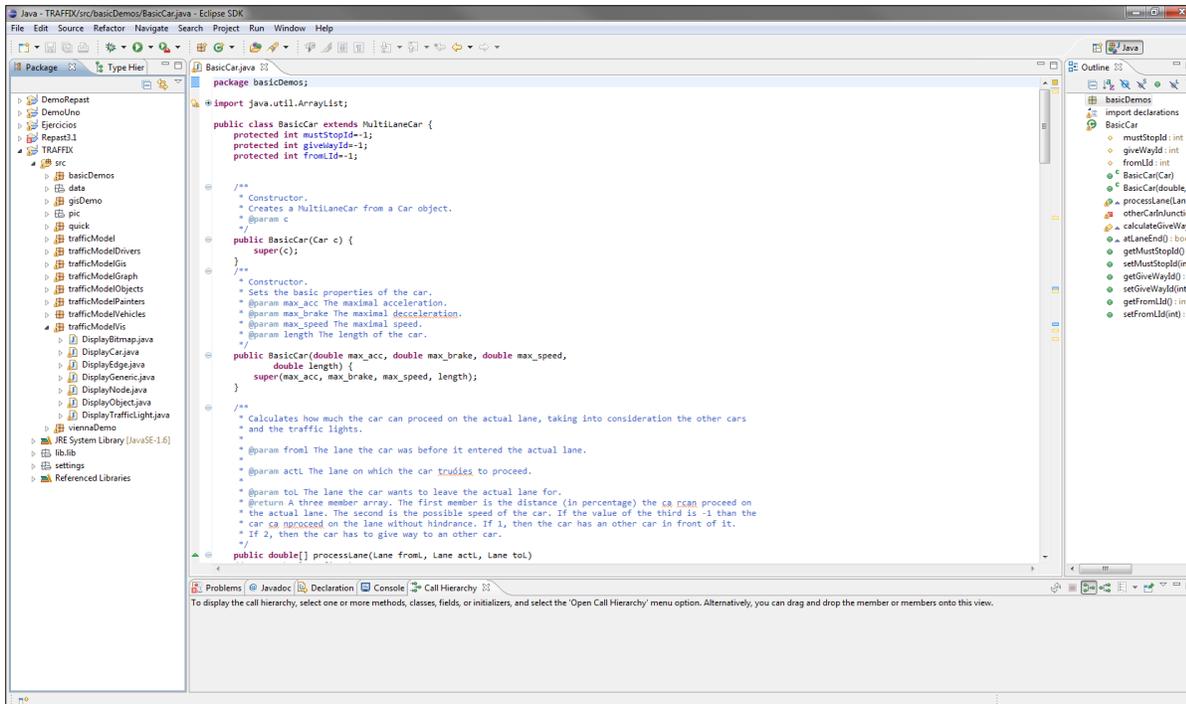


Figura 5.20. Ambiente de desarrollo TrafficX, trabajando sobre la plataforma Eclipse.²³⁴

Este modelo fue desarrollado utilizando las clases principales del programa TrafficX escritas en Java y para la definición de cada elemento solo se hizo extensiones de dichas clases y se les agregaron funcionalidades adicionales. La aportación más importante a esta plataforma fue el desarrollo del módulo de accidentes de tránsito, el cual los contabiliza una vez que dos vehículos tocan el mismo punto.

Funcionamiento del programa.

El principio básico de funcionamiento del modelo es definir cada uno de los elementos de la simulación, definirlos implica ponerle el valor a cada una de sus variables y los procesos que cada uno de estos van a ejecutar, haciendo una extensión de cada una de las clases predefinidas del ambiente de desarrollo; una vez que se define cada uno de los elementos del ambiente de simulación estos se cargan para que todos funcionen e interactúen en el ambiente del modelo, lo

²³⁴ Elaboración propia.

que hace que interactúen es la clase llamada "toolbox" y la clase que carga los elementos se llama "load", de manera gráfica esto se muestra en la figura 5.21.

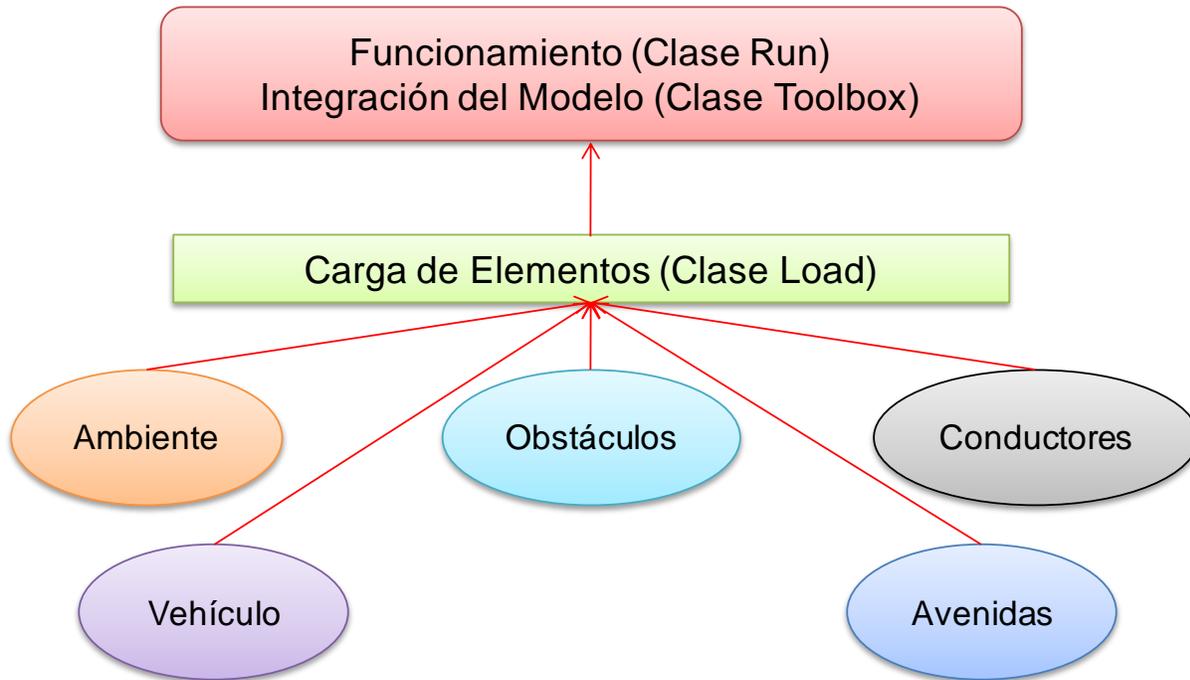


Figura 5.21. Principios de funcionamiento del modelo.²³⁵

Para la creación del nuevo modelo siguiendo el mismo proceso que se sigue en Repast se crea la clase principal que en este caso se llamó "Principal" como una extensión o considerando como su Superclase la llamada "trafficModel.TrafficModel".

Dentro de esta clase "Principal" se incluyó el método 'setup' en el cual se definieron las siguientes características del modelo:

1. El tipo de conductores a utilizar, cuando incluir cada tipo de conductor, de acuerdo con una función de números aleatorios.
2. El número de carros a utilizar y sus colores que se les asignaran.

²³⁵ Elaboración propia.

Además en esta clase "Principal" se incluye:

3. Los parámetros iniciales del modelo a configurar, que es únicamente la distancia entre los vehículos, a través del método `getInitParam()`.
4. Y el nombre del modelo.

Creamos una nueva clase llamada "Ambiente" como una extensión de la clase "Principal" en la cual se definió todo el ambiente grafico del modelo; en esta clase se definieron los siguientes métodos:

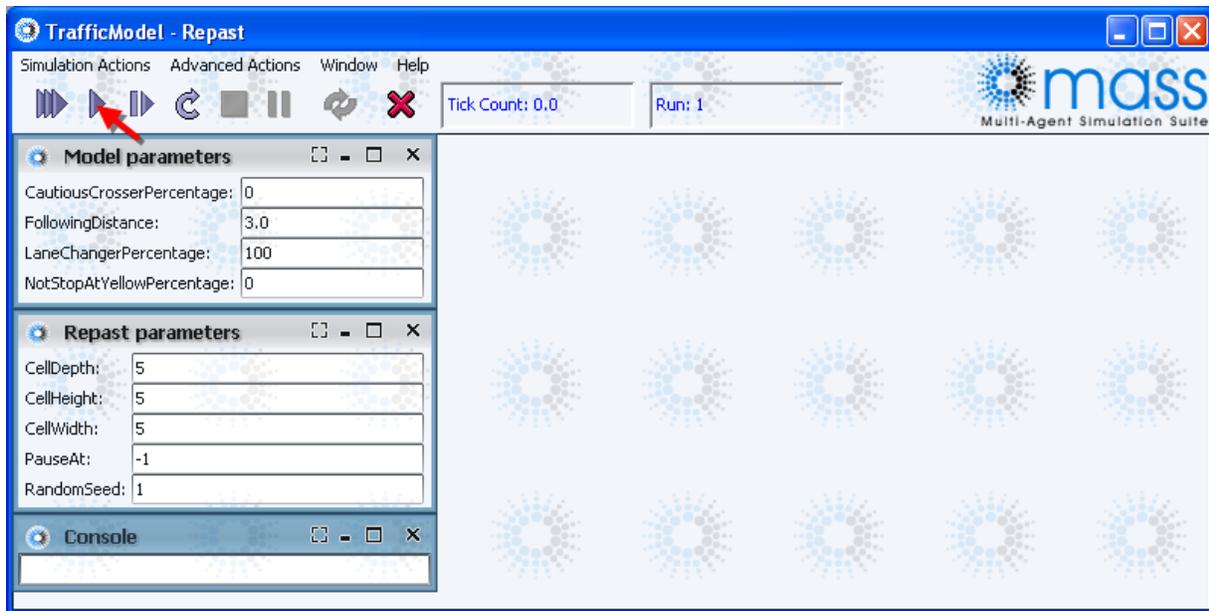
1. Se definió el método `buildDisplay()`, el cual hace que se desplieguen los elementos gráficos, como las avenidas, los carros y los semáforos.
2. Se incluyó el método `begin()`, que como se mencionó anteriormente, es el que se ejecuta cuando inicia el programa. Dentro de este método esta `buildDisplay()`.
3. Se incluyó el método `step()` que es el que hace que se lleve a cabo cada ciclo del modelo.
4. En esta clase también se incluye el método `loadModel()` que es el que carga todos los elementos en el modelo y lo deje listo para ejecutarse.

Se hizo la clase "Vehiculo" esta es una extensión de la clase `MultiLaneCar`, que es un vehículo que puede transitar por varios carriles; en esta clase se definieron sus características como máxima velocidad, aceleración, tipos de vehículos y su comportamiento durante la circulación en el modelo.

Por último, la clase `Runner` que es la encargada de ejecutar el modelo; en esta clase se crea un objeto con el nombre del modelo y se ejecuta el modelo.

Para ejecutar el modelo se oprime el botón en forma de triángulo "start" que es el encargado de dar inicio a la ejecución del modelo, la tabla de control para el modelo y su descripción se muestra en la figura 5.22.

Se debe de oprimir el botón de "start" para dar inicio a la simulación.



- Para detener el modelo debemos de pulsar el botón de pausa “Pause” 
- Para hacer un ciclo del modelo debemos de utilizar el botón “Step” 
- Para detener la simulación debemos de utilizar el botón de detener “Stop” 
- Para resetear el modelo debemos de oprimir el botón de reset “Reset” 
- Para terminar el modelo y la aplicación debemos de oprimir el botón “Exit” 

Figura 5.22. Interface gráfica del programa Traffix.²³⁶

Lo que hace diferente a este tipo de simulación, basada en agentes, de cualquier otro programa es que se representan condiciones o decisiones humanas que en otros ambientes no se hacen, entre ellas tenemos las siguientes:

1. Escogen por anticipado la menor ruta con el mínimo de cambios de carril.
2. El porcentaje de conductores quienes se comportan de cierta manera pueden ser establecidos en cada ciclo de simulación, como por ejemplo que conocen el camino por

²³⁶ John T. Murphy, “A RePast Tutorial, University of Arizona & Arizona State University, 2011”, <http://www.perfectknowledge.com/Tutorials/H2R/HowTo00.htm> , (Consultado Enero, 2011).

adelantado, se pasan los semáforos, son agresivos y tienen variaciones de aceleraciones todo el tiempo, etc.

3. Cruzan las intersecciones de la manera lo más realista posible.
4. Los conductores no tienen una comunicación directamente entre ellos o algún componente del modelo, ellos observan el movimiento de otros vehículos, para implementar estos el ambiente de desarrollo.
5. Los conductores tratan de respetar las rutas de tal manera que eviten en lo posible las colisiones.

A continuación describiremos el funcionamiento del modelo, de manera más detallada, en función de sus métodos principales; en la figura 20 podremos ver su diagrama de clases completo, previamente en sus diagramas de clases de uso se describieron cada una de sus funciones.

Clase Vehiculo.

Esta clase es la responsable de implementar el comportamiento del vehículo. Cada carro tiene un conductor asignado quien determina el curso que el carro seguirá como el cambio de carril, la forma en cómo realizaran los cruces y el respeto de los semáforos.

Esta clase es una extensión de la clase MultiLaneCar que a la vez es una extensión de la clase Car, la clase Car nos genera un vehículo con todas sus características tanto físicas como de comportamiento como sus variables de velocidades, aceleraciones y desaceleraciones, la clase MultiLaneCar nos genera vehículos pero en más de un carril y nuestra clase toma esta última para generar nuestros vehículos que estarán en tres carriles.

Los procesos principales dentro de esta clase y sus funciones se describen a continuación:

En la clase Vehiculo tenemos dos constructores: el primero llama al constructor de la Súper Clase y crea un vehículo que va a circular en una vía de más de un carril y el segundo constructor establece los valores de las principales características del vehículo, como son: máxima aceleración (max_acc), máxima desaceleración (max_brake), máxima velocidad (max_speed) y define en cual carril estará el carro (leght).

El método **processLane**, calcula cuanto del carro puede avanzar sobre su actual tramo de la carretera tomando en cuenta los carros actuales, los objetos sobre la carretera y los semáforos. Las variables importantes son: el carril de donde viene el vehículo (fromL), el carril en el cual está el vehículo actualmente (actL) y el carril a donde va (toL). Este proceso devuelve tres valores de tipo decimal en un arreglo, el primero que devuelve es el porcentaje sobre el carril en que está el vehículo que puede avanzar sin problemas, el segundo es la velocidad del vehículo y el tercero si es -1 el vehículo puede avanzar, si es 1 se tiene un vehículo enfrente y 2 si el vehículo tiene que dar el paso a otro.

El método **calculateGiveWayAtEnd**, determina si el carro tiene que dar el paso a otro vehículo al final de que recorra su tramo. Sus variables principales son: la línea o carril que está dejando (fromL), el carril en el cual se encuentra actualmente (actL) y el carril en el cual pretende ingresar (toL). Devuelve con un valor decimal la distancia que podrá avanzar sobre el carril y la velocidad probable que deberá de tener.

Los siguientes métodos calculan si el carro está en un crucero al final de su línea actual y devuelven un valor verdadero si está en un crucero y al final de su línea actual. Métodos: `atLaneEnd()`, `getMustStopId()`, `setMustStopId()`, `getGiveWayId()`, `setGiveWayId()`, `getFromLId()` y `setFromLId(int fromLId)`, que son métodos de la clase `MultiLineCar` y únicamente se llaman en esta clase. Devuelven un valor verdadero si está en un crucero y falso si no es así.

El método **otherCarinJuntion**, detecta si existe otro carro en la intersección y si es así se detiene. Este método devuelve un valor verdadero si existe otro carro y debe de detenerse.

Clase Principal.

Esta clase es una extensión de la clase `TrafficModel`, que es la clase en donde se concentran las principales funciones del modelo.

Los principales métodos del modelo son las siguientes:

getInitParam: esta método es el que establece las principales funciones del modelo en este caso las funciones serán el nombre del modelo y la característica principal de circulación de los vehículos que este modelo será establecer la distancia entre los vehículo; esta característica se

describe como "followingDistance" y esto se puede cambiar al inicio del modelo. Esta información la devuelve como una cadena de caracteres.

insertNewStatCar: inserta un nuevo vehículo en el modelo estableciendo como uno de sus principales parámetros el carril en el cual empezara a circular, dentro de esta función asignamos el tipo de vehículo que va a circular por la carretera, el método que determina qué tipo de vehículo va a circular inicialmente. El método `Random.uniform.nextIntFromTo(0, 4)` genera números aleatorios y dependiendo del número se va a determinar el tipo de vehículo a circular, si el numero generado es 0 será un Jeep, 1 será una Pickup, 2 será un Truck, 3 será un SlowTruck y 4 un StandarCar; estos tipos ya están predeterminados pero podemos diseñar nuevos e insertarlos en el modelo. Como parámetro de entrada del método es la línea o carril inicial de donde partirá el vehículo y nos va a devolver un objeto del tipo Vehículo que será el tipo de vehículo que entrara en el modelo.

createBasicCarObjectFromItself: le agrega un color de manera aleatorio a los vehículos dentro del modelo, la misma función aleatoria mencionada anteriormente es la que determina el color para cada objeto.

getContainerConfigs: establece el tipo de avenida que se va a utilizar que en este caso es una carretera de cruce "MultiLaneLights"; estos tipos ya están predefinidos pero se pueden diseñar otros a través de la definición de sus coordenadas o introducir un archivo de tipo Shape con la cartografía de las vías.

assignDriver: este método asigna un conductor a cada tipo de vehículo, las características de este conductor son descritas de manera específica y se asignan a cada vehículo de manera aleatoria. En este caso vamos a definir únicamente dos, el primero que tiene propensión a pasarse los altos en un 5% y a rebasar una vez que tiene un vehículo enfrente en un 15%.

desiredMove: calcula la posición actual del carro, su velocidad, aceleración y la ruta determinada por su conductor, donde el carro debería de estar en el siguiente paso. Esta función va a depender del tipo de conductor.

moveCar: investiga si el vehículo puede hacer el movimiento planeado y mueve el carro de acuerdo con esta respuesta.

getContainerConfigs: establece los parámetros de configuración, en este caso se establecen los parámetros para que funcione el cruce de avenidas.

Esta clase tiene el método más importante de este proyecto `setCrashed ()` la que nos determina cuando dos vehículos ocupan una misma posición, que es cuando sucede un accidente. Este método nos genera un archivo de texto el cual nos dice el número de accidentes que sucedieron en un lapso de tiempo determinado.

Clase Ambiente

Parametriza el modelo de acuerdo con programa Repast, modela una red de carreteras de varios carriles.

Es una extensión de la clase Principal y esta clase es la encargada de desplegar gráficamente todos los elementos del modelo. Utiliza los siguientes objetos para desplegar los elementos principales del modelo:

- DisplayCar** Despliega los vehículos.
- DisplayEdge** Despliega los carriles que forman la carretera.
- DisplayNode** Despliega los nodos de las carreteras.
- Display TrafficLight** Despliega los semáforos.

buildDisplay: este método construye en función de las características del modelo todos los elementos gráficos y se apoya en la función `GraphLoader` que es la que carga la parte grafica del modelo.

loadModel: carga el modelo y conecta los parámetros establecidos de cada uno de los elementos a la parte gráfica. Esta función también abre los archivos de texto en los cuales están especificadas los rangos de coordenadas en los cuales se va a desplegar el modelo y el archivo de los semáforos en donde nos dice en donde se van a ubicar y los tiempos de las luces.

Begin: esta función hace que comience la construcción del modelo tomando como referencia la unidad de tiempo `Tick`.

createCarPainter: aplica el color a cada carro de acuerdo con la selección realizada en la clase Principal y es en función de una función de números aleatorios.

Step: es el método que determina cada paso o corrida del modelo.

Setup: es un método de Repast y es el que establece los parámetros iniciales del modelo.

Dentro de esta clase se incluye la asignación de conductores a cada tipo de vehículo; esto se hace de manera aleatoria, un conductor determina el curso que un vehículo toma, también como el cambio de carril, los cruces de intersecciones y el comportamiento al encontrarse frente a un semáforo. Los principales métodos utilizados son:

assignCar: asigna un conductor a un carro de manera aleatoria. Esta función asigna un conductor a cada tipo de vehículo, las características de este conductor son descritas de manera específica y se asignan a cada vehículo de manera aleatoria. En este caso vamos a definir únicamente dos, el primero que tiene propensión a pasarse los altos en un 5% y a rebasar una vez que tiene un vehículo enfrente en un 15%.

isKnowBlockedLanes: determina si el conductor sabe que rutas están bloqueadas.

isLaneCharger: determina si el conductor cambia de carril cuando el paso es bloqueado por un carro detenido o por uno más lento.

isStopAtYellow: determina si el conductor se detiene cuando ve una luz en amarillo o rojo de un semáforo.

isCautionCross: si esa es verdadera el conductor no entra en una intersección hasta que el carro de enfrente deja la intersección.

Clase Runner

Es la clase encargada de correr todo el modelo y contiene el método: `public static void main(String[] args)`, que es el que va a ejecutar el modelo completo.

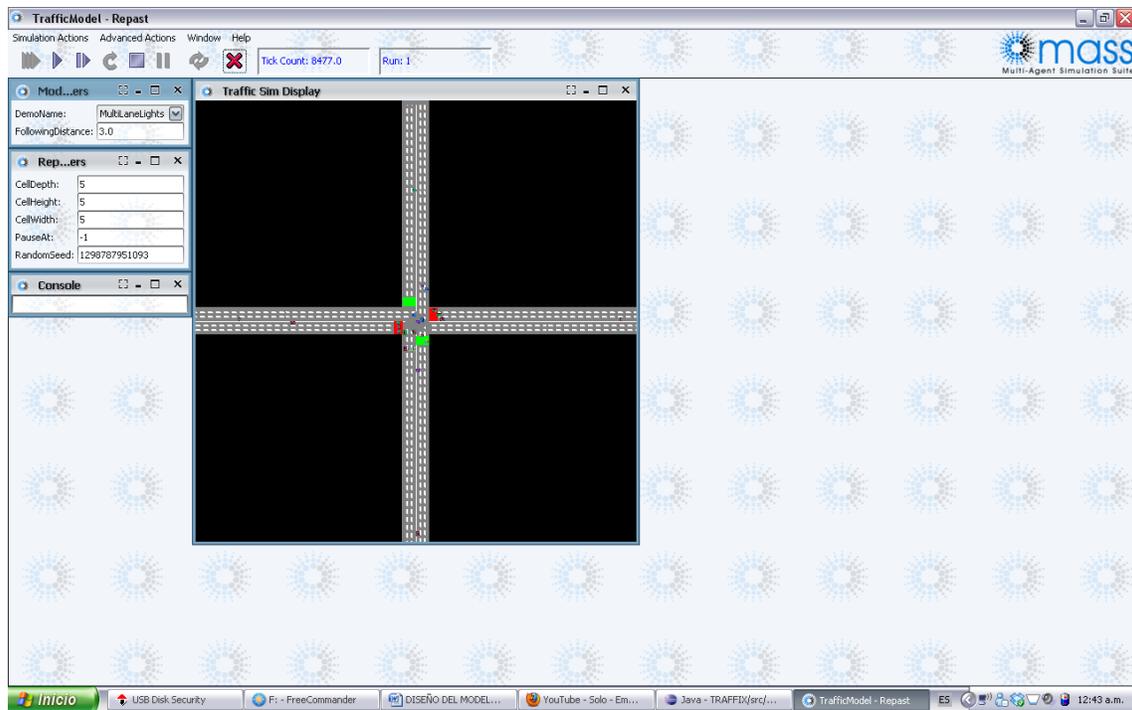


Figura 5.23. Interface del programa Traffix.²³⁷

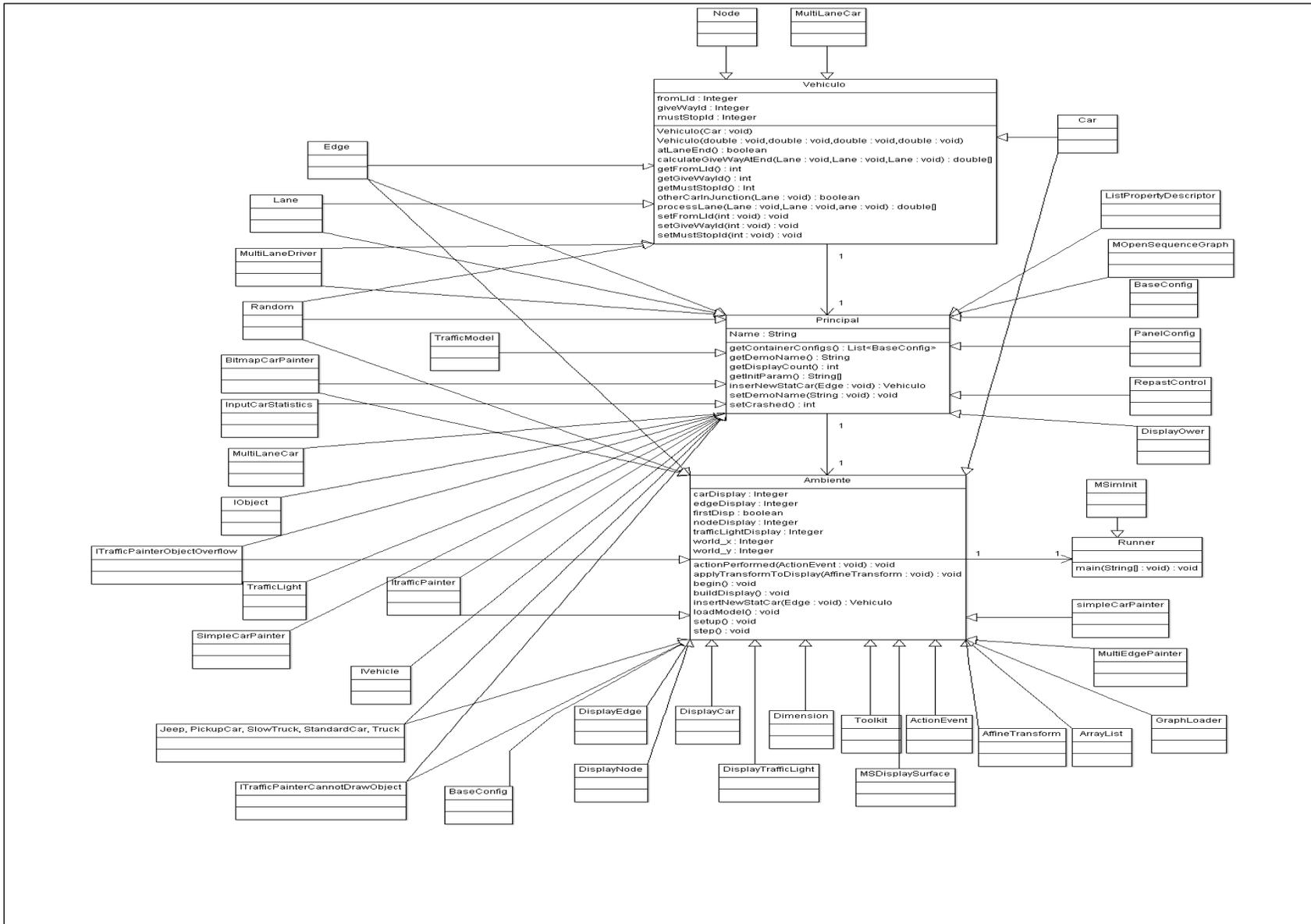
El resultado del programa es un archivo de texto que nos cuenta cuantos eventos del método `setCrased` han ocurrido en un lapso de tiempo determinado.

El diagrama de clases final del modelo se muestra en la figura 5.24.

Cada uno de los eventos y procesos del modelo se manejan de manera independiente a través de la generación de números aleatorios llamada **random**.

En la figura 5.25 se muestra un diagrama de secuencias del funcionamiento del modelo, este dentro del lenguaje unificado de modelación utilizado en la descripción del sistema y en la figura 5.26 el diagrama de actividades del funcionamiento únicamente del vehículo y el conductor dentro del sistema.

²³⁷ Elaboración propia.



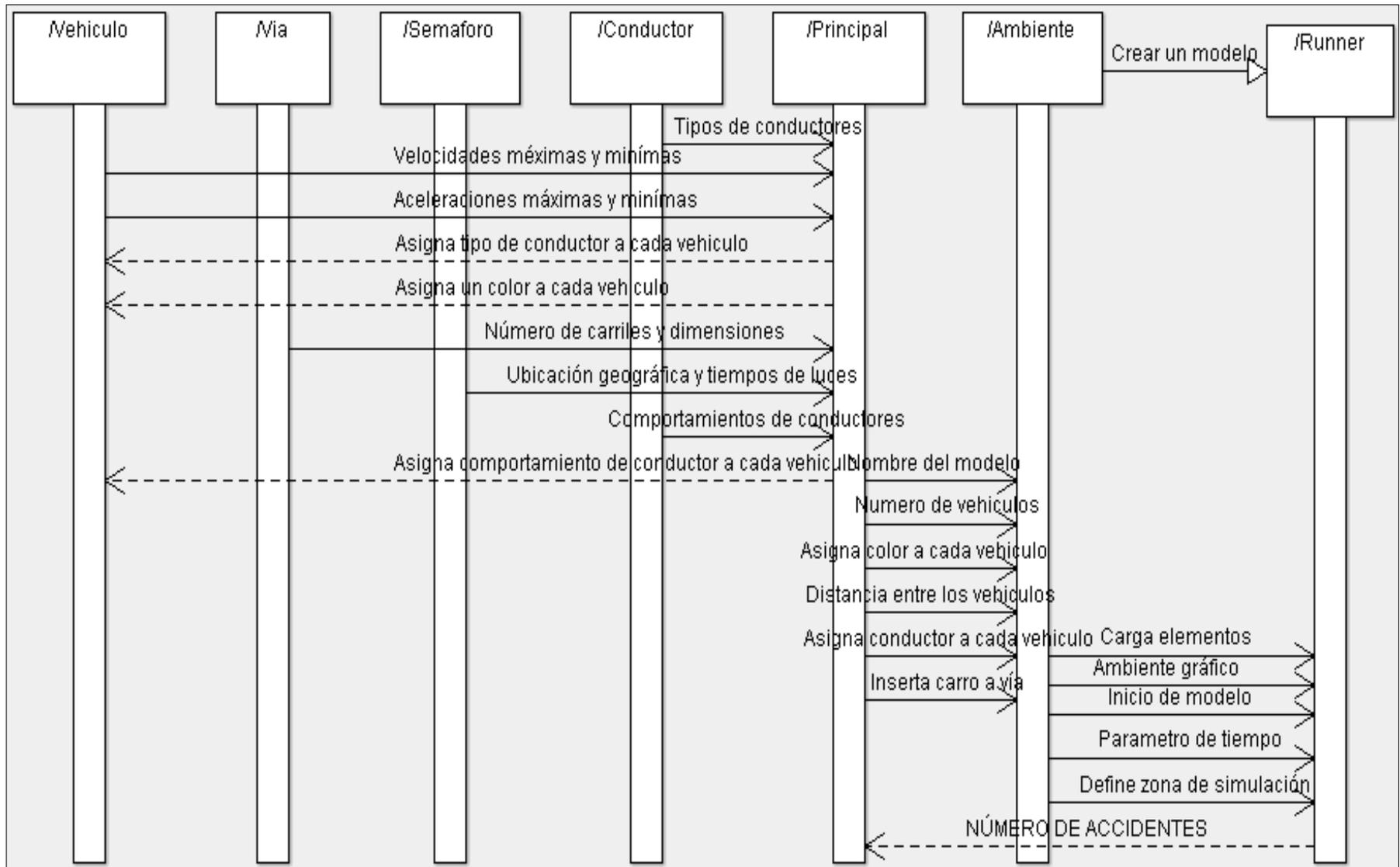


Figura 5.25. Diagrama de secuencias.²³⁹

²³⁹ Elaboración propia.

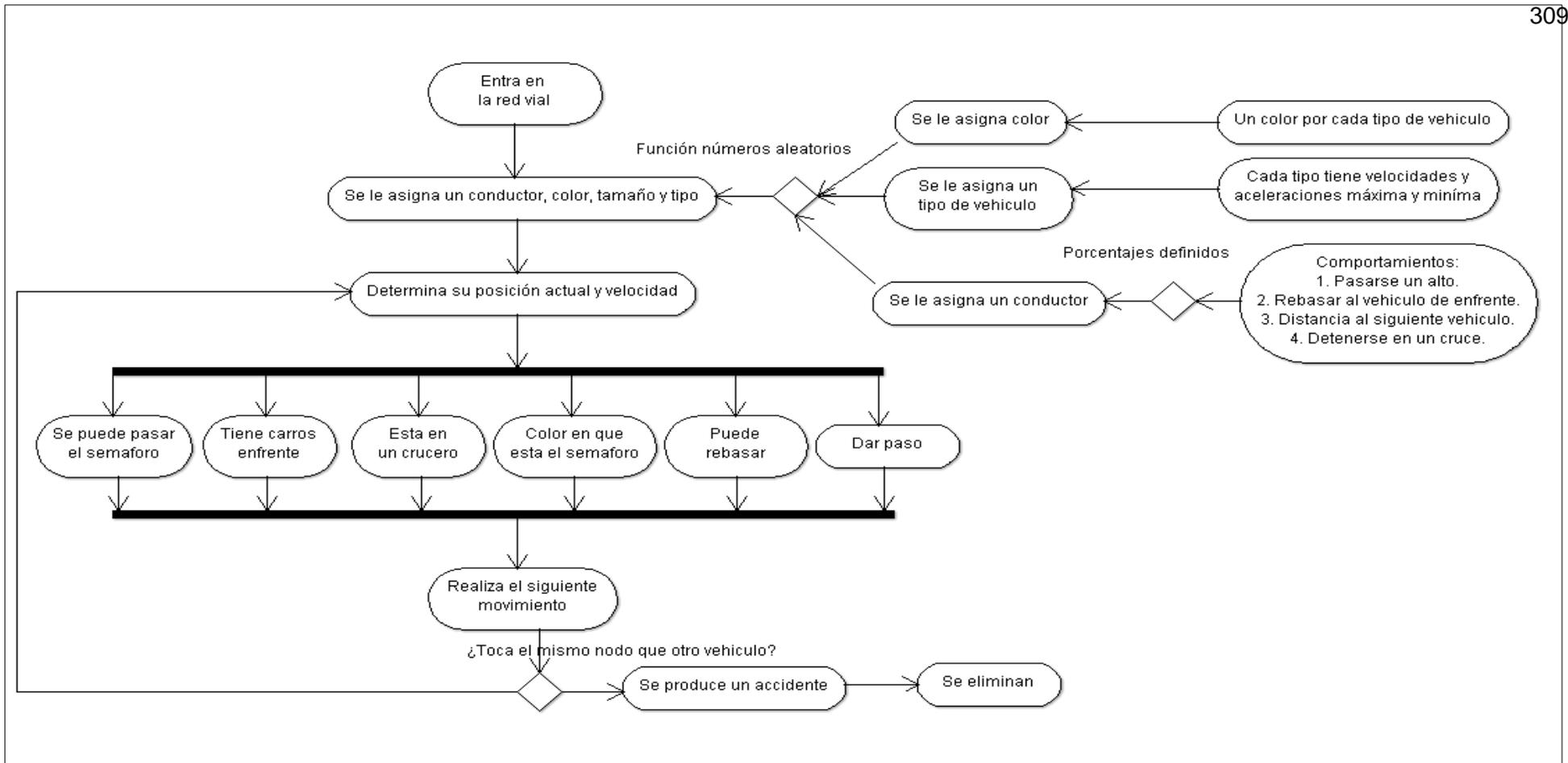


Figura 5.26. Diagrama de actividades del funcionamiento de los vehículos.²⁴⁰

²⁴⁰ Elaboración propia.

5.4.5. Información para alimentar al modelo.

Con el fin de alimentar el modelo, con información real del ambiente a simular, se utilizaron diferentes técnicas; una fue a través de la toma de información en campo y la otra fue la obtenida a través de documentos y proporcionada por una Empresa de consultoría en el tema de diseño de redes de transporte.

Las informaciones de las variables que se tomaron, fueron las siguientes:

1. Aforo vehicular, para los diferentes cruces en estudio y a lo largo de los principales tramos de la vía en estudio.
2. Se consideran dentro del modelo cinco tipos de vehículos los cuales son:
 - 2.1. Standar car.- Son los carros estándar, tipo sedán, normalmente particulares.
 - 2.2. Jeep.- Son los carros estándar tipo camionetas, normalmente particulares.
 - 2.3. Pick up.- Son las camionetas de transporte público, pero los vehículos son camionetas.
 - 2.4. Slow Truck.- Son vehículos de carga que son de alguna Empresa, que transportan mercancías o productos que distribuyen.
 - 2.5. Truck.- Son camiones de pasajeros, grandes, de Compañías privadas.
3. Velocidades máximas de cuatro tipos de vehículos, que se utilizaran en el modelo.
4. En base a la velocidad máxima determinada y considerando la velocidad final de cero y el tamaño del vehículo, se calculó la desaceleración para cada vehículo.
5. Pendientes de la avenida, las subidas y bajadas a lo largo del corredor en estudio; esta se obtuvo de un mapa de curvas de nivel proporcionado por el INEGI²⁴¹.

Cálculo del tamaño de la muestra. Para facilitar el cálculo del tamaño de la muestra, se supuso una distribución normal del parámetro estudiado y un muestreo aleatorio irrestricto, por simplicidad, supusimos una población infinita, el tamaño de la muestra se calculó de acuerdo con la siguiente ecuación:

²⁴¹ Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), "Cartas Topograficas", <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/detalle2.aspx?c=2354&upc=0&s=geo&tq=999&f=2&cl=0&pf=Prod&ef=0&ct=206000000>, (Consultado Noviembre 5, 2014).

$$n = (Zs)^2 / EX$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra.

Z = Coeficiente de la distribución normal, el cual es función del nivel de confianza seleccionado, que en este caso se estimó de 1.96 para un porcentaje de confiabilidad del 95 %.

X = Media de la muestra.

s = Desviación estándar de la muestra.

E = Error máximo aceptable de la estimación, que en este caso se consideró de un 5%.

Ejemplo de cálculo:

En el aforo vehicular del cruce de la Avenida Insurgentes Norte y Avenida Ticoman se contó en promedio 18 vehículos por minuto, con una desviación estándar de 2, en función de estos datos y considerando una Z= 1.96, lo que nos representa una confiabilidad del 95 % y un error máximo aceptable del 5% se determinó el siguiente número de observaciones:

$$n = (1.96*2)^2 / (0.05*18) = 17.02 = 18 \text{ muestras}$$

Aforo vehicular.- El aforo vehicular es el número de vehículos que pasan por unidad de tiempo, que en este caso se consideró un minuto. Los aforos vehiculares se calcularon colocándose una persona en el cruce en estudio y con un contador manual y un cronometro, se determinó el número de vehículos que pasaban por minuto. El tamaño de la muestra se determinó de acuerdo con la fórmula antes señalada.

Una vez que se obtuvieron las muestras se sacó un promedio obteniendo los valores finales.

Los aforos vehiculares que se determinaron por crucero fueron los siguientes:

Intersección	Calle 1	Calle 2	Aforo vehicular
1	Av. Insurgentes Norte	Eje 5 Norte Av. Montevideo	50
2	Av. Insurgentes Norte	Av. Acueducto de Guadalupe	45
3	Av. Insurgentes Norte	Eje 4 Norte Av. Euzkaro	40
4	Av. Insurgentes Norte	Av. Ticoman	20
5	Av. Insurgentes Norte	Av. Ferrocarril Industrial (Clave)	15
6	Av. Insurgentes Norte	Circuito Interior	25
7	Av. Insurgentes Norte	Poniente 112	15
8	Av. Insurgentes Norte	Fortuna	10
9	Av. Insurgentes Norte	Av. Cuitlahuac	9
10	Av. Insurgentes Norte	Moctezuma	10
11	Av. Insurgentes Norte	Tenochtitlan	8
12	Av. Insurgentes Norte	Excelsior	7
	Total de accidentes en los cruceros		254

Tabla 5.8. Aforos vehiculares por crucero.²⁴²

Calculo de velocidades máximas.- La velocidades máximas se determinaron utilizando equipos GPS, recorriendo la Avenida en el tramo de estudio, para el caso de vehículo estándar (Standar car) y camioneta privada (Jeep), para el caso de los vehículos de transporte público (Pick Up y Truck) y los vehículos de carga (Slow truck) se utilizó un vehículo piloto el cual determino la velocidad máxima, con el apoyo del GPS, este realizó la función de seguir a vehículos similares así como realizar sus paradas.

La velocidad a flujo libre FFS se puede determinar directamente de un estudio de velocidad dirigida en campo, en una sección representativa del segmento carretero evaluado, durante periodos de flujo de tránsito, tomando una muestra representativa de al menos 100 vehículos; esta es la recomendación que se nos hace en el libro Ingeniería de Tránsito.²⁴³

Calculo de desaceleraciones.- Para el cálculo de las desaceleraciones consideramos como la velocidad inicial la velocidad máxima y como velocidad final cero y como distancia el tamaño del vehículo, con estos datos determinamos la desaceleración, utilizando la siguiente formula:

²⁴² Diseño propio.

²⁴³ Rafael Cal y Mayor, *Ingeniería de Tránsito, fundamentos y aplicaciones*, México, D.F.: Editorial Alfoomega, 2007, 275-290.

$$V_f^2 - V_o^2 = 2*d*a$$

De donde:

V_f = Velocidad final.

V_o = Velocidad inicial.

d = Distancia o longitud del vehículo.

a = Aceleración.

De donde despejamos la aceleración y por tratarse de un valor negativo es desaceleración.

Velocidades:	
Jeep	
Máxima (km/hr):	45
Mínima (km/hr):	0
Pick up	
Máxima (km/hr):	35
Mínima (km/hr):	0
SlowTruck	
Máxima (km/hr):	25
Mínima (km/hr):	0
Standard car	
Máxima (km/hr):	50
Mínima (km/hr):	0
Truck	
Máxima (km/hr):	25
Mínima (km/hr):	0
Desaceleraciones:	
Jeep (Km/hr ²)	3
Pick up (Km/hr ²)	2
Slow truck (Km/hr ²)	2
Standar car (Km/hr ²)	2
Truck (Km/hr ²)	2

Tabla 5.9. Velocidades y desaceleraciones determinadas.

Los valores del porcentaje a pasarse los semáforos y de distracción se consideraron de un 5%; este valor fue arbitrario y para poder determinar este valor, se tiene que realizar otro tipo de estudios fuera del alcance de este trabajo.

Otra de las fuentes de información fue la proporcionada por una Empresa de Consultoría en diseño de redes de transporte, la cual realizó una serie de levantamientos para el diseño del sistema de transporte de metrobus que correrá por las vías en estudio, la información que nos proporcionó fue la siguiente:

1. Velocidades por tramo de la vía en kilómetros por hora.
2. Carga o densidad de vehículos por hora.

Estas fueron contrastadas con las obtenidas en campo y algunas fueron promediadas. En las figuras 5.27 y 5.28 muestran mapas temáticos con la información proporcionada.

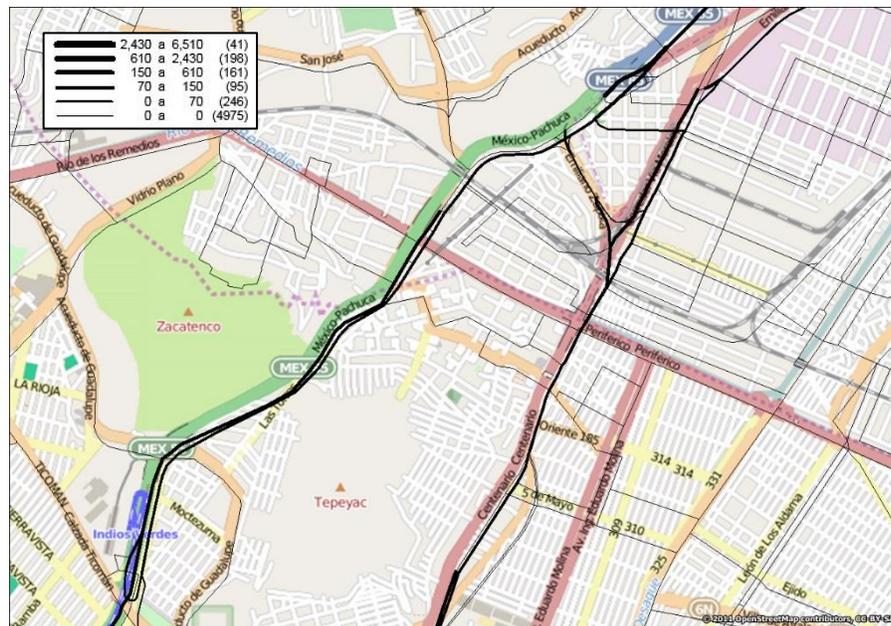


Figura 5.27. Carga vehicular en número de vehículos por hora.

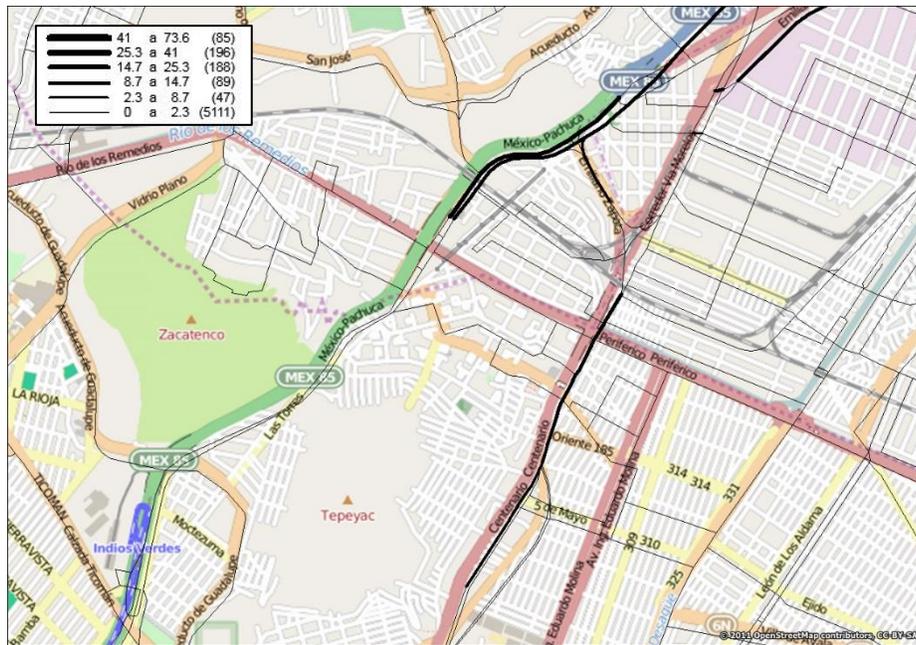


Figura 5.28. Velocidades de los vehículos en kilómetros por hora.

Como podemos ver en las figuras antes mostradas a medida que se incrementa el flujo vehicular la velocidad disminuye, lo que concuerda con la información que se recopiló en campo.

Con el fin de introducir la variable de la pendiente dentro del modelo, se utilizó la información sobre las curvas de nivel, obtenida del portal del Instituto de Estadística y Geografía (INEGI)²⁴⁴, en función de la información del cambio de niveles se afectó las aceleraciones y desaceleraciones de los vehículos, de subida se disminuyó la velocidad y de bajada se incrementó y en el caso de las desaceleraciones el comportamiento fue inverso. En la figura 5.29 se muestran las curvas de nivel utilizadas.

²⁴⁴ Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), "Cartas Topográficas", <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/detalle2.aspx?c=2354&upc=0&s=geo&tg=999&f=2&cl=0&pf=Prod&ef=0&ct=206000000>, (Consultado Noviembre 5, 2014).

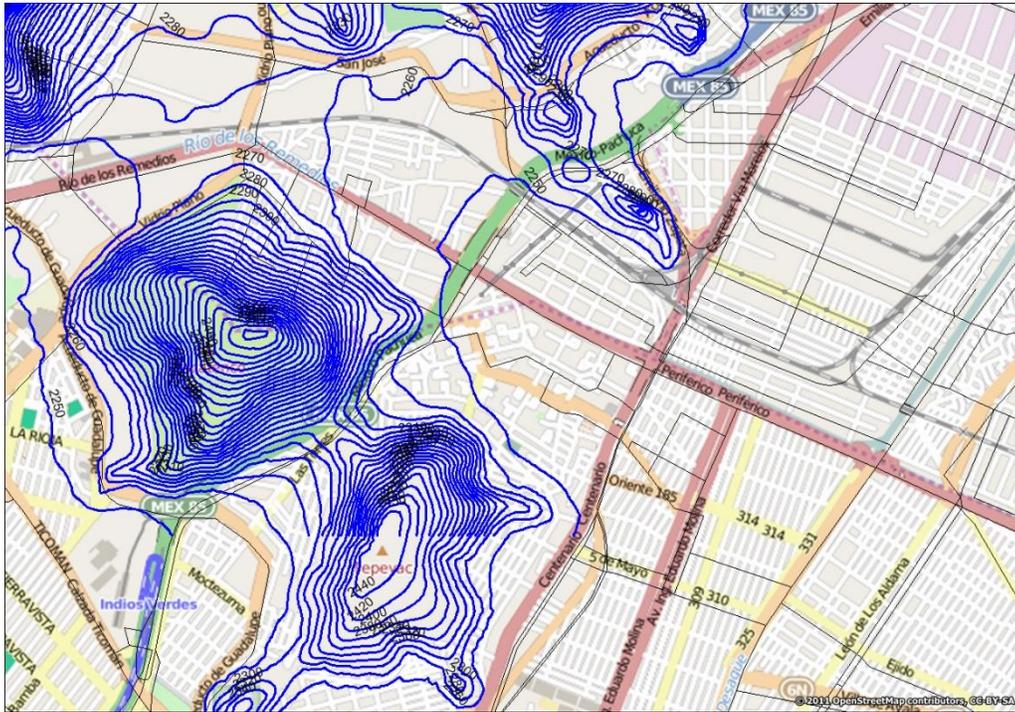


Figura 5.29. Curvas de nivel de la zona de estudio.

5.4.6. Verificación y calibración del modelo.

El uso de la simulación es un sustituto para la experimentación de un fenómeno real (existente o propuesto), donde la experimentación con el fenómeno pudiera ser disruptiva, no es costeable o no factible. El modelo debe de ser capaz de proporcionar una representación valida del fenómeno actual. Los pasos de verificación y validación de una simulación aseguran que el modelo representará exactamente el fenómeno real. Estos no solo aseguran que las asunciones del modelo son correctas, completas y consistentes, además mejoran la confianza de los usuarios en los resultados. Cuando nosotros hablamos acerca de la verificación y validación del modelo, nos permite tener en mente los siguientes elementos:

- a. Los pasos de verificación y validación establecen la fiabilidad del modelo y de la simulación que representan la realidad. La verificación y validación nos proporcionan una crucial pieza de evidencia para soportar la credibilidad del modelo para una particular aplicación de simulación.

- b. Lo fácil o difícil del proceso de verificación y validación depende de la complejidad del fenómeno a ser modelado.
- c. La simulación de fenómenos complejos puede solo aproximarse al fenómeno actual no importando cuanto tiempo y dinero sea gastado en la construcción del simulador. No existe una absoluta validación de la simulación, aunque es deseado, un modelo de simulación es una abstracción y simplificación de la realidad.
- d. Una simulación debe ser siempre desarrollada para objetivos particulares, así que la verificación y validación debe de realizarse para esos objetivos no puede ser para otros.

Con el fin de evaluar el comportamiento del modelo en relación a la realidad, repetimos los experimentos desarrollado por la Empresa AITIA, S.A. de C.V., de la plataforma Traffix, el cual fue publicado en un artículo titulado: “Traffix: Un entorno para el desarrollo de modelos de trafico basados en agentes”²⁴⁵; este experimento es el siguiente:

En la teoría clásica del tráfico las medidas básicas de circulación vial son la velocidad del tráfico (V), la densidad del tráfico (K) y el flujo de tráfico (Q). La densidad se mide por el número de vehículos por unidad de distancia (vehículo / km), mientras que el flujo de tráfico puede definirse como el número de automóviles que pasan por un punto dado (o un conjunto de estos puntos) por una unidad de tiempo. El flujo se puede derivar a partir del producto de la velocidad y densidad, y por lo tanto, su medida es de vehículos / hora: $Q = V * K$. Esta ecuación es fácilmente utilizada para conectar el flujo y la velocidad o el flujo y la densidad. Sin embargo, la vinculación de la densidad y la velocidad es menos obvia. Greenshields²⁴⁶ utiliza la siguiente función lineal:

$$V = V_{\max} (1 - (K/K_d)) \quad (1)$$

La velocidad de tráfico disminuye desde su valor máximo teórico (V_{\max}) como la densidad va aumentando y llegando a su máxima (la densidad máxima en la que los vehículos quedan detenidos). La idea aquí es que a medida que aumenta la densidad, los conductores

²⁴⁵ Balázs Bálint and László Gulyás, “Traffix: a Framework for Agent-Based Traffic Simulations”, (In Proceedings of the 5th European Social Simulation Association Conference (ESSA 2008), Brescia, Italy, 29th October, 2008).

²⁴⁶ Erhart Sz, “Motorist Conquest in Budapest”, Aitia Company, http://www.erhartsz.extra.hu/Motorist_conquest_en.pdf, (Consultado Enero, 2011).

tienen que mantener los ojos en los vehículos de más y más y como consecuencia disminuir su velocidad. También es necesario frenar con más frecuencia e intensidad. Como resultado, la velocidad del tráfico disminuye. La combinación de las dos ecuaciones anteriores nos da como resultado:

$$Q = V_{\max} (1 - (K/K_d)) * K = V_{\max} (K - (K^2/K_d)) \quad (2)$$

A medida que la densidad aumenta, el flujo de tráfico primero aumenta hasta su máximo, luego disminuye. El umbral denota la capacidad del sistema de carretera o camino y se denota a menudo por el índice de corriente alterna. El flujo de tráfico se vuelve inestable a nivel de la capacidad, y si la densidad aumenta aún más el flujo comienza a caer a un lado la inclinación hacia atrás de la curva. Muchos intentos se han hecho para perfeccionar las relaciones entre la densidad y la velocidad, pero las relaciones generales quedan establecidas. El tráfico desacelera si la densidad aumenta y el flujo es igual al producto de la velocidad y la densidad (Ver figura 5.30).

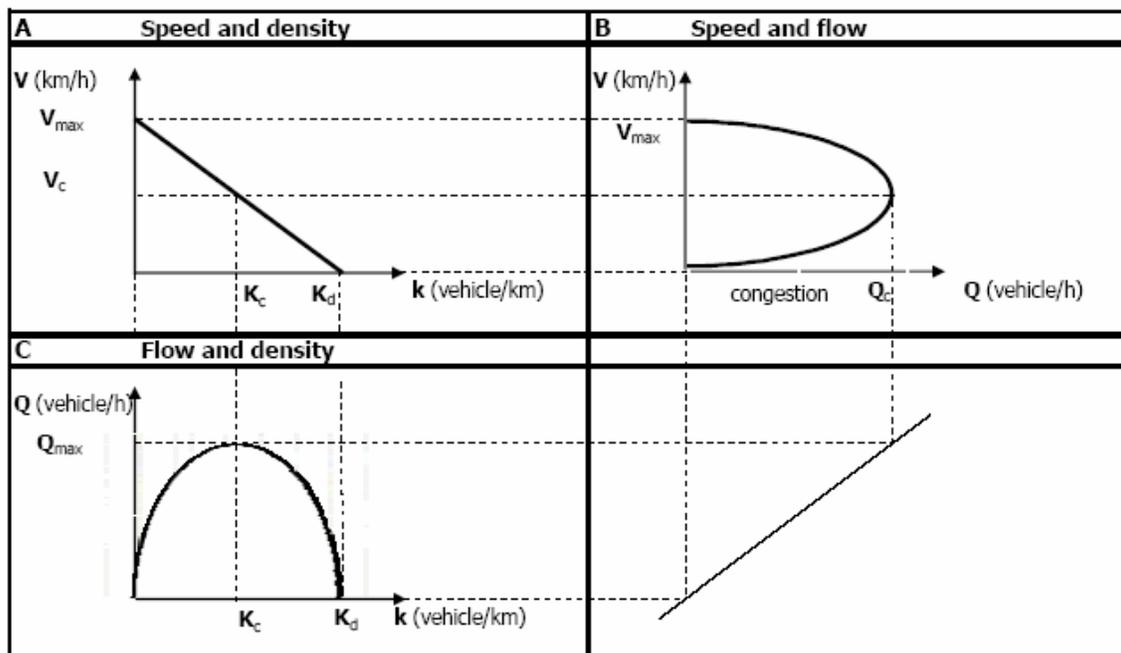


Figura 5.30. Relación entre la velocidad de tráfico, densidad y flujo.²⁴⁷

²⁴⁷ Balázs Bálint and László Gulyás, "Traffix: a Framework for Agent-Based Traffic Simulations", (In Proceedings of the 5th European Social Simulation Association Conference (ESSA 2008), Brescia, Italy, 29th October, 2008).

Con el fin de validar el comportamiento del modelo con respecto a la realidad, la cual se comporta de acuerdo con las teorías antes expuestas, medimos la velocidad en unidades de distancia por pasos (steps) de simulación y la densidad en número de carros por cada 1,000 unidades de distancia y el flujo en número de carros por cada 5,000 pasos de simulación.

Se estudiaron diferentes escenarios con diferentes densidades de entrada. La frecuencia de entrada de los carros se fue modificando en un lapso de 5 a 70 pasos (steps) en cada punto de entrada.

La información se empezó a recopilar desde un punto inicial de 500 pasos de tiempo (steps) y el último se tomó para 5,000 iteraciones. Este proceso fue repetido en 5 corridas de simulación con los parámetros antes establecidos obteniendo los resultados mostrados en la figura 5.31.

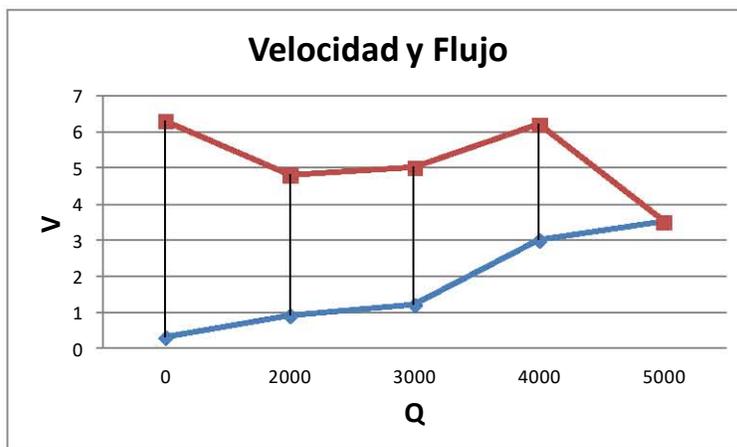
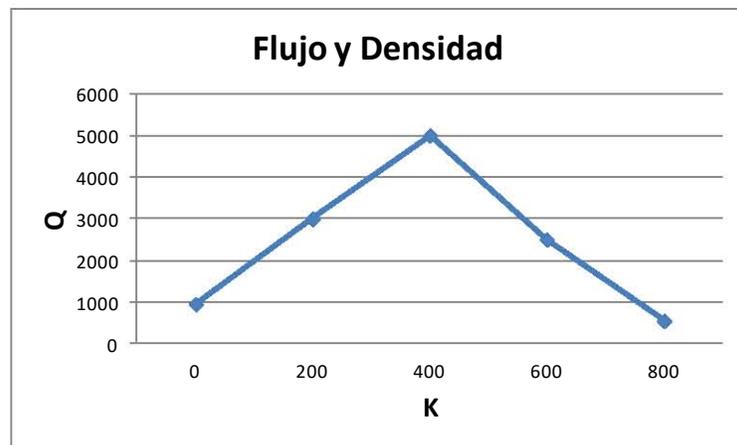
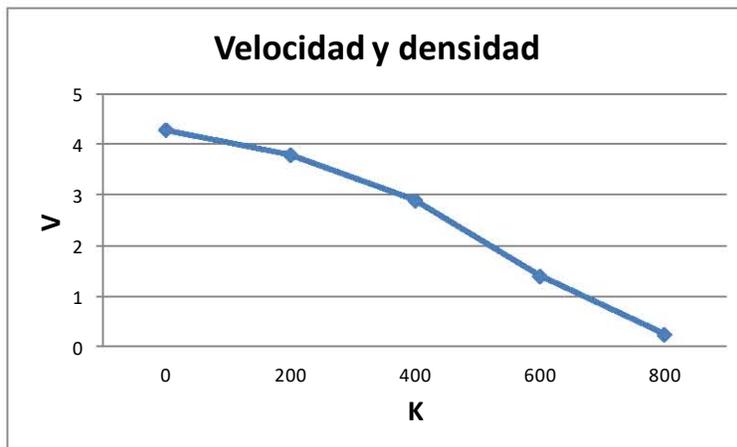


Figura 5.31. Comportamiento del modelo de la relación entre las variables: velocidad, flujo y densidad.²⁴⁸

²⁴⁸ Elaboración propia.

Como vemos las curvas que nos proporciona el modelo están de acuerdo con los comportamientos que nos muestra la teoría antes expuesta, por lo que podemos decir que el modelo se apega al comportamiento real. Esto quiere decir que la plataforma que estamos utilizando para la elaboración del modelo sigue el comportamiento en sus parámetros de un ambiente vial real, lo que nos garantiza que cualquier adaptación que hagamos sobre este será válida.

Para realizar estos cambios la plataforma de desarrollo Traffix cuenta con archivos de texto en los cuales se introducen las variables del comportamiento del modelo, las cuales se fueron cambiando con el fin de representar los ambientes antes mencionados.

Algunas imágenes de este comportamiento se muestran en las figuras 5.32 y 5.33, en las cuales se ve que conforme va creciendo la cantidad de vehículos por hora y por kilómetro la velocidad va disminuyendo hasta quedar casi detenidos.

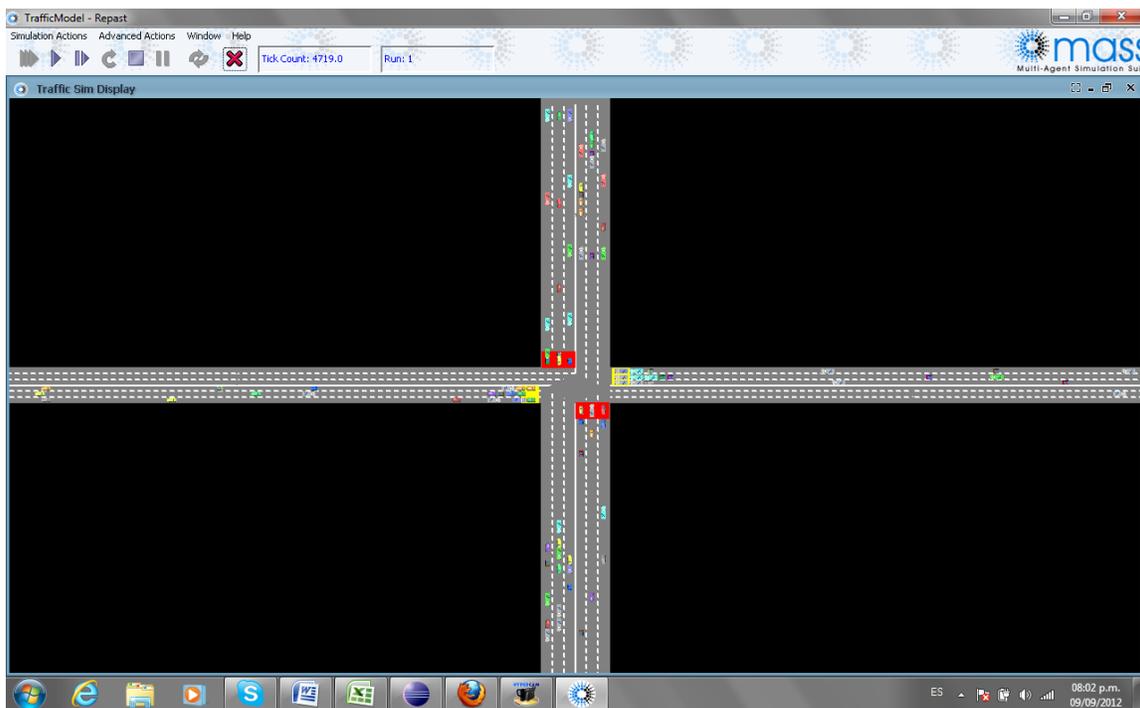


Figura 5.32. Se observa como las avenidas se están poblando de vehículos.²⁴⁹

²⁴⁹ Elaboración propia.

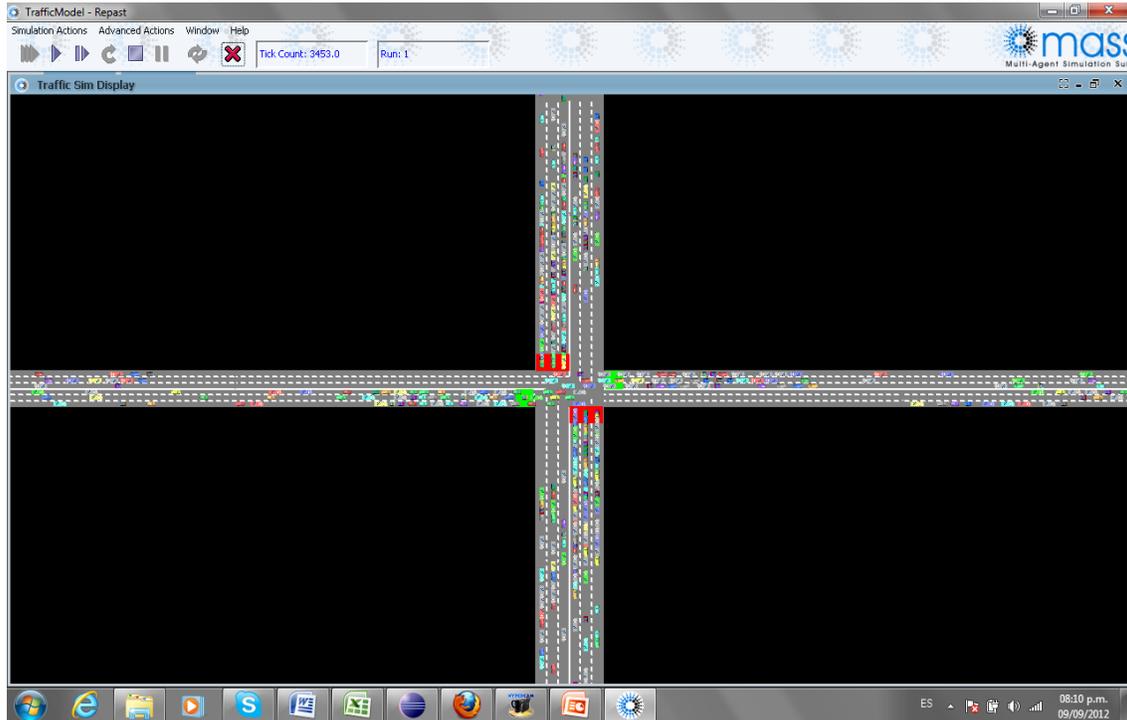


Figura 5.33. Conforme aumenta la cantidad de vehículos la velocidad disminuye.²⁵⁰

Una vez que el modelo fue validado y que vemos que se comporta de acuerdo con la realidad, el siguiente paso fue su calibración. La calibración es el ajustar los diferentes parámetros del modelo de tal forma que el resultado se aproxime a un valor lo más cercano al real, es decir, una vez que el modelo fue alimentado con datos reales y se ejecuta durante ciertos periodos de tiempo, se obtuvo el número de accidentes, el cual se comparó a los datos reales y para calibrarlo se debieron ajustar aquellos parámetros que no fueron determinados con certeza, como el porcentaje de distracción y la propensión a no respetar los señalamientos, haciendo este ajuste lo que se busca es que los resultados del modelo se apeguen a los valores reales, con la observación que la diferencia que se obtiene puede deberse a otros factores que no se incluyeron en el modelo, como los baches en las vías, las condiciones ambientales, entre otras cosas. Este proceso se explica más a detalle en el siguiente punto.

²⁵⁰ Elaboración propia.

5.4.7. Prueba del modelo con datos reales.

Una vez que se validó el funcionamiento de cada uno de los elementos o de los agentes del modelo y que se definieron las características y variables de cada uno de estos, se armó un modelo de parte del corredor Insurgentes Norte; este opera bajo las reglas señaladas en el punto 5.4.4.4, la interface gráfica del modelo se muestra en la figura 5.34.

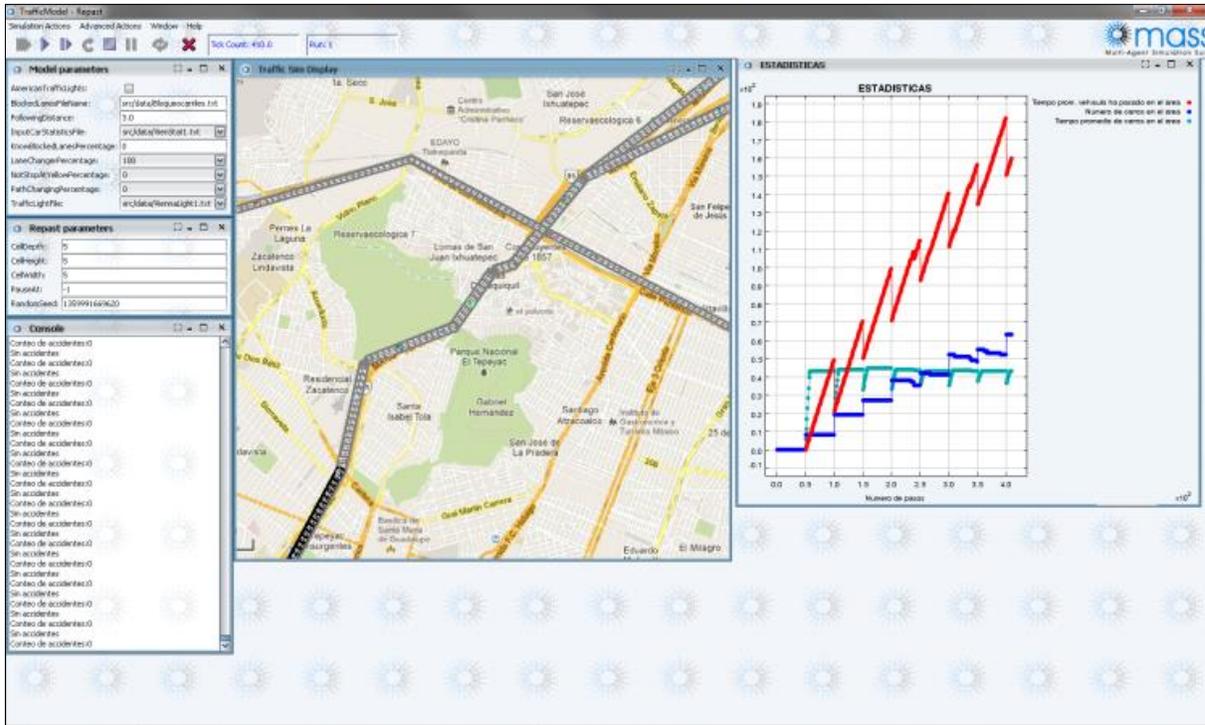


Figura 5.34. Interface gráfica del modelo del corredor Insurgentes Norte.²⁵¹

La interface gráfica del modelo está formada de cuatro ventanas, la primera por dos llamadas “Model parameters” y “Repast parameters”, en estas se establecen los parámetros iniciales del modelo, como son las distancias entre los vehículos, el porcentaje de los carriles que se bloquean, el porcentaje de autos que se cambian de carril, el porcentaje de vehículos que se detienen cuando encuentran semáforos y se selecciona el archivo con los parámetros de los semáforos. La segunda llamada “Console” nos muestra la salida de la consola del programa; en esta se imprime un contador del número de accidentes que suceden. La tercera

²⁵¹ Elaboración propia.

llamada “Traffic Sim Display” nos muestra la parte gráfica del modelo en el cual se muestra parte del corredor Insurgentes Norte; este corredor se representa desde la parte en que termina la Autopista México Pachuca hasta el paradero del Metro Indios Verdes, que es la zona con la mayor cantidad de tráfico y donde se registra la mayor cantidad de accidentes. La última es la llamada “ESTADÍSTICAS”, muestra de manera gráfica los parámetros del tiempo promedio que los vehículos han pasado en el área, el número de carros y el tiempo promedio de los carros en el área.

En este modelo se simularon las condiciones en este corredor que se presentan en un horario de las 6:30 a.m. a las 8:30 a.m. que es la zona de máxima afluencia y en el que se da la mayor cantidad de accidentes, esto de acuerdo con la información recopilada de los horarios en que suceden los accidentes en el IFAI.

Las condiciones con que se alimentó el modelo se muestran en las tablas 5.10.

Dentro de estas condiciones se simularon 4 tipos de vehículos, con velocidades máximas en promedio de 50 Km/hr y velocidad mínima de 0 Km/hr, las desaceleraciones fueron para todos los vehículos de 3 Km/hr². El conductor se fijó que puede rebasar cuando un vehículo se detenga en frente de él, que tome la ruta más corta, la probabilidad de pasarse un semáforo fue de un 5%, la distancia entre vehículos de medio metro, el factor de distracción de un 5% y se corrió el modelo en 50,000 steps que equivaldría a un tiempo de 34 días. Estos parámetros se tomaron de manera aleatoria y en realidad se tendrían que realizar algunos estudios psicológicos para determinar con exactitud estos. Lo importante en el caso de considerar estos es ver su efecto que tienen sobre la generación de los accidentes de tránsito.

Una situación adicional que se incluyó en el modelo fue que a esa hora en la lateral del paradero del Metro Indios Verdes, el transporte público ocupa 3 de los 4 carriles, lo cual ocasiona que el tráfico se incremente; esto se modela bloqueando tres carriles del corredor. Esto se puede ver en la interface gráfica en la figura 5.35.

Hora:	07:30 a. m.
Tipos de vehículos:	Jeep, Pick up, slow truck, standard car y truck
Velocidades:	
Jeep	
Máxima (km/hr):	45
Mínima (km/hr):	0
Pick up	
Máxima (km/hr):	35
Mínima (km/hr):	0
SlowTruck	
Máxima (km/hr):	25
Mínima (km/hr):	0
Standard car	
Máxima (km/hr):	50
Mínima (km/hr):	0
Truck	
Máxima (km/hr):	25
Mínima (km/hr):	0
Desaceleraciones:	
Jeep (Km/hr ²)	3
Pick up (Km/hr ²)	2
Slow truck (Km/hr ²)	2
Standar car (Km/hr ²)	2
Truck (Km/hr ²)	2
Características del conductor:	
Rebasar:	Cuando se detenga el vehículo de enfrente y tenga oportunidad.
Ruta:	La mas corta
Probabilidad de pasarse un semáforo (%):	5
Distancia al próximo vehículo (m):	0.5
Factor de distracción (%):	5
Tiempo de corrida (steps):	50,000

Tabla 5.10. Información inicial con que se alimentó el modelo.²⁵²

²⁵² Elaboración propia.

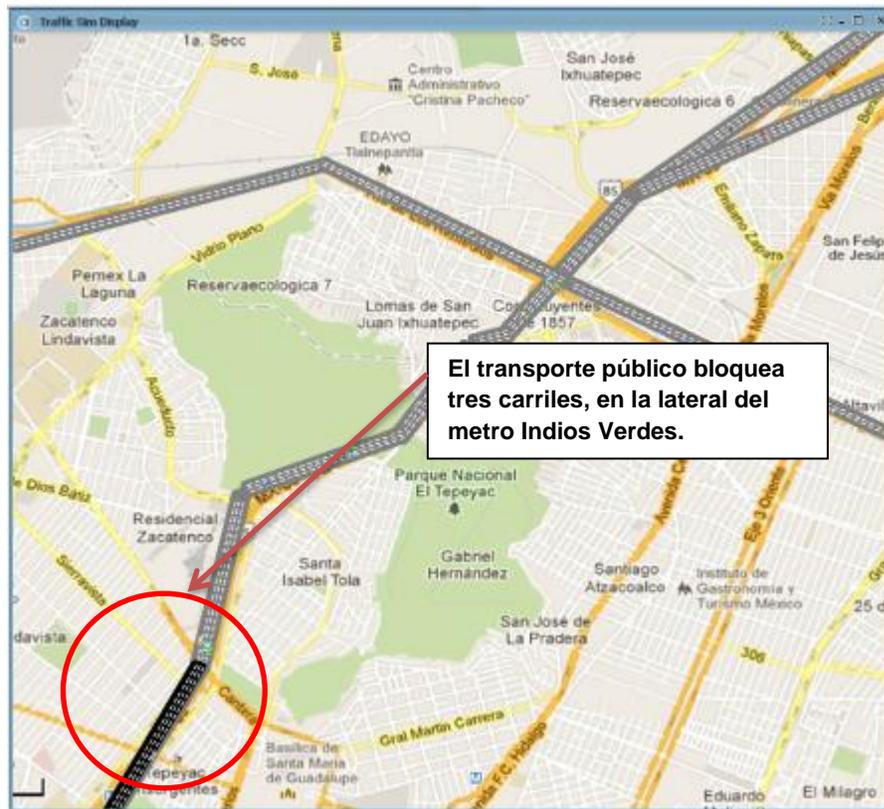


Figura 5.35. Condición de bloqueo que se incluye en el modelo del corredor Insurgentes Norte.²⁵³

Dentro de este modelo también se incluyó el efecto que tiene la variación en la pendiente durante la vía; estas diferencias se obtuvieron de la información de las curvas de nivel, el efecto que se consideró es que cuando hay un cambio hacia arriba las velocidades tienen un efecto de disminución en un 10 % adicional y cuando bajan la velocidad se incrementa en ese porcentaje, con respecto al efecto que tiene sobre las desaceleraciones, es que cuando los vehículos suben la desaceleración se incrementa y al bajar disminuye. Con esto lo que se trata es el reflejar las condiciones que más se puedan representar en el modelo.

Otra variable que se incluyó fue el cambio del flujo vehicular que se tiene a través de toda la vía, lo que hace que se tenga una mejor representación del ambiente vial en el modelo.

²⁵³ Elaboración propia.

Una vez que se alimentó el modelo con esta información se corrió durante un tiempo de 50,000 tick o steps y nos dio el resultado mostrado en la tabla 5.11.; en esta tabla se compara el resultado obtenido con el número de accidentes reales, como vemos en esta, el modelo nos arrojó una diferencia del 13 % más con respecto a los reales, que si consideramos las siguientes consideraciones en la información con que se alimentó el modelo:

1. La información que se tomó del reporte vial publicado en el sitio web denominado “laboratorio de la ciudad” en el cual se publica información vial georeferenciada del año 2013.²⁵⁴
2. Se contemplan los elementos principales que se deben de incluir en un accidente de tránsito, esto de acuerdo con los principios teóricos que nos señala la Organización Mundial de la Salud, por lo que faltaría incluir algunas variables importantes del ambiente, como distractores de los conductores, baches en las vías, etc.
3. Algunos parámetros que se incluyeron en el modelo se introdujeron de manera aleatoria, estos son estimadas, como el porcentaje de distracción y el porcentaje de personas propensas a pasarse los altos. Se deberían de realizar algunos estudios psicológicos para poder determinar con exactitud estos elementos.
4. La información con que se alimentó el modelo de los parámetros como velocidades y aforos vehiculares, de acuerdo con número de observaciones que se tomaron tiene un porcentaje de confiabilidad de un 95 %.
5. Al final se incluyó el efecto de los cambios de pendiente en el modelo y los cambios que se tienen en el flujo vehicular a lo largo de la vía, lo que quiere decir que el modelo puede ser complementado con variables adicionales que nos ayudaría a tener un resultado más apegado a la realidad.

De acuerdo a los puntos señalados anteriormente podemos decir que el pronóstico que nos da el modelo es un pronóstico aceptable.

²⁵⁴ Laboratorio para la Ciudad (2014), “Reporte Vial”, Enero 2013. [<http://datos.labplc.mx/>: 20 de Diciembre del 2014].

Accidentes promedio por mes (2013)	Accidentes determinados por el modelo	Diferencia	Diferencia en %
17	19	2	13%

Tabla 5.11. Resultado del número de accidentes que nos proporcionó el modelo.²⁵⁵

Adicionalmente a la cantidad de accidentes pronosticados por el modelo, nos permite entender que es lo que está pasando cuando se da origen al fenómeno y como se podría influir en este con el fin de cambiar los resultados, en el caso del corredor modelado nos dimos cuenta que el número de carros que están en el área así como sus tiempos de permanencia crecen de manera exponencial, el tiempo promedio de un carro primero crece y posteriormente se mantiene constante, lo que nos hace entender que el tráfico incrementa conforme pasa el tiempo y como consecuencia se podría inferir que el número de accidentes también. Esto lo pudimos ver en la interface gráfica llamada “ESTADÍSTICAS”, que se muestra en la figura 5.36. En el corredor en estudio es uno en donde el tipo de accidentes que se presenta son de colisiones ligeras, que es la mayor cantidad de accidentes que se registran, en donde debido a la gran cantidad de vehículos cualquier error en conducción produce un choque, que es lo que se refleja en esta simulación.

Esta es una ventaja que nos permite la geosimulación en comparación con las técnicas antes mencionadas.

²⁵⁵ Elaboración propia.

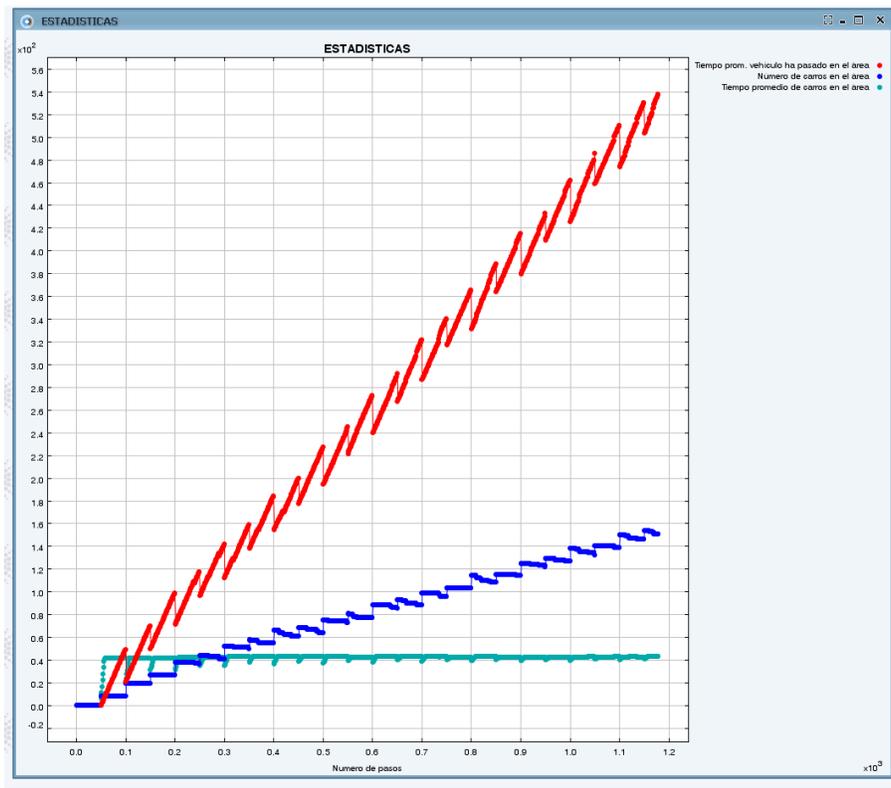


Figura 5.36. Interface gráfica que nos muestra el comportamiento de los vehículos en el área durante la modelación.²⁵⁶

Como se mencionó anteriormente, la modelación basada en geosimulación nos permite poder realizar modificaciones al ambiente en el que se desarrolla el fenómeno estudiado y poder entender el efecto que tendrían sobre los resultados finales.

Si el transporte público dejara de bloquear los tres carriles de la lateral del Metro Indios Verdes, ¿cuál sería el efecto sobre el número de accidentes?, ¿cómo serían los tiempos de permanencia y el número de carros en el área?, ¿cómo sería el comportamiento del tráfico en el área?, estas son preguntas que podemos contestar con la modelación basada en geosimulación. Los resultados de este cambio se muestran en la tabla 5.12, donde se ve que el número de accidentes se redujo en 5 al mes, lo que representa un 29% menos con respecto a los registrados en el año 2013.

²⁵⁶ Elaboración propia.

Accidentes promedio por mes (2013)	Accidentes determinados por el modelo	Diferencia	Diferencia en %
17	12	-5	-29%

Tabla 5.12. Resultados obtenidos de accidentes al desbloquear los tres carriles en la lateral del metro Indios Verdes.²⁵⁷

Al desbloquear los tres carriles, como se muestra en la figura 5.37, encontramos que el número de carriles se mantiene de manera uniforme y es menor en un 60% con respecto a la cantidad de autos que están en el área y a los tiempos de permanencia, esto lo podemos ver en la figura 5.38, vemos a través de las gráficas cómo se comportan los vehículos.

²⁵⁷ Elaboración propia.

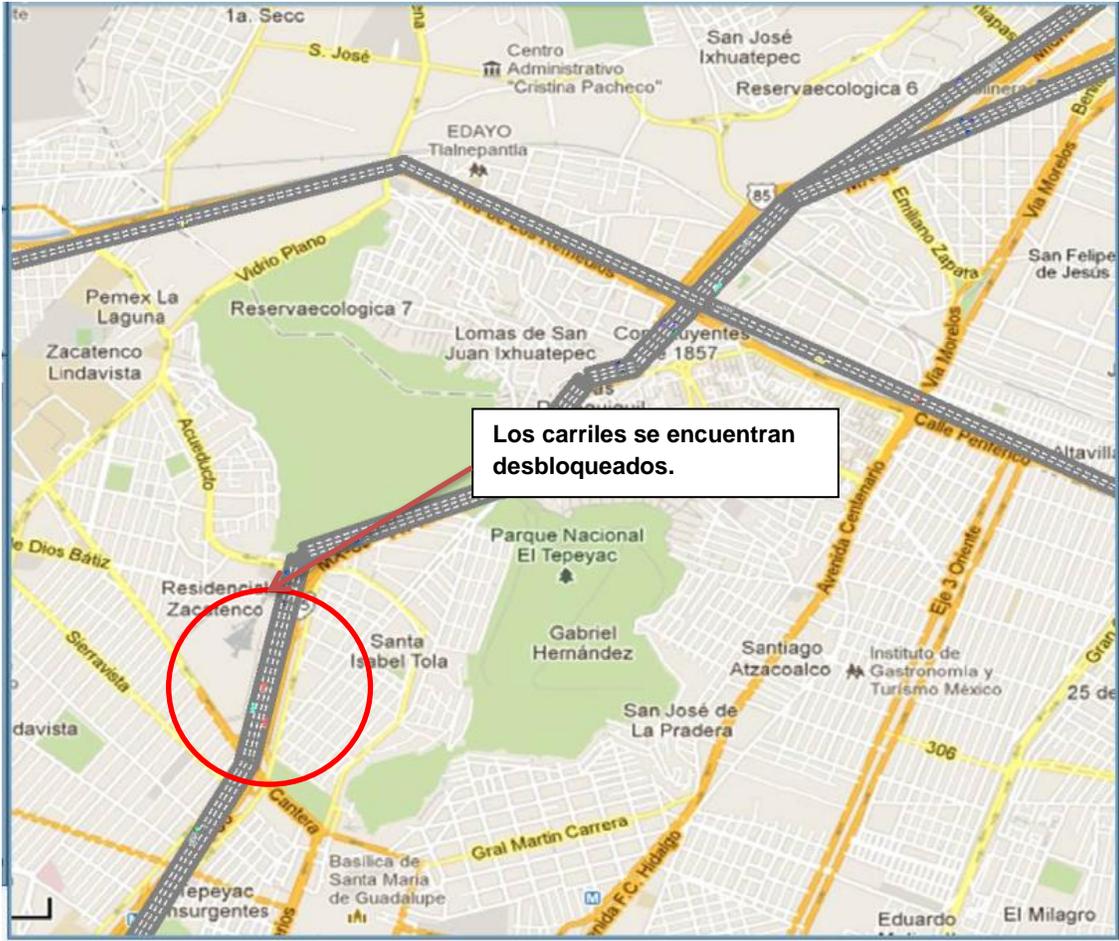


Figura 5.37. Como una variación del modelo los tres carriles se desbloquearon.²⁵⁸

²⁵⁸ Elaboración propia.

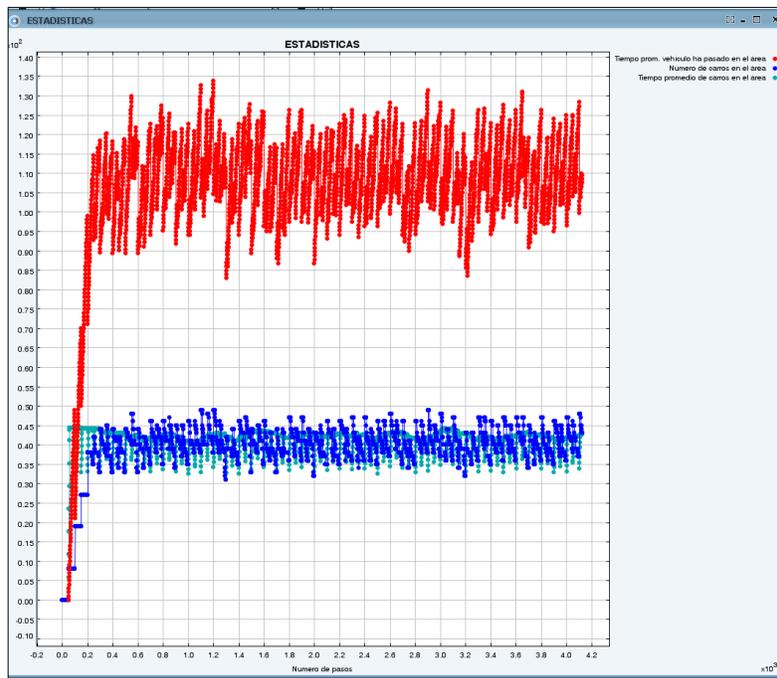
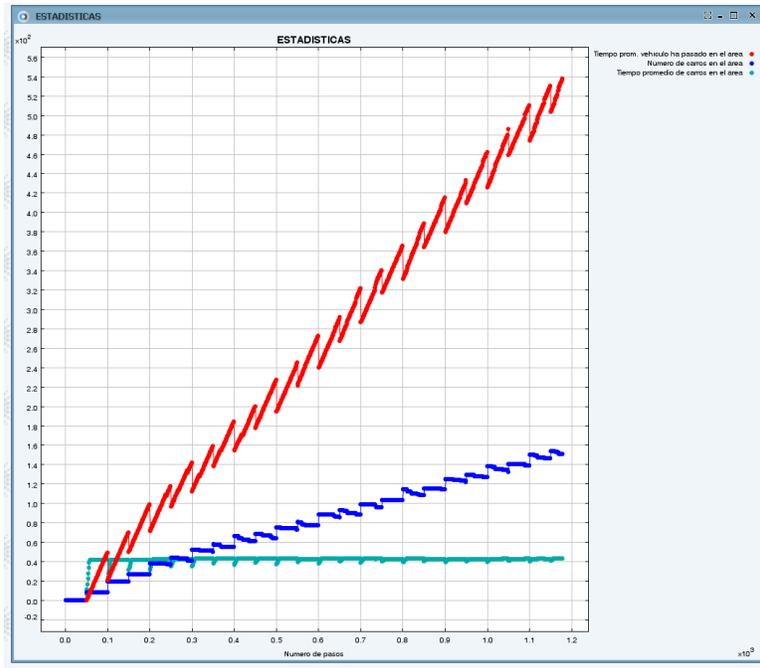


Figura 5.38. Interfaces gráficas del comportamiento de los vehículos en el área con el desbloqueo de los carriles.²⁵⁹

²⁵⁹ Elaboración propia.

Dentro de este modelo es factible cambiar los valores de las diferentes variables y ver su efecto sobre los accidentes de tránsito; en este caso los parámetros que se cambiaron fueron el porcentaje de personas que se pasan los semáforos o que no tienen precaución y el porcentaje de distracciones, si modificamos estos dos parámetros las tablas 5.13 y 5.14 nos muestran estos resultados.

Porcentaje a pasarse los altos	Número de accidentes	Variación
5	19	
8	21	11%
11	22	16%
14	22	16%

Tablas 5.13. Comportamiento de los accidentes de tránsito con el incremento del porcentaje de conductores a pasárselos altos o a no respetar la señalización.²⁶⁰

Porcentaje de distracción	Número de accidentes	Variación
5	19	
8	20	5%
11	21	11%
14	22	16%

Tabla 5.14. Comportamiento de los accidentes de tránsito al incrementar el porcentaje de distracción.²⁶¹

Como se puede observar en las tablas 5.13 y 5.14, el incremento del número de conductores que no respetan la señalización y el porcentaje de distracciones en más del 100% provoca un incremento en el número de accidentes en un promedio del 16%, por lo que de

²⁶⁰ Elaboración propia.

²⁶¹ Elaboración propia.

acuerdo con la información que nos da el modelo, es más benéfico desbloquear los carriles, ya que el efecto es mayor sobre la reducción de estos.

Los porcentajes de distracciones y de distracciones se propusieron de manera aleatoria, para tener información más certera sobre esta, se deberán de hacer algunos estudios psicológicos, con el fin de conocer a ciencia cierta los porcentajes de estas. De cualquier manera con el modelo se está comprobando el efecto que tienen estos sobre el incremento en los accidentes de tránsito.

Una de las ventajas de la operación de este tipo de modelos es que se pueden formar escenarios con diferentes datos para cada una de las variables y poder conocer el efecto de estas sobre el comportamiento del fenómeno.

5.4.8. Comparación de los métodos del modelo basado en agentes, redes neuronales y geo estadística.

Una vez que se elaboraron los tres modelos se actualizó la tabla antes mostrada, incluyendo la información de los modelos basados en agentes, esto se muestra en la tabla 5.15.

El enfoque de este trabajo es presentar esta nueva alternativa, con el fin de que nos pueda permitir contar con un nivel de información de mayor agregación y nos ayude a entender los factores que se presentan y el efecto que tienen sobre la generación de los accidentes, con el fin de poder tomar decisiones y modificar algunas variables que nos lleven a disminuirlos.

Característica	En el estudio de los accidentes de tránsito		
	Basado en SIG y geo estadística	Redes Neuronales	Geosimulación
Tipo de modelos a resolver.	De cualquier proceso, que tenga información espacial.	De cualquier proceso que involucre información sobre las variables que lo generan.	De cualquier fenómeno o proceso que involucre información sobre variables y comportamientos específicos de cada uno de sus elementos a nivel micro. Se usa especialmente para fenómenos o procesos complejos.
Datos requeridos.	De los accidentes producidos y variables que se relacionan con el, todos con referencia espacial, para poder representarlos en un SIG.	Históricos de entrada y salida, de los accidentes producidos y de las variables que se relacionen con la generación de estos.	Información del comportamiento de cada uno de los elementos que intervienen en el proceso, los valores de las variables se representan en cada uno de los elementos del proceso.
Nivel de datos.	A nivel macro, no tenemos la información a detalle de cada uno de sus elementos que se presentan en este.	Depende del nivel de agregación de las variables que se utilizan para la predicción del comportamiento.	A nivel de comportamiento de cada uno de sus elementos, la suma de estos comportamientos se traducen en los valores de las variables a un mayor nivel y del resultado final.
Representación gráfica del modelo.	A través de los SIG se puede visualizar la información tanto de los datos de entrada como de salida y en graficas en dos o tres dimensiones.	A través de gráficas de varias dimensiones se pueden visualizar tanto los datos de entrada como de salida, así como la representación de la ecuación resultante. No se tiene una representación espacial del fenómeno o proceso.	El modelo se puede observar a través de una interface gráfica y poder entender su comportamiento. El comportamiento del modelo a través del tiempo se visualiza de manera dinámica, con características muy similares a las reales.
Representación del tiempo.	Se puede analizar la variable de tiempo a través de estados estáticos del fenómeno o proceso, al inicio y al final del periodo.	Se introduce como una variable más en la generación de la ecuación utilizada para predecir el comportamiento del proceso.	Es la variable principal, ya que regula el comportamiento del proceso, el modelo se muestra de manera dinámica en el trascurso de este.
Resultado del método.	Nos determina los valores de la cantidad de accidentes por ubicación.	Nos proporciona una ecuación en la cual nos da el número de accidentes producidos en función de las variables que se consideraron en su calculo.	Nos proporciona valores de las variables de interés a nivel micro los cuales dan como resultado los valores de los comportamientos a nivel mayor de agregación. Nos permite observar comportamientos que no estaban considerados que se representarían.
Función de los SIG.	Se utilizan para la georeferenciación de los accidentes así como para determinar las zonas en las cuales ocurren estos.	No se utilizan.	Se utilizan de soporte para el desarrollo del modelo, lo que lo hace mas real, forma parte de la plataforma en la que se desarrolla el proceso.
Software requerido para resolverlo.	Regularmente cualquier SIG tienen un modulo de geo estadística que realizara de manera muy sencilla los análisis espaciales básicos en puntos determinados, entre ellos están: ArcGis, MapInfo y de código libre GRASS.	Cualquier software de manejo de datos estadísticos como SPSS, MiniTab, etc., tienen un modulo para hacer proyecciones tomando como base las redes neuronales.	Software de código libre, preferentemente, ya que es posible poder modificar el modelo. Programas muy especializados. La documentación es muy poca y no clara.
Dificultad para resolver la proyección con software.	Muy sencillo, no se requiere una capacitación especial para poderlo resolver.	Muy sencillo, no se requiere una capacitación especial para poderlo resolver.	Se requieren conocimientos avanzados de programación de computadoras.
Variaciones que se pueden realizar en el modelo con el fin de analizar su comportamiento.	Se pueden introducir otras variables que tengan información espacial y relacionarlas con el fin de poder deducir comportamientos.	Se pueden hacer modificaciones en las variables que generaron la ecuación que sirve para predecir los accidentes, las cuales nos muestran sus efectos sobre estos.	Se pueden modificar los valores de cada uno de sus elementos a nivel micro y valorar su efecto sobre el número de accidentes, así como hacer escenarios "¿que pasaría si?", podemos ver comportamientos no previstos.

Tabla 5.15. Comparación de los modelos estudiados.²⁶²

²⁶² Elaboración propia.

5.4.9. Aplicación del modelo en un sistema integral para la prevención de accidentes.

Comparando los resultados obtenidos en los tres modelos podemos ver que los modelos basados en geo estadística y en redes neuronales hacen el análisis de información con un nivel menor de agregación, es decir, a partir de información de variables independientes se pronostica el valor de la variable dependiente, que son el número de accidentes. En el modelo basado en agentes el nivel de agregación de la información es mayor, el número de accidentes, se pronostican o se predicen a partir de las variables de los elementos que forman el modelo, es decir, a partir de variables a nivel micro se predicen los valores de las variables macro, este además nos permite conocer y entender cómo se comporta la situación real e inclusive poder conocer comportamientos que no se tenían contemplados.

Después de haber analizado estos modelos y dado el grado de dificultad que presentan para su elaboración cada uno de estos, podemos decir que estos modelos no son sustitutos sino complementarios.

Con el fin de poder reducir el número de accidentes de tránsito se proponen integrar los métodos que consideramos que nos proporcionan una información más certera el basado en redes neuronales y el basado en geo estadística, con el fin de poder reducir de manera efectiva los accidentes de tránsito.

El proceso consistiría de los siguientes pasos:

1. Tomar información de los accidentes de tránsito y de las variables que pudieran tener algún efecto sobre el número de estos, como el aforo vehicular, velocidades promedio, etc.
2. Georeferenciar los accidentes de tránsito de tal manera de conocer físicamente en donde se presenta el mayor número de estos.
3. Una vez que se georeferenciarón los accidentes, realizar una proyección de su número e identificar los puntos “rojos” en donde se presenta la mayor cantidad de estos.

4. Tomar los puntos rojos con el mayor número de accidentes, acudir a estos lugares y tomar información sobre los elementos que forman el sistema y el valor de cada una de las variables que describen el comportamiento de los elementos.
5. Elaborar un modelo basado en agentes del ambiente a estudiar y resolverlo.
6. Cambiar los valores de las variables que describen el comportamiento de cada uno de los elementos del sistema con el fin de conocer el efecto de cada una de estas en la provocación de los accidentes de tránsito.
7. Tomar medidas correctivas en función de la información generada por el modelo.

Capítulo 6

Conclusiones

Contenido

6.1. Introducción.....	339
6.2. Resumen de las investigaciones encontradas.....	334
6.3. Critica a la metodología.....	337
6.4. Desventajas de la metodología utilizada.....	339
6.5. Recomendaciones para futuros trabajos.....	340
6.6. Conclusiones finales.....	341

6.1. Introducción.

En este trabajo se aborda el tema de contar con una nueva alternativa para modelar y proyectar los accidentes de tránsito, la finalidad es poder tener información con un mayor nivel de agregación, que nos permita poder tomar mejores decisiones y poder realizar acciones que nos permitan reducirlos.

Se parte de la base que las formas de modelación tradicional, las cuales se basan en el principio de causa efecto, no son adecuadas para la modelación de fenómenos o procesos complejos. Por otra parte los accidentes de tránsito se definen como un suceso en el cual intervienen una serie de factores, por lo que se consideran como procesos dinámicos complejos, estos originan anualmente la cantidad de 16 mil muertes en México, entre otras perdidas, de ahí la importancia de contar con herramientas que nos proporcionen mayor información con el fin de poder reducirlos. En base a los dos planteamientos anteriores se propone la modelación y simulación basada en la geosimulación, como la mejor alternativa

para la modelación de los accidentes de tránsito, en esta perspectiva se modelan los fenómenos partiendo de los comportamientos micro hacia los macro, a través de esta forma de modelación podemos simular el comportamiento de cada uno de los elementos que intervienen en la situación real, pero lo relevante de este es que se pueden simular comportamientos y decisiones humanas y todo en un ambiente espacial, lo que lo hace más real, el resultado de este nos ayudara a tomar decisiones concretas sobre que elemento dentro del fenómeno es el que está teniendo un mayor efecto en la generación de los accidentes y que debemos de modificar con el fin de reducirlos.

6.2. Resumen de las investigaciones encontradas.

Este capítulo concluye con la tesis, revisando si se logró alcanzar cada uno de los objetivos planteados en el Capítulo 1, siguiendo con una crítica a la metodología y concluye con algunas recomendaciones y observaciones.

a. Analizar y comprender información y estadísticas sobre los accidentes de tránsito, que nos ayuden a entender sus consecuencias en cuanto a pérdidas de vidas y económicas y el impacto que se tendrá al lograr su reducción.

Esto se logró con la revisión que se hizo en el Capítulo 2, denominado entendiendo los accidentes de tránsito. En este primeramente se hace una recopilación de datos estadísticos con el fin de mostrar la importancia de atender esta causa de muerte entre los jóvenes de 5 a 34 años de edad, tanto en México como en América Latina. Posteriormente se analizaron cada uno de los factores que intervienen en el proceso de conducir un vehículo y que por cuestiones de desviaciones podrían originar un accidente de tránsito, aquí se destaca que los factores que deben de incluirse en un modelo son: el factor humano que es el más difícil de modelar debido a su naturaleza tan cambiante, la vía, los obstáculos en el camino, el vehículo y el medioambiente, como lluvia o nieve. En el modelo que se diseñó, en este trabajo, se incluyen los elementos que tienen un mayor impacto en la generación de estos, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud, que son los conductores, vehículos, la vía y algunos factores del ambiente como los semáforos, pendientes de la vía, variaciones en el flujo vehicular, etc.

b. Conocer el estado de arte de los métodos para la elaboración de modelos dinámicos y de manera específica los basados en geosimulación.

Esto se logró con la revisión que se hizo en el Capítulo 3 sobre la geosimulación. En este se describieron los fundamentos de la geosimulación, destacando como los principales: la programación orientada a objetos y los avances en los sistemas de información geográfica, que gracias a estos es posible diseñar y construir modelos espaciales basados en objetos de alta resolución, para la solución de problemas que involucren aspectos geográficos. También se revisaron las diferentes técnicas de geosimulación que se utilizan para el desarrollo de los modelos como son: los autómatas celulares, los sistemas multi agentes y los autómatas celulares geográficos, y lo más importante se hace una revisión de los fundamentos de la simulación basada en agentes, que es la técnica que utilizamos en este trabajo, así como también de hace un resumen de las herramientas de computación existentes para el desarrollo de esta técnica de simulación.

En el Capítulo 5 se hace una comparación y evaluación de todas las herramientas que existen para el desarrollo de modelos basados en agentes y se elige como la mejor Repast y derivada de esta Traffix, que es un ambiente para desarrollar modelos viales, elaborado en función de Repast 3.1, posteriormente se hace una descripción a fondo de estas dos, considerándolas como las mejores opciones para el desarrollo de modelos para la prevención de accidentes de tránsito, utilizando agentes.

c. Hacer un análisis y revisión sobre los métodos tradicionales de modelado y de predicción que se utilizan en los accidentes de tránsito, con el fin de resaltar sus áreas de oportunidad por explotar, dentro de este punto se considera el análisis de casos prácticos y de sus métodos utilizados.

Esto se logró con la revisión que se hace en el Capítulo 4, en el cual se revisan los métodos cuantitativos que se utilizan actualmente para la modelación y prevención de accidentes. Entre los principales métodos utilizados está el basado en geoestadística que consiste en georeferenciar la información sobre los accidentes para que una vez que se hayan localizados los puntos “rojos” o de mayor cantidad de accidentes realizar su proyección y

análisis, a través de la utilización de técnicas de análisis espacial, el otro método más utilizado es el basado en redes neuronales el cual consiste en la reproducción del comportamiento de la variable dependiente con respecto a los independientes, estos tipos de métodos hacen sus análisis a nivel macro basados en el principio de causa efecto y permiten determinar los puntos en los cuales se produce la mayor cantidad de accidentes, pero no nos dicen que variables de los elementos que forman el ambiente son los principales causantes de los accidentes y sobre los cuales hay que tomar medidas preventivas para reducirlos.

En el Capítulo 5 se hace una descripción de los requisitos que deberá de tener el sistema para poder modelar los accidentes de tránsito, a través de la utilización de diagramas de uso, la elección de la plataforma de computación para su desarrollo y su conceptualización utilizando el ambiente de desarrollo Traffix y basándonos en los principios de la programación orientada a objetos.

d. Diseñar y construir un modelo basado en geosimulación que nos ayude a entender la dinámica de los accidentes y permita poder entenderlos y proyectarlos, y que la información que genere pueda ser tomada para establecer medidas para reducirlos.

Esto se logra en el Capítulo 5 en el cual se diseña y se construye un modelo que simula un ambiente de tráfico en el cual se desarrollan los accidentes. Se empieza desde la forma en cómo se debe de virtualizar la realidad, tomando como base las teorías sobre cómo se desarrollan los accidentes de tránsito y la información de que se dispone, los requisitos que deberá de tener el sistema y su descripción a detalle en función de diagramas de casos de uso y diagramas de actividades, posteriormente se hace la selección de la mejor plataforma para su desarrollo y una vez que se eligió el desarrollo del programa de computación, utilizando como base el ambiente de programación Repast y su programa derivado Traffix. En este modelo la parte que consideramos más trascendental es el poder simular decisiones humanas durante el desarrollo de este tipo de accidentes.

En este modelo se incluyen los elementos fundamentales, que tienen mayor efecto en la generación de los accidentes de tránsito, el conductor, el vehículo, la vía y el ambiente, dentro de este se incluyeron los semáforos, variación de la pendiente de la vía y el flujo vehicular, los comportamientos de cada uno de estos elementos fueron incluidos en el modelo.

e. Asegurar que el modelo se puede aplicar a escenarios reales que nos permita hacer proyecciones de los accidentes de tránsito en las principales vías.

Esto se desarrolló en el Capítulo 5 en el cual se muestra el modelo basado en agentes alimentado con información del corredor de la Avenida Insurgentes Norte, en este se muestra como a través del cambio de las variables de cada uno de los elementos que forman el ambiente afectan el resultado final del modelo.

El resultado que se obtuvo fue una aproximación en la estimación de los accidentes en un 18% más en comparación con la información disponible del corredor en estudio, que de acuerdo con la información con que se alimentó, el resultado lo consideramos aceptable, por lo que tendríamos un modelo basado en geosimulación para representar situaciones reales.

f. Dar a conocer las metodologías de modelación de fenómenos desde un punto de vista dinámico.

A partir del capítulo 4 se explican las diferentes metodologías que se utilizan para la modelación de fenómenos complejos y dinámicos, se explican las bases teóricas de cada una de estas y se hace referencia a las herramientas computacionales que tienen como base el uso de estos principios.

En la elaboración del modelo dinámico del corredor de la Avenida Insurgentes Norte, se fueron describiendo, conforme se fue elaborando, cada uno de los pasos para la elaboración de un modelo dinámico, desde su descripción hasta su implementación como un programa de cómputo funcional.

Adicionalmente al cumplimiento del objetivo general y de los específicos que se plantearon en un inicio en este trabajo, los cuales se lograron de acuerdo con los puntos mencionados anteriormente, se muestra la importancia de la utilización de programas de cómputo de código libre en la modelación de procesos complejos, entre las ventajas que pudimos encontrar con el uso de este tipo de programas son los siguientes:

- a. Son gratuitos y no tienen los precios elevados de los programas propietarios.
- b. Se tiene acceso al código del programa de tal forma que se puede hacer modificaciones para que el programa de ajuste a los requerimientos de la situación a modelar.
- c. Existen comunidades de soporte sobre el código y uso del programa.

La principal desventaja de este tipo de programas es que el tiempo para aprenderlo es muy elevado además de que no se tiene documentación suficiente para su aprendizaje, todo tiene que hacerse a través de foros de usuarios.

6.3. Crítica a la metodología.

En este trabajo se ha explorado el uso de la modelación basada en la geosimulación, y de manera más específica la simulación basada en agentes, para la prevención de los accidentes de tránsito. Se ha logrado el objetivo, en el sentido de que nos presenta una nueva alternativa que nos ayuda a entender el proceso de la generación de un accidente de tránsito y a determinar cuál es la variable del sistema que nos puede estar provocando la generación de estos. Sin embargo hay una serie de debilidades de la investigación que serán discutidas aquí. No es un modelo perfecto que representa el 100% la realidad de la situación, ningún modelo lo logra, pero los resultados obtenidos en este trabajo nos ayudan a visualizar las ventajas de utilizar los modelos dinámicos contra los estáticos.

Disponibilidad de información sobre los accidentes de tránsito.

Para el desarrollo de este tipo de modelos no existe información disponible pública, la única oficial que hay es la proporcionada por el INEGI y el CONAPRA, la cual es de tipo Macro, es decir, cuya unidad mínima geográfica es la Delegación o Municipio, y no está actualizada, la última es del año 2008, el CONAPRA publica algunos estudios en los cuales se dan estadísticas de los accidentes pero como se comentó todo a nivel Macro.

Existe información por parte de la Secretaria de Seguridad Publica y de las Direcciones de Tránsito, pero para solicitar esta nos pidieron que se hiciera una solicitud a través del Ifai, no es pública, sólo a través de este medio se nos puede proporcionar.

Si requiriéramos información para este tipo de modelos sería necesario tomarla del campo con recursos propios, como se hizo en este trabajo sólo que en zonas más amplias, que de

acuerdo con las cifras registradas por pérdidas a causa de los accidentes de tránsito sería rentable.

Realidad del modelo.

En este caso el modelo se incluyeron los elementos fundamentales de un ambiente vial y que son los principales generadores de los accidentes de tránsito, los cuales han sido mencionados previamente, para tener una mejor representación es necesario incluir otros aspectos que pudiesen provocar la generación de accidentes de tránsito como baches en las carreteras, paso de peatones, vehículos en sentido contrario, factores del ambiente como lluvias, exceso de calor, etc., los principios de la programación orientada a objetos y la plataforma que estamos utilizando nos permite el diseño y la incursión de este tipo de elementos. Todos estos soportados por las bases teóricas que nos describan el comportamiento de cada uno de estos.

Proceso de calibración incompleto.

Una vez que se obtuvo el resultado del modelo, el proceso siguiente es su calibración, este consiste en ajustar algunas variables del modelo de tal forma que el número de accidentes que nos proporciona el modelo sean iguales a los reales, con lo que se tendría un modelo que representará la realidad. En este trabajo no se llegó a este punto, debido a que consideramos que aún faltan algunas variables de importancia que se deben de incluir en el modelo, y una vez que se hayan incluido estas, se deberá de proceder a su calibración, hasta no lograr lo anterior consideramos que el hacer una calibración del modelo sería incorrecto.

Falta de información sobre las herramientas de modelación.

Un problema al cual nos encontramos durante el desarrollo del trabajo y que afecta de manera notable el desarrollo de esta, fue la falta de información sobre las herramientas disponibles para hacer este tipo de modelos. Las herramientas propietarias tienen elevados precios y son cajas negras que no te permiten diseñar modelos complejos, por otra parte las herramientas de código libre te proporcionan toda la facilidad para poder diseñar modelos muy complejos pero no tienen información sobre como operar la plataforma lo que hace que el

trabajo se vuelva muy lento al disponer solamente de blogs en los cuales se pueden intercambiar y compartir conocimientos y dudas.

6.4. Desventajas de la metodología utilizada.

El entusiasmo de la adopción del enfoque de la modelación basada en agentes para el modelado geoespacial se ve restringido por algunas limitaciones. Si bien es común a todas las técnicas de modelado, una cuestión relacionada con el propósito de un modelo es tan útil como la finalidad para la que fue construido. Un modelo tiene que ser construido en el nivel adecuado para la descripción de cada fenómeno, con la cantidad de detalle necesario para que cumpla con su propósito. Esto sigue siendo más un arte que una ciencia. La naturaleza del sistema modelado es otra consideración. Por ejemplo, un sistema basado en los seres humanos que involucra agentes con posibles comportamientos irracionales, las opciones subjetivas y la compleja psicología. Estos factores son difíciles de cuantificar, calibrar y, a veces justificar, lo que complica la aplicación y el desarrollo del mismo, así como la interpretación de los resultados de la simulación. Uno de los problemas en el desarrollo de los modelos es la falta de la formación sobre los fenómenos que se quieren representar. Entre la característica principal de este tipo de modelo está la comunicación visual, que nos permite entender el fenómeno, pero si esta no se realiza de manera adecuada, originará que no se logre el objetivo de este.

Por su propia definición, los modelos basados en agentes consideran los sistemas a un nivel desagregado. Este nivel de detalle consiste en la descripción de los atributos del agente, potencialmente muchos comportamientos y su interacción con el medioambiente. La única manera de tratar este tipo de problema en el cálculo del agente es a través de múltiples ejecuciones, variar sistemáticamente las condiciones iniciales o parámetros para evaluar la solidez de los resultados. Hay un límite superior práctico para el tamaño del espacio de parámetros que pueden ser verificados por la robustez, y este proceso puede ser muy computacionalmente intensivo, por lo tanto mucho tiempo. Aunque el poder de computación se está incrementando rápidamente, el requisito de alta computación de la simulación basada en agentes sigue siendo una limitación a la modelación de sistemas de gran tamaño.

Otro problema adicional es que si no se entiende la realidad del fenómeno a simular no se podrá a ser una buena representación de esta, es fundamental conocer las bases teóricas del sistema para poder hacer una correcta representación de todos sus elementos.

Por último, los críticos de la teoría de la complejidad comentan que muchos de los comportamientos exhibidos en los modelos matemáticos y computacionales se visualizan rara vez en el mundo real. En particular, el tipo de agente que se utiliza en los modelos, es muy sensible a las condiciones iniciales y de las pequeñas variaciones en las reglas de interacción, lo que podría cambiar sus resultados y no podría concordar con la realidad. A pesar de esto, y las otras limitaciones que se han destacado, la modelación basada en agentes, es una herramienta útil para la exploración de los sistemas que exhiben un comportamiento complejo.

6.5. Recomendaciones para futuros trabajos.

Hay muchas direcciones de investigación para esta rama de la geografía y en especial para atacar la reducción de accidentes a través de la geosimulación. Esta tesis ha mostrado que este tipo de modelos, para reducir los accidentes, tiene potencial en determinar a nivel micro las causas que los originan y deberían de hacerse una inversión para que se continúe con esta investigación sobre este tipo de modelos, en especial los organismos del gobierno encargados de reducir este tipo de accidentes como el Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes (CONAPRA) a través de la Iniciativa Mexicana de Seguridad Vial (IMESEVI). Este tipo de modelos podría ayudar a evaluar diferentes reglamentos y políticas como medidas para la reducción de los accidentes, así como su impacto. Este tipo de organismos en conjunto con algunas Universidades que estén interesados en el tema, deberían de desarrollar un laboratorio virtual en el cual se puedan simular redes urbanas y se puedan atacar desde la perspectiva micro la reducción de este tipo de accidentes.

Con respecto a la mejora del modelo se deberá de seguir trabajando en mejorarlo de tal forma que deberá de llegar a simular toda la red vial de la Ciudad de México con sus diferentes complejidades.

6.6. Conclusiones finales.

Esta tesis ha explorado el uso de la modelación basada en agentes (geosimulación) para analizar y predecir los accidentes de tránsito, a través del uso de los principios de la programación orientada a objetos y de una plataforma de simulación avanzada, se ha creado un ambiente virtual en el cual interactúan los elementos que forman el sistema y nos proporciona un resultado final de dicho comportamiento. A pesar que inevitablemente tiene muchas debilidades, este enfoque es la técnica más adecuada actualmente disponible para el modelado de un sistema que se caracteriza por la interacción individual y contiene organismos inteligentes que exhiben un comportamiento complejo. Esperamos que con algunas mejoras, ya que en el modelo se consideraron los elementos fundamentales, el modelo pudiera ser puesto a disposición de los organismos y políticos encargados de desarrollar acciones concretas para reducir el número de accidentes.

Apéndice A

Descripción del ambiente TRAFFIX

Traffic es una Suite para la construcción de modelos basados en agentes para escenarios de tráfico. El modelador puede construir redes arbitrarias de carreteras por caminos con cualquier número de carriles que van desde los cruces de los distritos de la ciudad y rellenarlas con los vehículos y sus conductores predefinidos. Hay diferentes tipos de vehículos con diferentes aceleraciones y deceleraciones, las velocidades y tamaños. Los conductores pueden ser más o menos agresivos para cruzar una intersección, pueden ser inclinados o no cambiar de carril con frecuencia, puede ignorar el semáforo amarillo y el usuario puede definir un sin número de diferentes comportamientos de conductores. Usando una sintaxis simple para describir cuando un coche debe comenzar su viaje en la red de carreteras y el curso que debe tomar. Los modeladores avanzados pueden definir las clases de vehículos nuevos y conductores mediante la extensión de las clases predefinidas o sobrescribir cualquier otra parte del programa, personalizar la visualización, por ejemplo, o definir nuevos objetos (señales de tráfico, etc.) Así se puede estudiar diversos escenarios de tráfico y los comportamientos de conductores.

Traffic fue escrito en Java con Repast 3.1.

A continuación se describirán los paquetes y las clases principales del ambiente Traffic y posteriormente los elementos que se utilizaron para nuestro modelo, esta descripción se complementara con diagramas de casos de uso.

1. Red de Carreteras.

Las clases correspondientes a la red de carreteras se encuentran en el paquete `trafficModelGraph`. La red vial está representada por un gráfico dirigido. Una instancia de la clase `Edge` representa un tramo de carretera recta. Un objeto de la clase `Edge` o un borde tiene uno o más carriles asignados a él. El extremo izquierdo del carril `Edge` o borde es el carril de 0 de la orilla. Al otro lado marca la posición del margen izquierdo de su carril 0a.

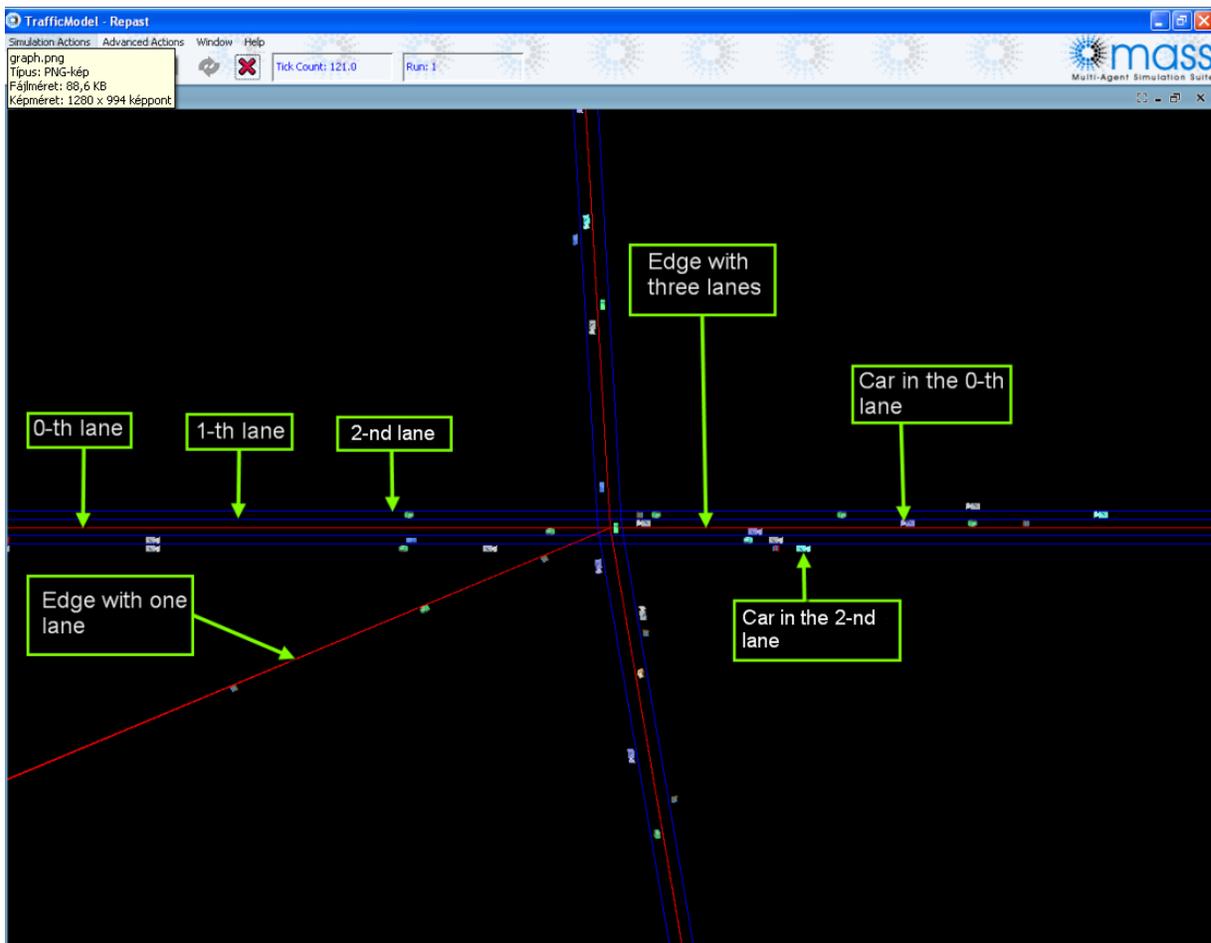


Figura A1 - Gráfica de la red de carreteras. Las líneas rojas representan los bordes y el margen izquierdo de su carril 0a. Las líneas azules representan el margen de los otros carriles de los bordes.

1.1. Las clases que se integran directamente en la gráfica de la Red de Carreteras.

La gráfica de la red vial se compone de las siguientes clases: nodos, bordes y líneas.

1.1.1. La clase del nodo.

Es una clase muy simple, que contiene las coordenadas X e Y del nodo, que tiene un identificador y se le asigna un color.

1.1.2. La clase Edge o borde.

Una arista conecta su nodo de partida y su nodo final y tiene por lo menos un carril asignado a él. Los principales atributos de la clase Edge son:

- Id: El número de identificación de edge.
- from: El nodo de partida de edge.
- to: El nodo final de edge.
- fromX, Fromy, Tox, toY: Las coordenadas de los puntos de inicio y final de edge, no necesariamente las mismas que las coordenadas de los nodos de inicio y fin.
- laneNum • El número de carriles pertenecientes a edge.
- lanes: los carriles pertenecientes a edge.
- endpoints: Las coordenadas de los extremos de los carriles pertenecientes a edge.
- minLaneId: La Identificación del carril más a la izquierda de edge.
- painter: El objeto (una instancia de la clase EdgePainter por defecto) responsable de la pintura de edge.

La clase Edge tiene varios métodos de la mayoría de los cuales son responsables de calcular los parámetros físicos de edge, como la dirección y la posición de edge y las vías pertenecientes a la misma.

Los métodos más importantes de la clase son:

- setLanes (): Asigna como muchas líneas en el borde como el laneNum indica. Se calcula las coordenadas de los extremos de los carriles de las coordenadas de edge y la anchura de los carriles.
- calculatePosition (double percentage): Calcula las coordenadas del punto en el porcentaje determinado de edge.
- paralelo (Edge ed): Devuelve true si la ed conecta los nodos del mismo que este pero es dirigida en sentido contrario.
- getCoordsTo (int i): Devuelve las coordenadas del punto final de la calle i-ésimo de edge.
- getCoordsFrom (int i): devuelve las coordenadas del punto de inicio de la vía i-ésimo de edge.

1.1.3. La Clase Lane.

Esta clase representa un carril en un tramo de carretera representada por un edge. Una vía tiene una edge pariente y se puede conectar a otros carriles. Si el extremo de un carril está relacionado con el inicio de un carril de otro entonces los coches pueden ir directamente desde el carril de la primera a la segunda calzada. Cuando un conductor determina la ruta, una lista de los carriles, que le gustaría seguir lo pone una calle ficticia al principio y al final de la lista.

Una sección de un carril puede ser considerado como parte de una intersección.

Los principales atributos de un carril o de la clase Lane son los siguientes:

- width: Ancho del carril.
- fromX, Fromy, Tox, toY: Las coordenadas de los puntos de inicio y final del carril.
- parentEdge: El edge al que la vía pertenece.
- toLanes: La lista de los carriles del final a los que el carril está conectado.
- fromLanes: La lista de los carriles conectados al inicio de este carril.
- toPositions: La lista de las coordenadas de los puntos de intersección de este carril y los carriles en la lista toLanes.
- fromPositions: La lista de las coordenadas de los puntos de intersección de este carril y los carriles en la lista fromLanes.
- toPercentages: La lista de las posiciones en el carril este de los puntos de intersección de este carril y los carriles en la lista toLanes.
- fromPercentages: La lista de las posiciones en el carril este de los puntos de intersección de este carril y los carriles en la lista fromLanes.
- startDummy: Si es verdad el carril no representa un camino real en un tramo de carretera, pero un carril ficticio en el principio de la lista de los carriles que representa la ruta de un conductor le gustaría seguir.
- stopDummy: Si es verdad el carril no representa un camino real en un tramo de carretera, pero un carril ficticio al final de la lista de los carriles que representa la ruta de un conductor le gustaría seguir.
- parallelLanes: Los carriles que pertenecen al mismo edge.
- neighbourLanes: La lista que contenga un máximo de dos carriles en el mismo edge como esto: el carril en el lado izquierdo de este carril y el carril en el lado derecho de este carril.

- `changeableLanes`: El listado que incluye los carriles en el mismo `edge`, ya que no están separados de él por una línea divisoria.
- `rightSolidLine`: Verdadero si la línea tiene una línea divisoria en su lado derecho.
- `leftSolidLine`: Verdadero si la línea tiene una línea divisoria en su parte izquierda.
- `StartGiveWayCoords`: Las coordenadas del punto designado por el `StartGiveWayPos`.
- `EndGiveWayCoords`: Las coordenadas del punto designado por el `EndGiveWayPos`.
- `auxiliary`: Verdadero si el `parentEdge` del carril es un `AuxiliaryEdge`.
- `bloqueo`: Si es verdad el carril no puede ser utilizado por los coches.
- `StartGiveWayPos`: El tramo desde el punto de partida de un carril a la `StartGiveWayPos` de la calle se considera como parte de una intersección.
- `EndGiveWayPos`: La sección de la `EndGiveWayPos` del carril hasta el punto final de la calle también se considera ser parte de una intersección.

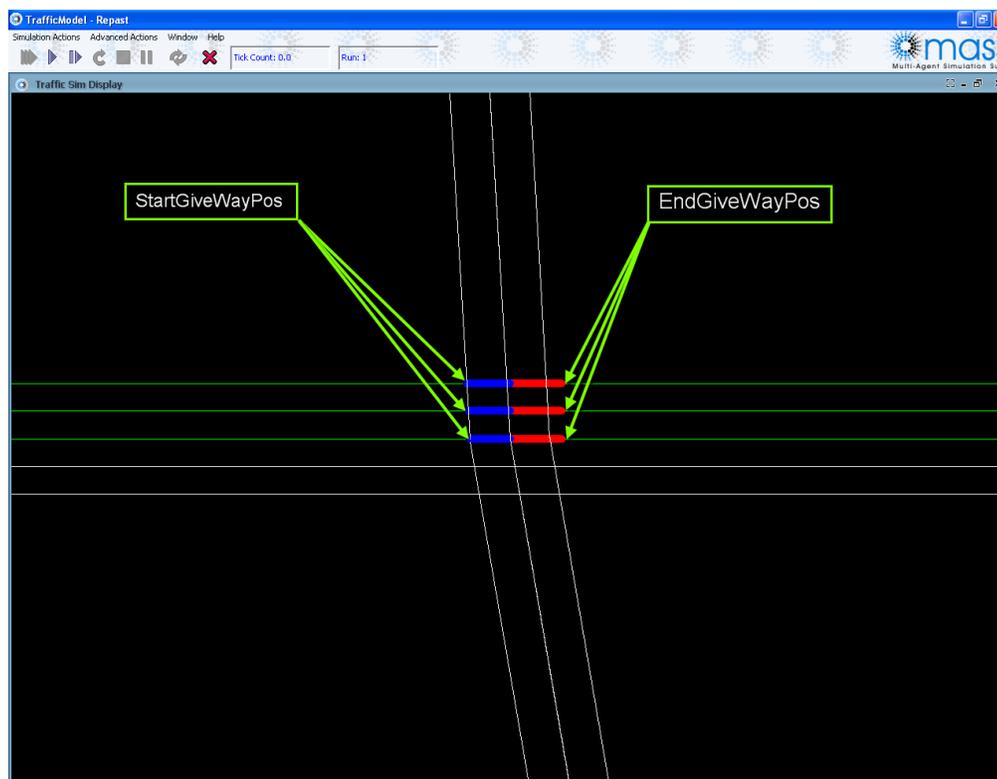


Figura A2. Los límites de una intersección. Las líneas rojas y azules representan las secciones de las vías verdes que forman parte de la intersección.

Los métodos de la clase Lane son los principales responsables de la determinación de los atributos físicos de un carril y los carriles de otras relacionadas con ella. Estos métodos ayudan a los pilotos y los coches para planificar la ruta que toman y conocer los parámetros de las secciones de las vías que utilizan al completar sus rutas.

Los métodos más importantes de la clase carril o Lane son los siguientes:

- `getChangeableLanes ()`: Determina y devuelve el `changeableLanes`. Si bien la determinación del `changeableLanes` también determina la `neighbourLanes`.
- `getNeighBourLanes ()`: Devuelve el `neighbourLanes`. Llama al `getChangeableLanes ()` para determinar la `neighbourLanes` si es necesario.
- `getParallelLanes ()`: Determina y devuelve el `parallelLanes`.
- `calculateDirection • ()`: Devuelve el vector espacial de la pista.
- `calculateEndPoints (fromLane Lane, toLane Lane)`: Devuelve los puntos extremos de la sección de cuyo inicio se encuentra en la intersección de este carril y `fromLane`, y cuyo fin está en la intersección de esta calle y la `toLane`.
- `getDataFromTo (fromLane Lane, toLane Lane)`: Devuelve la longitud del tramo de este carril desde la intersección de la calle con la `fromLane` a la intersección con la `tolane`, la distancia entre el punto de inicio de la pista y el primer cruce, dividido por la longitud real de la calle y la proporción de la longitud de la sección y la longitud real de la pista.
- `getDataTo (toLane Lane)`: Devuelve la longitud de la sección de la pista desde el principio de la calle hasta la intersección con la `toLane`, un cero, y la proporción de la longitud de la sección y la longitud real de la pista.
- `getDataFrom (fromLane Lane)`: Devuelve la longitud del tramo de la calle de la intersección de la calle con la `fromLane` hasta el final de la calle, la distancia entre el punto de inicio de la calle y la intersección dividida por la longitud real del carril y la proporción de la longitud de la sección y la longitud real de la pista.
- `calculateLanePosition (realPosOnLane doble)`: Devuelve las coordenadas del punto del carril designado por el `realPosOnLane`.

Los métodos de la clase Lane son los principales responsables de la determinación de los atributos físicos de un carril y los carriles de otras relacionadas con ella. Estos métodos ayudan a los pilotos y los coches para planificar la ruta que toman y conocer los parámetros de las secciones de las vías que utilizan al completar sus rutas.

Los métodos más importantes de la clase Lane:

- `getChangeableLanes ()`: Determina y devuelve el `changeableLanes`. Si bien la determinación del `changeableLanes` también determina la `neighbourLanes`.
- `getNeighbourLanes ()`: Devuelve el `neighbourLanes`. Llama al `getChangeableLanes ()` para determinar la `neighbourLanes` si es necesario.
- `getParallelLanes ()`: Determina y devuelve el `parallelLanes`.
- `calculateDirection ()`: Devuelve el vector espacial de la pista.
- `calculateEndpoints (fromLane Lane, toLane Lane)`: Devuelve los puntos extremos de la sección de cuyo inicio se encuentra en la intersección de este carril y `fromLane`, y cuyo fin está en la intersección de esta calle y la `toLane`.
- `getDataFromTo (fromLane Lane, toLane Lane)`: Devuelve la longitud del tramo de este carril desde la intersección de la calle con la `fromLane` a la intersección con la `tolane`, la distancia entre el punto de inicio de la pista y el primer cruce, dividido por la longitud real de la calle y la proporción de la longitud de la sección y la longitud real de la pista.
- `getDataTo (toLane Lane)`: Devuelve la longitud de la sección de la pista desde el principio de la calle hasta la intersección con la `toLane`, un cero, y la proporción de la longitud de la sección y la longitud real de la pista.
- `getDataFrom (fromLane Lane)`: Devuelve la longitud del tramo de la calle de la intersección de la calle con la `fromLane` hasta el final de la calle, la distancia entre el punto de inicio de la calle y la intersección dividida por la longitud real del carril y la proporción de la longitud de la sección y la longitud real de la pista.
- `calculateLanePosition (realPosOnLane doble)`: Devuelve las coordenadas del punto del carril designado por el `realPosOnLane`.

1.2. La clase semáforo o TrafficLight.

Esta clase está en el paquete `trafficModelObject` pero describe aquí porque el semáforo pertenece a la red de carreteras.

Un semáforo está en un carril en una posición determinada y controla los vehículos en ese carril.

Los atributos de la clase semáforo son:

- onLane: El carril de la luz del semáforo pertenece.
- position: La posición del semáforo en el carril.
- timeRed: El tiempo (en los pasos de simulación), en que el semáforo está en color rojo.
- timeRedAndYellow: El tiempo (en los pasos de simulación), en que el semáforo es de color rojo y amarillo.
- timeYellow: El tiempo (en los pasos de simulación), en que el semáforo es de color amarillo.
- timeGreen: El tiempo (en los pasos de simulación), en que el semáforo es de color verde.
- lightCycle: Se necesita un poco más de explicación. Si el lightCycle es 0, entonces cuando la simulación se inicia el semáforo está en rojo para los pasos de timeRed, a continuación, rojo y amarillo para los pasos timeRedAndYellow etc. Si el lightCycle es mayor que 0, el semáforo se comporta como si la simulación comenzara en el enésimo lightCycle del paso.
- americanType: Si es verdad si la luz es de color rojo cuando es rojo y amarillo de otra manera.

El método paso o step() de un semáforo que se llama en cada paso de la simulación y determina si la luz tiene que cambiar su color o no durante ese paso.

1.3. La Clase GraphToolbox.

La clase GraphToolBox es el almacén de las entidades importantes que se utilizan en una simulación. Cada modelo tiene un objeto GraphToolBox llamada toolbox y los coches y los conductores tienen acceso directo a toda la información almacenada en él. Usando la caja el toolbox los pilotos y los coches pueden saber todo lo que necesitan sobre la red de carreteras, los semáforos, la situación actual y el siguiente paso de cualquier otro coche. Las listas más importantes en el toolbox son las siguientes:

- edges: Los bordes o edges de la red de carreteras.
- nodes: Los nodos de la red de carreteras.
- lanes: Los carriles de la red de carreteras.
- trafficLights: Las luces de tráfico o semáforos utilizados en la simulación.
- lightLaneList: Contiene para cada carril de la lista de los semáforos que les pertenecen.
- cars: Los coches utilizados en la simulación.

- reservedLaneList: Contiene para cada carril de la lista de coches que están en el carril o la intención de tocar la pista en el próximo paso.
- reservedNodeList: Contiene para cada nodo de la lista de coches que están en un borde que pertenecen a este nodo o tiene intención de tocar ese borde en el próximo paso.
- routingTable: La tabla de enrutamiento de la red de carreteras.

El toolbox se crea y sus listas se cargan a través de la clase GraphLoader o una clase que se extiende de esta.

Los métodos más importantes de la clase GraphToolbox son los siguientes:

- initReservedLaneList (): Crea una nueva reservedLaneList en la lista de los coches está vacía para cada carril.
- initReservedNodeList (): Crea una nueva reservedNodeList en la lista de los coches está vacía para cada nodo.
- addToReservedLaneList (int index, coches c): añade un coche a la lista de sub-índice de la ETH reservedLaneList.
- addToReservedNodeList (int index, coches c): añade un coche a la lista de sub-índice de la ETH reservedNodeList.
- getReservedLaneList (int index): Devuelve la lista índice de sub-eth del reservedLaneList.
- getReservedNodeList (int index): Devuelve la lista índice de sub-eth del reservedNodeList.
- removeCarFromResLanes (int laneId, vehículo de coches): Elimina el coche de la lista de sub-eth laneId del reservedLaneList.
- removeCarFromResNodes (nodeid int, vehículo de coches): Elimina el coche de la lista de sub-eth nodeid del reservedNodeList.
- removeCarFromAllResLanes (coche de coches): Elimina el coche de todas las listas de la sub reservedLaneList.
- removeCarFromAllResNodes (coche de coches): Elimina el coche de todas las listas de la sub reservedNodeList.
- destroyCar (coches c: Quita el coche dado de la modelo.
- availableLanes (int laneId): Devuelve la lista de los carriles que se puede acceder directamente desde la fila indicada por el laneId. Desde el carril A, B carril se puede llegar directamente si A está conectado a B o A está conectado a un otro carril que está en el borde mismo que B y que no están separados por una línea divisoria.

- `easilyAvailableLanes` (int laneId): Devuelve la lista de los carriles que se puede llegar directamente sin cambio de carril a más de uno de la fila indicada por el laneId.
- `getLaneOffset` (fromLaneInd int, toLaneInd int): Calcula la distancia (en número de carriles entre ellos) entre dos carriles en el mismo borde.
- `isLaneFreeAtPercentage` (carril Lane, el porcentaje para dos personas): Calcula si un coche puede entrar en la posición dada por el carril, sin chocar con un coche de otro. Se utiliza principalmente cuando un coche nuevo se agrega a la red de carreteras.
- `isLaneFreeAtPercentage` (carril Lane, el porcentaje de dobles, dobles CarLength): Calcula si un coche puede entrar en la posición dada por el carril, sin chocar con un coche de otro. Se utiliza principalmente cuando un automóvil cambia de carril.
- `getLightsOnLane` (carril Lane): Devuelve el semáforo, que pertenece al carril.

1.4. La Clase GraphLoader.

La clase `GraphLoader` carga las gráfica de la red de carreteras a la clase `GraphToolBox`.

Los atributos más importantes de la clase `GraphLoader` son los nombres de los archivos que contienen la información sobre la red de carreteras:

- `edgeFileName`: El nombre del archivo de descripción de los bordes y las calles que les pertenecen.
- `joinFileName`: El nombre del fichero que describe cómo los carriles están conectados el uno al otro.
- `lightFileName`: El nombre del archivo que describe los semáforos utilizados en la simulación.

El método `load()` de la clase `GraphLoader` lee la información de estos archivos, crea las listas de los nodos, edges internos y externos para cada nodo, carriles y semáforos y devuelve un nuevo objeto de la clase `GraphToolbox` que contiene estas listas. Al principio el método `load()` crea la lista de los edges. A continuación, llama el método `buildLanes` (`ArrayList <Edge> edges`) que agrega carriles hasta los edges.

A el método `load()` llama a la `joinLanes` (`ArrayList <Edge> edge, ArrayList outEdgesList <ArrayList>`) que conecta las calles.

A continuación, el método `load ()` llama al método `loadLamps (ArrayList <Lane> lanes)` para cargar el semáforo. Una vez hecho esto el método `calculateGiveWayPositions (ArrayList <Edge> edges, outEdgesList ArrayList <ArrayList>, inEdgesList ArrayList <ArrayList>, ArrayList <TrafficLight> trafficLights)` es llamado. Se calcula la `startGiveWayPos` y `endGiveWayPos` de cada carril. Este método calcula las posiciones teniendo en cuenta las posiciones de los puntos de intersección de las calles y las posiciones de los semáforos.

Una vez creada la lista de los nodos, edges, etc., el método `load ()` devuelve un nuevo objeto de la clase `GraphToolbox` que contiene todas estas listas:

```
return new GraphToolbox(nodes,edges,objects,model,outEdgesList, trafficLights, lanes);
```

El método `load ()` de la clase `GraphLoader ()` es usualmente llamado `loadModel ()`.

2. Clase vehículos o cars.

Las clases relacionadas con los vehículos están en el paquete `trafficModelVehicles`. Contiene una clase de coches en general y cinco otras clases que se implementan con la interfaz `IVehicle`. Las clases que implementan esta interfaz tienen métodos que determinan los atributos físicos (velocidad máxima, la longitud, la aceleración máxima, aceleración min) de un tipo de vehículo (jeep, camión, etc.).

La clase de coche o `car` es responsable de implementar el comportamiento de un vehículo. Cada coche tiene un conductor asignado que es quien determina el curso del coche, así como el cambio de carril, como va a cruzar la intersección y el comportamiento que tendrá al observar los semáforos.

2.1. Los atributos más importantes de un vehículo.

Los atributos más importantes de un coche que describen su posición real en la red de carreteras y la ruta que se propone seguir en el próximo paso son los siguientes:

- `actualLane`: El carril en donde está el coche actualmente.
- `fromLane`: El ultimo carril que el carro dejo. Nulo en algunos casos, por ejemplo, cuando el coche está en el carril de partida de su ruta.

- toLane: El próximo carril en donde el carro entrara.
- realPosOnLane: La posición del coche en la actualLane. Su valor es 0 si el coche está en el principio de la calle, 0,5 si es a mitad de camino, etc.
- posOnLane: La posición del coche en la sección de la actualLane entre la intersección de la actualLane y fromLane y la intersección de las actualLane y la toLane. Si el fromLane es nulo el punto de partida de la sección es el punto de partida de la actualLane.
- intersectionPath: Si un coche está en una intersección de esta lista contiene los carriles del coche es tocar al cruzar la intersección. El intersectionPoses e intersectionCoords contienen las posiciones y coordenadas de los puntos donde el coche tiene la intención de entrar y salir del carril superior.
- actLaneMove: Contiene las vías que el coche tiene la intención de tocar en su próximo paso.
- desiredLane: El carril del coche tiene la intención de estar en al final de su próximo paso.
- desiredPosOnLane: La posición en la que el coche le gustaría estar en el desiredLane al final de la etapa siguiente.

2.2. Un paso de un coche.

En cada simulación el método step () de cada carro es llamado.

En el primer paso de un coche el método desiredMove () es llamado, el cual determina la forma en que el vehículo se moverá en el próximo paso. En los subsecuentes pasos el método moveCar () es llamado, el cual trata de mover el coche por el camino determinado por el método desiredMove (), y cuando haya termina de mover el coche, llama a la desiredMove () de nuevo para determinar dónde le gustaría ir en el siguiente paso.

2.3. El método desiredMove () método.

El método desiredMove () calcula la posición actual del vehículo, velocidad, aceleración y la ruta determinada por su conductor donde el vehículo le gustaría moverse en el próximo paso. Almacena los carriles que el movimiento involucra en el actLaneMove y establece el desiredLane y desiredPosOnLane en consecuencia. El reservedNodeList y reservedLaneList del toolbox se actualizan también.

Si alguna parte del movimiento pertenece a una intersección de la `desiredMove ()` determina la ruta completa del coche a través de la intersección y almacena los parámetros de esta ruta en las listas `intersectionPath`, `intersectionCoords` y `intersectonPoses`. De esta manera, los otros coches puede saber dónde el carro le gustaría ir en su siguiente paso, y como para dar lugar a eso en una intersección.

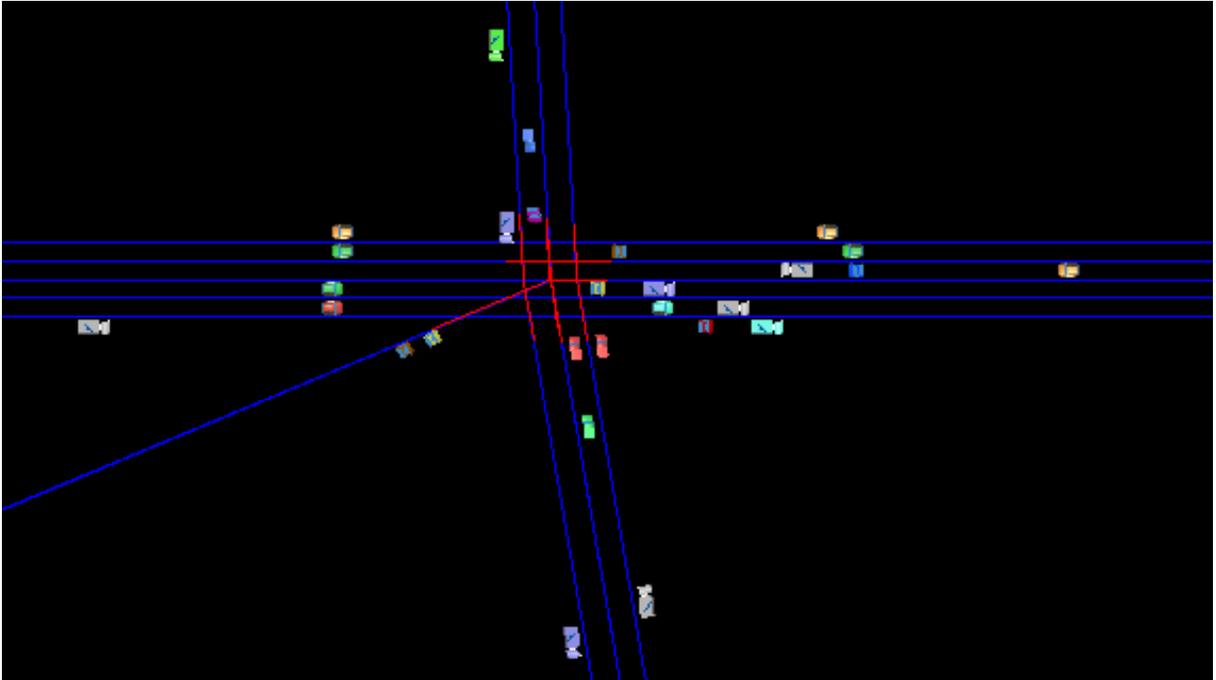


Figura A3 - Las líneas rojas indican las formas en que los coches han de seguir a través de la intersección.

2.4. El método `moveCar ()`.

El método `moveCar ()` método investiga si el coche puede hacer el movimiento planeado, y se mueve el coche en consecuencia. El método `moveCar ()` llama el método del carro `processActMove (..)` que investiga si este tiene que frenar, parar o cambiar de carril debido a los siguientes motivos:

- Semáforos.

- Otros coches delante de este.
- Ceda el paso en una intersección.

Al principio, el método `processActMove (..)` llama al método `detectLight ()` que investiga si hay semáforos en los tramos de carretera donde el coche se quiere mover. Si hay por lo menos un semáforo donde el coche tiene que parar, entonces no puede moverse más allá de la posición del semáforo. Si la propiedad `StopAtYellow` de su conductor es falso que el coche no se detenga en un semáforo cuando la luz está encendida en amarillo o rojo y amarillo.

Entonces el método `processActMove (..)` llama el método `follow ()` que investiga si hay coches en los tramos de carretera que quieran que pase, o en la ruta que lleva a través de una intersección. Si hay por lo menos uno, ese no puede ir más allá de la parte trasera del coche más cercano. Si la propiedad `cautiousCross` del conductor del coche es cierta, entonces el coche no entra en una intersección si el coche está siguiendo todavía no ha salido esa intersección.

Por fin, el método `processActMove (..)` llama al método `giveWay ()`. Si en alguna parte de la ruta el coche quiere tomar un cruce el método `giveWay ()` calcula si hay algunos vehículos cuyo recorrido a través de la unión intersección con la ruta de ese vehículo podrían cruzarse. Al principio, el método `giveWay ()` determina el conjunto de nodos que pertenecen a los bordes del coche el cual es conducido al cruzar la intersección. Luego se determina (utilizando el `reservedNodeList` del `toolbox`), el conjunto de los coches que están cerca de estos nodos. Entonces, para todos los coches de la serie que se encuentra en la intersección en ese momento el método `giveWay ()` determina si su camino a través de la intersección y el camino del coche que está intensificando ahora se cruzan o no. Si se cruzan y los dos coches no van de la misma manera que el coche está intensificando en estos momentos no se le permite entrar en la intersección o se detiene si ya está dentro de él.

Los tres últimos métodos de toda la vuelta al lugar (calle y su posición en el carril), el coche se puede mover más lejos, según ellos, y el método `processLane (..)` devuelve el lugar más cercano al lugar real del coche.

Si el coche no puede hacer su movimiento deseado por alguna de las razones anteriores y que no está dentro de una intersección a continuación, si la propiedad `laneChanger` de su

controlador es cierto, entonces el coche intenta cambiar de carril, de lo contrario el coche se pega a que plan de viaje y no cambiar de carril.

Al final, el `moveCar ()` llama a la `desiredMove ()` para determinar dónde le gustaría ir en el siguiente paso.

2.5. Uso de un nuevo objeto de la clase de coches, un nuevo coche.

Para utilizar una clase de vehículos nuevos en la simulación de heredar una clase del coche y añadir la siguiente línea a la configuración () de la clase del modelo:

```
setCarClassName ("packageName.carClassName");
```

2.6. Las clases que implementan la interfaz IVehicle.

Estos son los `Jeep`, `PickupCar`, `SlowTruck`, `StandardCar`, clases de camiones. Como sus nombres indican, corresponden a los diferentes tipos de vehículos. Los diferentes tipos de vehículos tienen diferentes valores de los atributos físicos.

Los diferentes tipos también tienen diferentes imágenes devueltas por sus `getPicturesArray ()` métodos.

El `createCarObjectFromItself (coches c)` el método de una clase que implementa `IVehicle` establece los atributos físicos y la imagen del coche `c`. Los vehículos pertenecientes a la misma clase tienen los mismos valores de sus atributos físicos.

El `getPicturesArray ()` devuelve la lista de los nombres de las imágenes de los vehículos pertenecientes a esta clase puede tener. Por lo general, tienen la misma forma pero diferente color. El pintor objeto responsable de pintar la imagen de un coche elige al azar una imagen de la lista y lo utiliza mientras que el coche existe.

3. Clase de conductores.

Un conductor determina el curso que tiene el coche, así como el cambio de carril, cruzando la intersección y el comportamiento de los semáforos de observación del coche. Las clases de los conductores están en el paquete `trafficModelDrivers`.

Las clases del conductor implementan la interfaz `Idriver`.

3.1 El interfaz de `Idriver`.

Los métodos más importantes declarados en este interfaz:

- `setToolbox (tb GraphToolbox)`: Establece el toolbox del conductor.
- `assignCar (coche de coches)`: Asigna un coche para el conductor.
- `getShortestLanePath (fromEdgeId int, int toEdgeId, fromLaneIndex int, toLaneIndex int)`: Devuelve el camino más corto (la lista de los carriles de la ruta) desde el carril de `fromLaneIndex-eth` del borde cuyo `id` es el `fromEdgeId` al carril `toLaneIndex-eth` del borde cuyo `id` es el `toEdgeId`.
- `ArrayList <Lane> getShortestLanePath (fromLane Lane, toLane Lane)`: Devuelve el camino más corto desde la `fromLane` a la `toLane`.
- `getLanePath ()`: Devuelve la ruta el conductor tiene la intención de seguir.
- `setLanePath (ArrayList newPath <Lane>)`: Establece la ruta que el conductor tiene la intención de seguir. Agrega un carril ficticio para el inicio de la `newpath` y un carril de otras ficticias hasta el final de la `newpath`.
- `setLanePathMinusEnds (ArrayList newPath <Lane>)`: Lo mismo que el anterior excepto que no agrega carriles ficticios a la `newpath`.
- `remFirstFromLanePath ()`: Elimina el carril desde el principio del camino.
- `makeShortestLanePath (int fromEdgeId, toEdgeId int, int fromLaneIndex, toLaneIndex int)`: Calcula la ruta más corta el carril `fromLaneIndex-eth` del borde cuyo `id` es el `fromEdgeId` al carril `toLaneIndex-eth` del borde cuyo `id` es el `toEdgeId` y pone esta camino como el camino del conductor tiene la intención de seguir.
- `makeShortestLanePath (fromLane Lane, toLane Lane)`: Crea el camino que conecta las rutas descritas por los parámetros y conjuntos de este camino como el camino del conductor tiene la intención de seguir.
- `isKnowBlockedLanes ()`: Devuelve si el conductor sabe que las calles de la red de carreteras están bloqueadas.
- `addBlockedLane (l Lane)`: añade un carril a la lista de los carriles bloqueados el conductor sabe. Se utiliza sólo si el `isKnowBlockedLanes ()` devuelve falso, de lo contrario el conductor

sepa que todos los carriles bloqueados por defecto. El conductor es consciente de todos los carriles bloqueados figuran en su lista de los carriles bloqueados.

- `isLaneChanger ()`: Devuelve si el conductor cambia de carril cuando se lleva a cabo por un coche más lento o no.
- `setLaneChanger (laneChanger booleano)`: determina si el conductor cambia de carril cuando se lleva a cabo por un coche más lento o no.
- `isStopAtYellow ()`: Devuelve si el conductor se detiene en los semáforos de color amarillo o rojo y amarillo.
- `setStopAtYellow (stopAtYellow booleano)`: determina si el conductor se detiene en los semáforos de color amarillo o rojo y amarillo.
- `isPathChange ()`: Devuelve si un conductor cambia de ruta si se mantiene corresponde.
- `setPathChange (pathChange booleano)`: determina si el conductor cambia de ruta si se mantiene corresponde.
- `isCautiousCross ()`: Si se devuelve true si el conductor no entrar en una intersección hasta que el coche delante de ella sale de la intersección.
- `setCautiousCross (cautiousCross booleano)`: determina el valor de la `isCautiousCross ()` devuelve.

4. El paquete TrafficModel.

El paquete contiene la clase `trafficModel TrafficModel`, que es la clase modelo general, la interfaz `TafficModelGui` que incluye las clases del modelo que se deben de aplicar para visualizarlo, y la clase `InputCarStatistics` que dice en estadísticas en forma de archivos cuando los vehículos nuevos deben entrar en la red de carreteras y por supuesto que camino deben de tomar.

La Clase TrafficModel

Esta clase extiende la clase `massgui.engine.AbstractSimModel`. Para crear un nuevo modelo de extender la clase `TrafficModel` y establecer sus parámetros en el método `setup ()`. El modelo de cargas de la red de carreteras, se rellena con los coches y los pasos los coches y los semáforos.

Los atributos más importantes de la clase TrafficModel:

- cars: La lista de los coches usados en una simulación
- trafficLights: Las luces de tráfico utilizados en la simulación.
- toolbox: El objeto GraphToolbox que contiene toda la información sobre la red de carretera utilizados en la simulación.
- statLanes: Una lista que describe cuando los vehículos nuevos deben entrar en la red de carreteras y lo que por supuesto que debe tomar.

Los siguientes atributos se pueden establecer en el método setup ():

- inputCarStatisticsFile: El nombre del archivo de texto que describe cuando los vehículos nuevos deben entrar en la red de carreteras y lo que por supuesto el camino que deben de tomar.
- trafficLightFile: El nombre del archivo que describe el semáforo posiciones y condiciones de funcionamiento.
- edgeFileName: El nombre del archivo de descripción de los bordes y las calles de la red de carreteras.
- joinFileName: El nombre del archivo que describe las conexiones de los carriles.
- driverClassName: El nombre de la clase de los conductores de los vehículos del modelo.
- carClassName: El nombre de la categoría de los coches que usara el modelo.
- graphLoaderClassName: El nombre de la clase que va a cargar todos los elementos en el modelo.

Los métodos más importantes de la clase TrafficModel

- setup (): Este método establece los valores de los parámetros anteriores antes de que el modelo sea cargado, muchos de los parámetros tienen valores por defecto.
- begin (): Este método llama al método buildModel () y después al método buildSchedule () del modelo.
- buildModel (): Llama al método loadModel () y luego al método buildStatLanes () e inicializa el método toolbox.
- loadModel (): Carga el gráfico de la red de carreteras del método toolbox usando las clases y los archivos del método setup() y establece los carros (cars) y los semáforos (trafficLights) de acuerdo con lo planeado.
- buildStatLanes (): Lee la información del inputCarStatisticsFile a la statLanes.

- `step ()`: Este método se llama en cada paso de la simulación. En un inicio este llama al método `addStatCars ()` que pone nuevos carros en la red de carreteras cuando sea necesario de acuerdo con método `statLanes`. El tipo de los nuevos automóviles es elegido al azar. Entonces pasa todos los nuevos carros y semáforos a la simulación.

Rellenar con las Rutas de Coches

Cada simulación necesita un archivo de texto que describe cuando los vehículos nuevos deben entrar en la red de carreteras y el camino que habrán de tomar. El método `buildStatLanes ()` de la clase `InputCarStatistics` es llamado por el método `buildStatLanes ()` para cargar esta información a la `statLanes` de la clase del modelo.

La sintaxis de una fila del archivo de texto es el siguiente:

```
<Start_edge_id <int>> <destination_edge_id <int>> <start_lane_position <int>>  
<destination_lane_position <int>> <frequency <int>>
```

- `start_edge_id`: La Identificación del borde, donde el coche empieza su curso.
- `destination_edge_id`: La Identificación del borde, donde el coche termina su curso.
- `start_lane_position`: La posición de los carriles en el borde donde el coche empieza su curso.
- `end_lane_position`: La posición de los carriles en el borde donde el coche termina su curso.
- `frequency`: En cada paso de la frecuencia de simulación un coche comienza su curso desde el inicio hasta el destino determinado por los cuatro primeros parámetros.

Por ejemplo, si queremos enviar un vehículo desde el carril cero del primer borde al segundo carril del décimo borde por cada 100 simulaciones debemos de añadir la línea siguiente al archivo:

```
1 10 0 2 100
```

Una vez creado el archivo de texto que describe los coches que se utilizarán en la simulación la edición del método `setup ()` será el siguiente:

```
public void setup ()  
{  
....  
setInputCarStatisticsFile  
("path / cars.txt");  
....
```

}

Donde cars.txt es el nombre del archivo de descripción de los semáforos y path es la ruta de acceso del directorio donde está el archivo.

El método addStatCars () de la clase trata de poner en la red de carreteras los coches que hay que añadir en el paso dado de acuerdo con la statLanes.

Si un coche no puede entrar en la red de carreteras en el paso dado porque no hay otro coche en el comienzo de su carril de salida, entonces la addStatCars () trata de poner el coche en ese carril en cada paso de simulación posteriores hasta que lo consiga.

Un coche elige el camino más corto desde su inicio hasta su destino y lo trata de seguir. Los coches pueden alterar la ruta de acceso durante la ejecución (cambio de carril, evitar un tramo de carretera bloqueada), pero no cambiar su destino.

La interfaz TrafficModelGui

Declara los métodos de una clase extiende la clase del modelo y es responsable de la visualización que del modelo se debe de implementar. Los métodos más importantes son los siguientes:

- getDisplayCount (): Devuelve el número de MDisplaySurface-s a ser desplegado.
- DisplayOwner getDisplay (int index): La interfaz DisplayOwner es parte del paquete de MassGui y se utiliza para la extracción de los desplegados (DisplaySurface, interfaces OpenGraph y sus descendientes). Consulte la documentación de Java de la MassGUI.
- buildDisplay (): La forma más sencilla de implementar este método es definir las superficies (instancias de clases que se extiende la clase DisplayGeneric) que se mostrará y agregarlo a un objeto de MDisplaySurface. Véase, por ejemplo, la clase ViennaDemoGui en el paquete viennaDemo.
- step (): Implementar esta simplemente llamando el método step () de la super clase entonces el updateDisplay () del objeto de MDisplaySurface.

Parámetros del modelo

Un modelo básico tiene cinco parámetros predefinidos, y los nuevos parámetros también se pueden añadir.

Cuando una simulación con visualización se está corriendo estos parámetros se pueden establecer en los "parámetros del modelo" del panel.

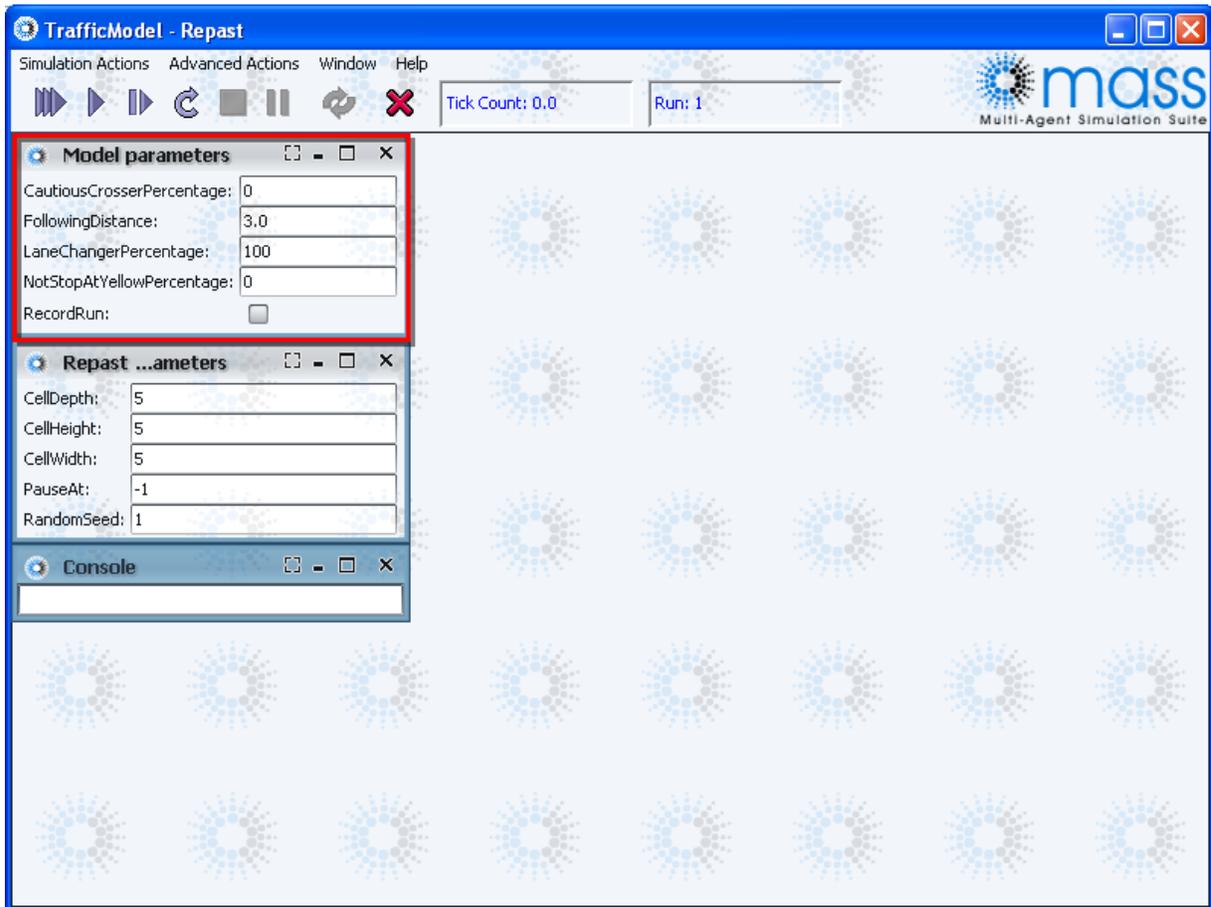


Figura A4. Los parámetros del modelo.

Parámetros predefinidos

- CautiousCrosserPercentage: El porcentaje de conductores que no circula por una intersección si no está seguro de que puede manejar a través de él sin ser sostenido por otros coches.
- FollowingDistance: La distancia de seguimiento de los coches de mantener.
- LaneChangerPercentage: El porcentaje de los conductores que cambian de carril, si se llevan a cabo por otros coches.
- NotStopAtYellowPercentage: El porcentaje de los conductores que hacen caso omiso de un semáforo, si es de color amarillo o rojo y amarillo.
- RecordRun: Si es verdad los parámetros de cada paso de cada vehículo se consigna en el archivo 3D/steps.txt lo posible para hacer un video en 3D de la simulación.

Adición de los parámetros del modelo

Para agregar un parámetro a un modelo se define una variable en la clase del modelo, y se escriben los métodos get () y set (.). Luego se sobrescribe el método getInitParam () del modelo. Por ejemplo, si queremos añadir la testParameter int para el modelo que hemos agregar las siguientes líneas a la clase del modelo:

```
public int testParam;

    public int getTestParam() {
        return testParam;
    }
    public void setTestParam(int testParam) {
        this.testParam = testParam;
    }
    ....
    public String [ ] getInitParam()
    {
        String[ ] params = {
            "cautiousCrosserPercentage",
            "followingDistance",
            "laneChangerPercentage",
            "notStopAtYellowPercentage",
            "testParam"
        };
        return params;
    }
```

Cualquiera de los parámetros del modelo predefinido puede ser omitido de la lista.

Apéndice B

Diagramas de clases del ambiente TRAFFIX

Traffix está compuesto de 8 paquetes, en cada uno de los cuales se almacenan las diferentes clases que corresponden a cada uno de los elementos que formarán un nuevo modelo.

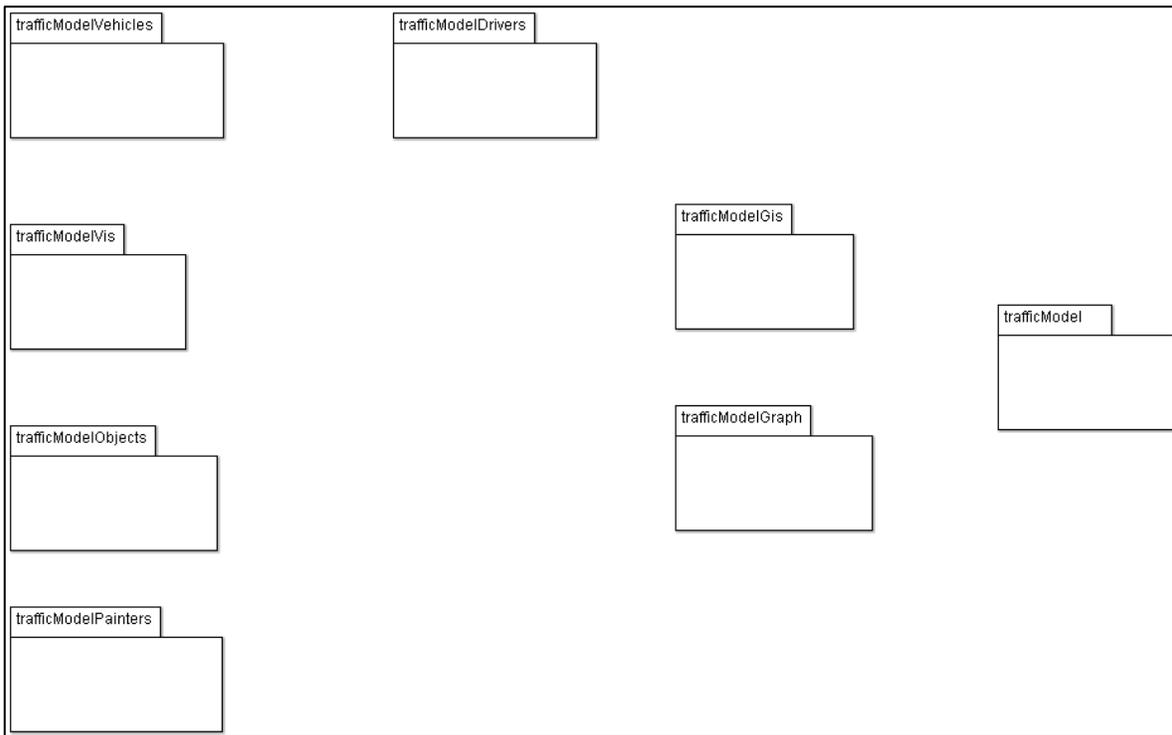


Figura B1. Paquetes del ambiente Traffix.

1. Paquete trafficModelVehicles.

Este paquete corresponde a las características de cada uno de los vehículos que intervendrá en el modelo, las clases que forman este paquete se encuentran en el siguiente diagrama de clases.

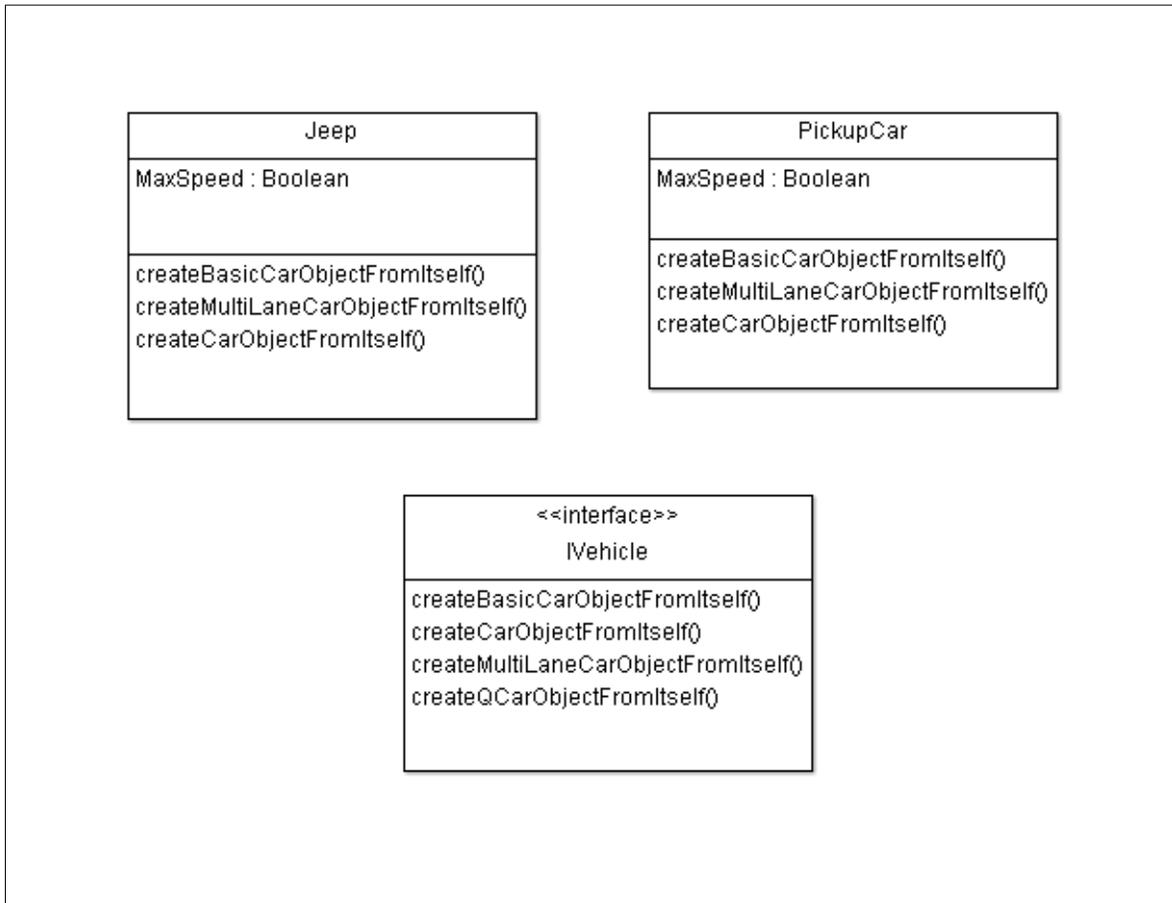


Figura B2. Clases del paquete trafficModelVehicles.

2. Paquete trafficModelDrivers.

Este paquete incluye todas las clases correspondientes a los conductores que intervendrán en el modelo.

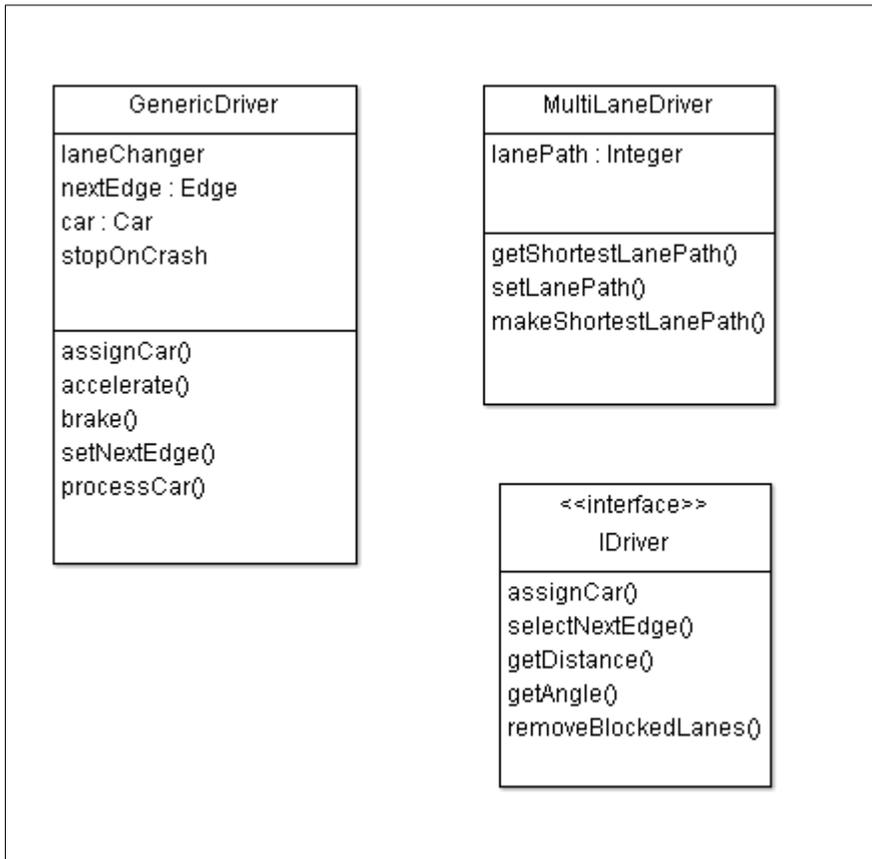


Figura B3. Clases del paquete trafficModelDrivers.

3. Paquete trafficModelObjects.

En este paquete se incluyen las clases de los elementos correspondientes a los elementos que aparecerán en las vías, como son los semáforos y señales viales.

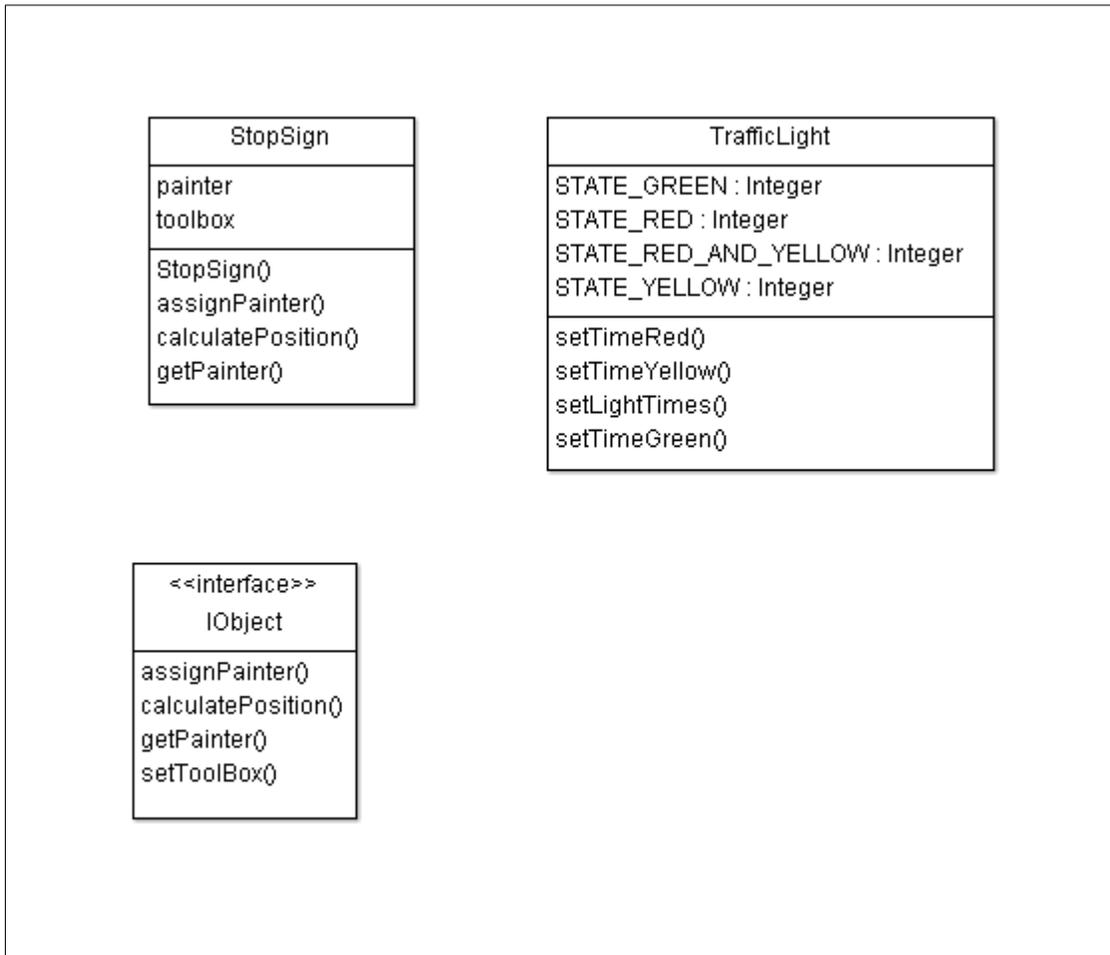


Figura B4. Clases del paquete trafficModelObjects.

4. Paquete trafficModelGis.

En este paquete se incluyen las funcionalidades necesarias para poder desarrollar modelos utilizando dentro de estos Sistemas de Información Geográfica.

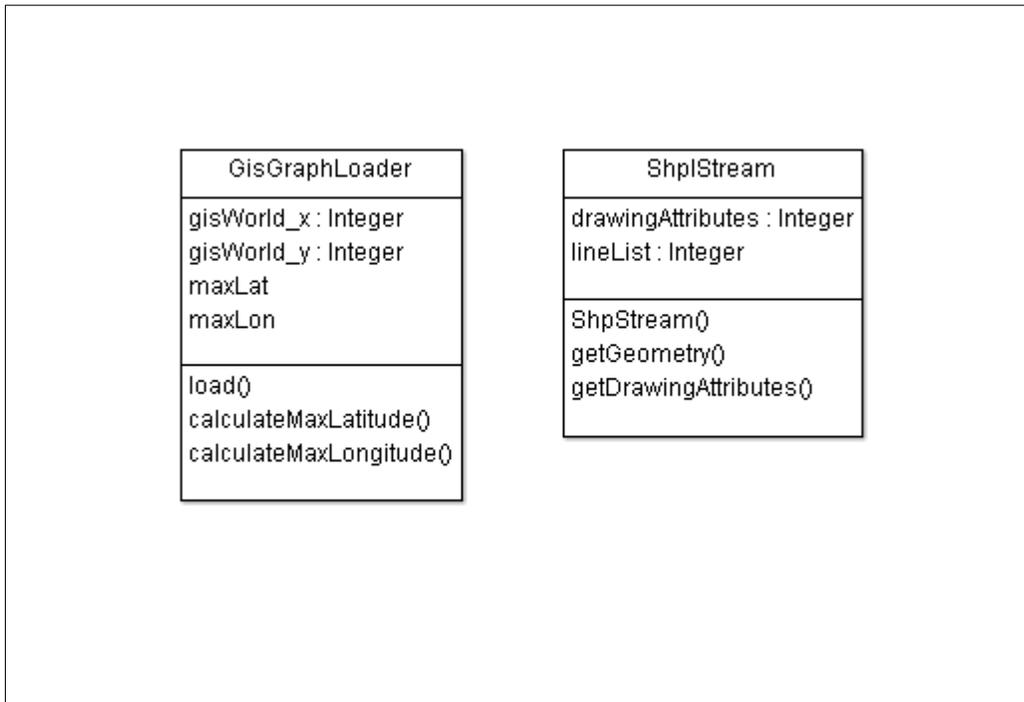


Figura B5. Clases del paquete trafficModelGis.

5. Paquete trafficModelPainters.

En este paquete se incluyen las clases que le dan colores a los diferentes elementos del modelo.

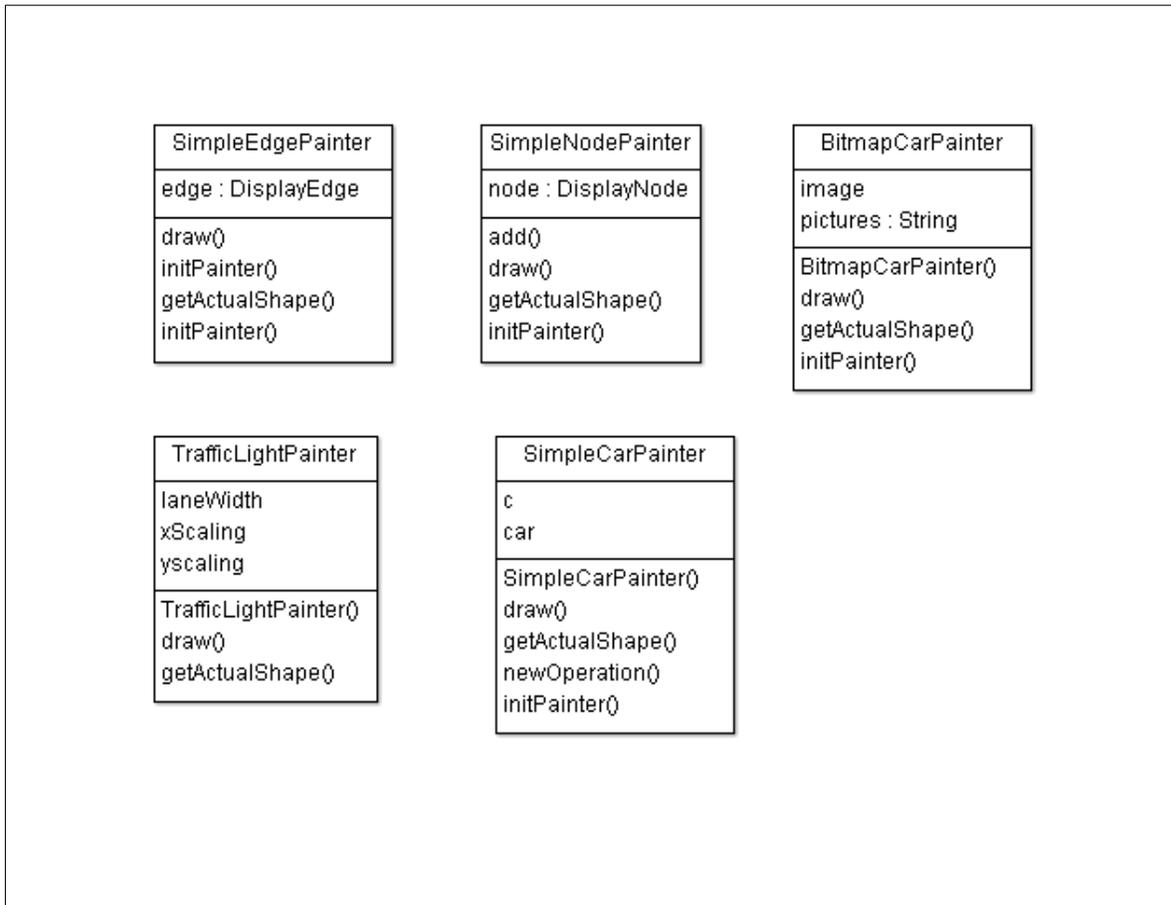


Figura B6. Clases del paquete trafficModelPainters.

6. Paquete trafficModelGraph.

En este paquete se incluyen las clases que cargan todas las características del modelo de manera gráfica.

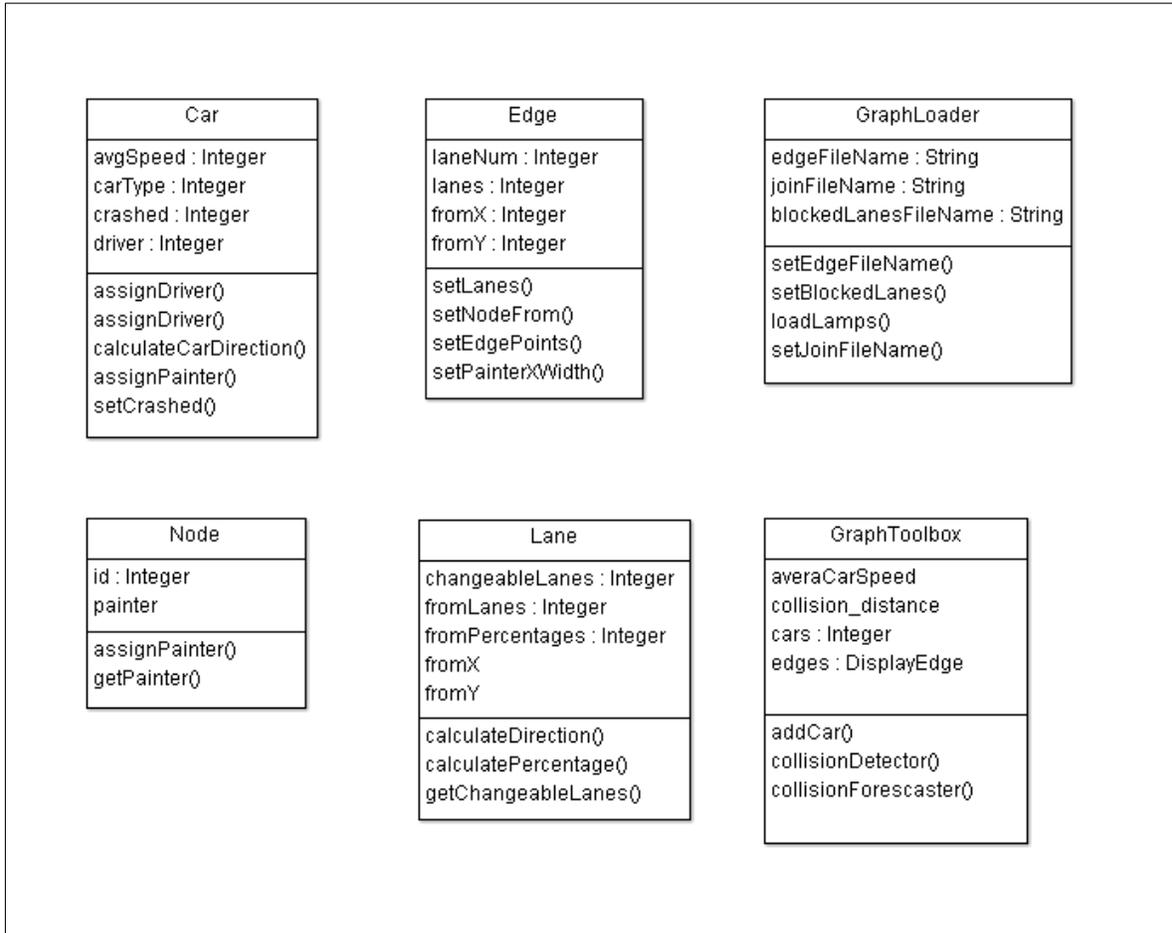


Figura B7. Clases del paquete trafficModelGraph

7. Paquete trafficModelVis.

En este paquete se incluyen las clases que nos permiten visualizar de una manera específica cada elemento del modelo.

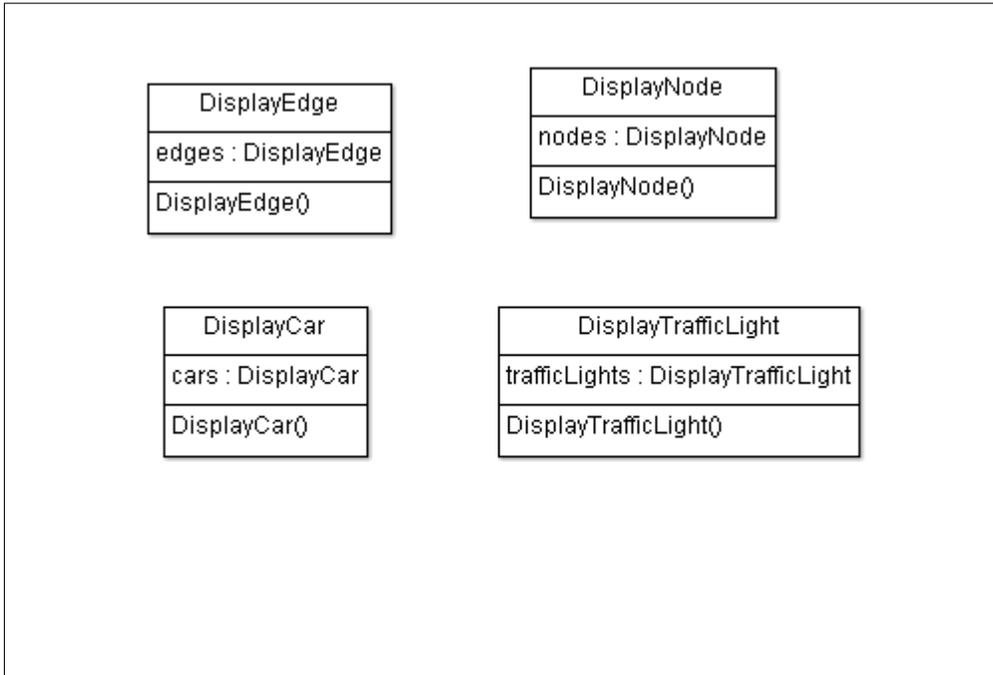


Figura B8. Clases del paquete trafficModelVis.

8. Paquete trafficModel.

Es el paquete medular del sistema en el que se agrupan todos los elementos del modelo para desplegarse y funcionar de acuerdo con diseño.

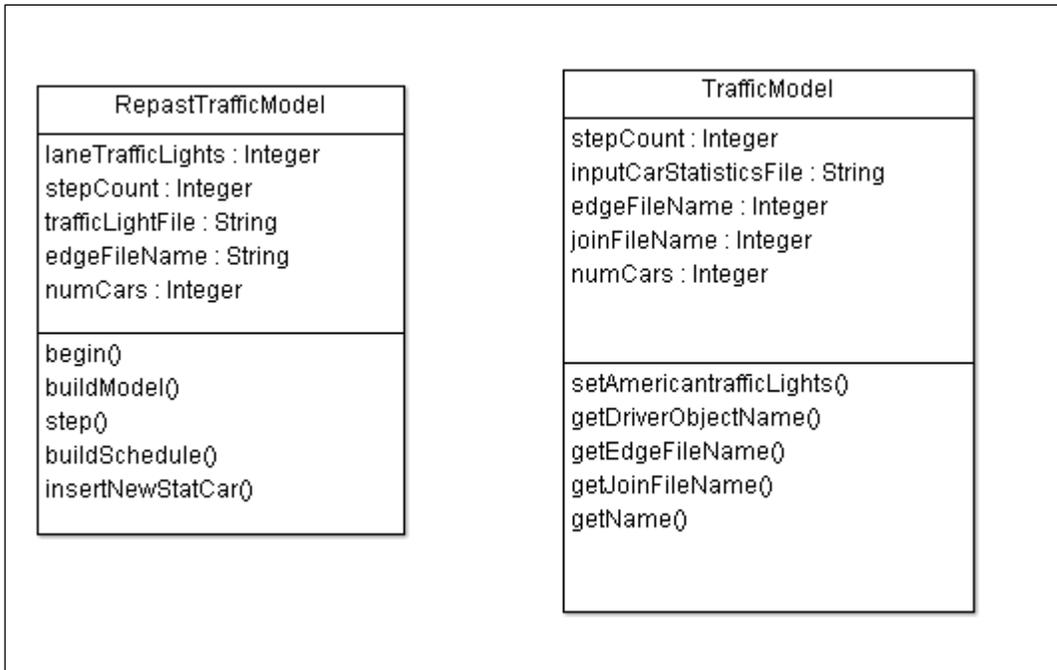


Figura B9. Clases del paquete trafficModel.

Esta hoja se dejó en blanco de manera intencional

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, Alfonso, “Los accidentes y la promesa 2089”, Excelsior, Agosto 19, 2012, http://www.excelsior.com.mx/index.php?m=nota&seccion=opinion&cat=11&id_nota=854248 , (Consultado en Mayo 25, 21012).
- Ali, Walidi, *2D/3D Multi Agent GeoSimulation, The Case of Shopping Behavior in Square One Mail (Toronto)*, VDM Verlag Dr. Müller, (Quebec City, Canada, 2006).
- Álvarez, F.J. Del Rio, “Causas que originan los accidentes de tránsito”, *Revista Española de Investigaciones Quirúrgicas*, número 1, (Diciembre, 2013): 32.
- Alvarez, M.D.; Sanz, R.; Garrido, N. and Torres A., “Factors that affect the quality of the no-waste fraction of selectively collect solid waste in Catalonia”, *Waste Management*, (2007): 359-366.
- Aguirre Gómez Raúl, *Conceptos de Geomática y estudios de caso en México*, México: Instituto de Geografía de la UNAM, Colección Geografía para el siglo XXI, 2009.
- Analysis Spatial on Line, <http://www.spatialanalysisonline.com/output/> , (Consultado Abril, 2010).
- Anderson, James A., “Redes Neuronales”, Alfa Omega Grupo Editor, S.A. de C.V., Primera Edición Agosto 2007.
- Anderson, James A., “Redes Neuronales”, Alfa Omega Grupo Editorial, México, Agosto 2008.
- Allan, Rob, “Survey of Agent Based Modelling and Simulation Tools”, *Computational Science and Engineering Department*, (June, 2009): 1-15.

- Berger, M. Les périurbains de Paris. De la ville dense à l métropole éclatée? CNRS Éditions, Paris, citado por Módenes J. Antonio en Movilidad espacial: Uso temporal del territorio y poblaciones vinculadas, <http://www.ced.uab.es/publicacions/PapersPDF/Text311.pdf> , (Centro de Estudios Democráticos, 2007).
- Benenson, Itzhak and Torrens, Paul M., *Geosimulation, Automata-based modeling of urban phenomena*, England: John Wiley & Sons, LTD, 2005.
- Bruce Eckel, *Aplique C++*, México: Mc Graw-Hill, 2008.
- Booch, Grady; Rumbaugh, James y Jacobson, Ivar, *El lenguaje unificado de modelado, UML 2.0*, Madrid España: Pearson Ediciones, 2006.
- Benenson, Itzhak and Kharbash, Vlad, “Geographic Automata Systems and the OBEUS software for their implementation”, University Tel Aviv, Ramat-Aviv, (Enero, 2010): 130-138, <http://www.tau.ac.il/~benny> , (Consultado en Mayo, 2012).
- Barnes, David J., Chu, Dominique, *Introduction to Modeling for Biosciences*, United States: Springer, 2010.
- Bálint, Balázs and Gulyás, László, “Traffix: a Framework for Agent-Based Traffic Simulations”, In Proceedings of the 5th European Social Simulation Association Conference (ESSA 2008), Brescia, Italy, 29th October, 2008.
- Bálint, Balázs, “Traffix Developer Guide”, Aitia Company, (Budapest: November 2007): 32.
- Bloomberg, L. y Dale, J., “Comparison of VISSIM and CORSIM Traffic Simulation Models on a Congested Network”, Transportation Research Record, núm. 1727, (National Research Council, Washington, 2000): 52—60.

Bálint, Balázs y Gulyás, László, “Traffix: a Framework for Agent-Based Traffic Simulations”, presentado en 5th European Social Simulation Association Conference (ESSA 2008), Brescia, Italy, 29th October, 2008.

Biagi, Marta Cristina, *Investigación Científica*, España: Editorial Juruá LDA, 2010.

Borda, Mariela, *El Proceso de Investigación*, México: Universidad del Norte, 2011.

Buzai, Gustavo D., *Análisis Socio espacial con Sistemas de Información Geográfica*, Argentina: Editorial Lugar, 2009.

Cal y Mayor, Análisis de flujo vehicular,

<http://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/analisis-de-flujo-vehicular-cal-y-mayor.pdf> , (Consultado Diciembre, 2013).

Cal y Mayor, Rafael, *Ingeniería de Tránsito, fundamentos y aplicaciones*, México, D.F.: Editorial Alfaomega, 2007.

Chías Becerril, Luis. “Diagnostico Espacial de los Accidentes de Tránsito en el DF”, CENAPRA,

http://www.cenapra.salud.gob.mx/interior/Materiales_CONAPRA/Publicaciones_Especializadas/4_Diagnxstico_espacial_de_los_accidentes_de_trxnsito_en_el_DF_-_PRELIMINAR.pdf , (Consultado Abril 2011).

Cerquera Escobar, Ángela, “La configuración espacial geográfica, contexto esencial de estudio del transporte y la accidentalidad”, *Revista Geográfica de América Central*, número especial Egal (Junio 2011): 1-24.

Cenapra, “Estrategia Nacional de Seguridad Vial”,

http://www.cenapra.salud.gob.mx/interior/estrategia_nacional_de_seguridad_vial.html , (Consultado Marzo, 2012).

Cenapra, “México disminuirá 60 mil muertes por accidentes de tránsito en 10 años”, Cenapra, http://www.cenapra.salud.gob.mx/CENAPRA_2010/buenas_practicas/menos_60_mil_muertes.html , (Consultado Septiembre, 2011).

Comas, David y Ruiz, Ernest, *Fundamentos de los sistemas de información geográfica*, España: Editorial Ariel Geografía, 1997.

Castle, Christian J. E. and Crooks, Andrew T., “Principles and Concepts of Agent-Based Modelling for Developing Geospatial Simulations”, Centre for Advanced Spatial Analysis, University College London, Paper 110 (Septiembre, 2006): 1-19.

Chun, Yongwan, *Spatial Statistics and Geostatistics: Theory and Applications for Geographic Information Science and Technology*, Los Angeles: SAGE Publications Ltd, 2003.

Crooks, Andrew; Castle, Christian and Batty, Michael, “Key Challenges in Agent-Based Modelling for Geo-Spatial Simulation”, Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), University College London, (Mayo 2013): 1-10.

Coopr, Sandia National Laboratories, <https://software.sandia.gov/trac/coopr/wiki/Pyomo> , (Consultado Enero, 2013).

Cox, A.B. and Gilfford, F., *An overview to geographic information system*, Lincoln Institute of Land Policy, Cambridge, Massachusetts, 1997.

Departamento de Salud Pública, “Accidentes de tránsito por vehículo de motor”, <http://www.facmed.unam.mx/deptos/salud/portadas/accidtrans/index.html> , (Consultado Octubre, 2010).

Dieterich, Heinz, *Nueva Guía para la Investigación Científica*, México: Ariel, 2009.

Dibiase, David; Demers, Michel; Johnson, Ann and others, *Body of Knowledge*, Washington, D.C.: Association of American Geographers, 2009.

Dresner, K. y Stone, P., “Multiagent Traffic Management: A Reservation-Based Intersection Control Mechanism”, Presentado en the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, en New York, Julio 19 – 23, 2004.

Eckel, Bruce, *Piensa en Java*, México: Pearson España, 2012.

Escobar, FÁ Cerquera, “La configuración espacial geográfica, contexto esencial de estudio del transporte y la accidentalidad” (2013), Universidad Nacional de Costa Rica, <http://repositorio.una.ac.cr/handle/11056/5712>, (Consultado en Octubre 20, 2011).

El Universal, “Va gobierno federal por una cultura vial”, Periódico El Universal, <http://www.eluniversal.com.mx/notas/864885.html> , (Consultado Diciembre, 2011).

Faiz, Sami and Krichen, Saoussen, *Geographical Information System and Spatial Optimization*, CRC Press Taylor & Francis Group, USA, 2013.

Fujita, Masahisa y Krugman, Paul, “La nueva geografía económica: pasado, presente y futuro”, *Investigaciones Regionales*, número 004, (España, 2004): 177-206.

García Beltran, Ángel, *Programación con Java 7*, México: Visión Libros, 2009.

García Martínez, José, *Método e Investigación Administrativa. Guía de Elaboración de Tesis*, México: Editorial Trillas, 2010.

Goodchild, Smith and Longley, “Geospatial Analysis”, CASA, <http://www.spatialanalysisonline.com/output/> , (Consultado Junio, 2009).

Geosimulation, <http://www.geosimulation.org/geosim/> , (Consultado Junio, 2009).

Google Maps, <https://www.google.com.mx/maps/@19.5068908,-99.0979626,14z> ,
(Consultado Mayo, 2013).

Greenshields, B. D., “A Study of Traffic Capacity”, Highway Research Board Proceedings,
Vol. 14 (Traffic Bureau of the Ohio State Highway Department, 1984): 448-477.

Greenberg, H., “An Analysis of Traffic Flow”, Operations Research, Vol. 7, (United States,
1989): 79-85.

Gonzalez, R., Python para Todos, <http://mundogeek.net/tutorial-python/> , (Consultado
Octubre, 2013).

Haining, Robert, *Spatial Data Analysis: Theory and Practice*, United States: Cambridge
University Press, 2003.

Hernández Mota, Juan Martín, *Los Accidentes de Tránsito, Manual Básico de Investigación de
Hechos de Tránsito Terrestre*, (México: Flores Editor y Distribuidor, S.A. de C.V.,
2010).

Heath, Brian; Hill, Raymond and Ciarallo, Frank, “A Survey of Agent-Based Modeling
Practices (January 1998 to July 2008)”, Journal of Artificial Societies and Social
Simulation, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/4/9.html> , (Consultado Octubre, 2011).

Haddon, JR. W., *Advances in the epidemiology of injuries as a basis for public policy*, Public
Health Report 1980, Ginebra 1980.

Instituto Nacional de Salud Pública, “Accidentes de tránsito: importante problema de salud”, Instituto Nacional de Salud Pública, Mayo 10, 2010, <http://www.insp.mx/noticias/boletines-de-prensa/205-accidentes-de-transito-importante-problema-de-salud.html> , (Consultado Mayo 15, 2012).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, “Información de accidentes de tránsito”, INEGI, Agosto, 2012, <http://www.inegi.org.mx> , (Consultado en Diciembre 15, 2012).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), “Definición, aplicación de la geografía y representaciones de la tierra”, Dirección de Capacitación INEGI, www.inegi.gob.mx , (Consultado Junio, 2009).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, “Estadística Accidentes de Tránsito”, INEGI, http://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/proyectos/bd/continuas/transporte/accidentes.asp?s=est&c=13159&proy=atus_accidentes , (Consultado Marzo, 2012).

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), “Cartas Topograficas”, <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/detalle2.aspx?c=2354&upc=0&s=geo&tg=999&f=2&cl=0&pf=Prod&ef=0&ct=206000000>, (Consultado en Noviembre 4, 2014).

Instituto Mexicano del Transporte, Anuario Estadístico de Accidentes en Carreteras Federales 1996, IMT, <http://www.imt.mx/Espanol/Accidentes/documento.html> , (Consultado Enero, 2011).

Instituto de Acceso a la Información Pública y Protección de Datos Personales del Distrito Federal, “Vías con mayor cantidad de accidentes”, http://www.infodf.org.mx/pdfs/resoluciones/recur05/RI_0058.pdf, (Consultado Febrero, 2012).

- Iturbide, Antonio; Sánchez, Lourdes; Castillo, Lourdes y Chias, Luis, *Consideraciones conceptuales sobre los sistemas de información geográfica*, México: Instituto de Geografía de la UNAM, 2009.
- Jacobson, Ivar; Booch, Grady y Rumbaugh, James, *El Proceso Unificado de Desarrollo de Software*, Pearson Addison Wesley, Madrid: 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”, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/12/2/2.html> , (Consultado Abril, 2013).
- Journal of Artificial Societies and Social Simulation, “Evaluation of free Java-libraries for social scientific agent based simulation”, vol. 7, <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/7/1/6.html> , (Consultado Marzo, 2013).
- Katok, Anatole and Hasselblatt, Boris, *Introduction to the modern theory of dynamical systems*, England: Cambridge University Press, 10th, 2009.
- Knowles, R., Docherty, I. and Shaw, J., *Transport Geographies: Mobilities, Flows and Spaces*, United States of America: Blackwell Publishing, 2008.
- Kölling, Michael, *Introducción a la programación con Greenfoot*, México: Pearson España, 2010.
- Laboratorio para la Ciudad (2014), “Reporte Vial”, Enero 2013, <http://datos.labplc.mx/> , (Consultado Diciembre del 2014).
- Laval, Université, “Computer Simulation, Multiagent Based Simulation and Multiagent Geosimulation”, <http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/fichiers/23343/ch02.html> , (Consultado Junio, 2010).

Lawhead, J., *Learning Geospatial Analysis with Python*, Packt Publishing Open Source, Birmingham, UK, 2013.

Longley, Paul M. and Batty, Michael, *Advanced Spatial Analysis*, Centre for Advanced Spatial Analysis, CASA, United States of America: ESRI Pres, 2003.

Li, Shag and Zhao, Dongmei, “Prediction of Road Traffic Accidents Loss Using Improved Wavelet Neural Network”, Institute of Intelligent Information Engineering Zhejiang University, Southwest Jiaotong University, (Junio, 2010):87-98.

Liyan, Qin and Chunfu, Shag, “Macro prediction model of road traffic accident based on neural network and genetic algorithm”, Intelligent Computation Technology and Automation, Volume No. 1, (2009): 354-357.

Lefevre, “La producción del espacio”, <http://www.notbored.org/space.html> , (Consultado Mayo, 2010).

Longley, Paul A. and Batty, Michael, *Advanced Spatial Analysis: The CASA Book of GIS*, New York: Centre for Advanced Spatial Analysis, 2013.

Martinez, Miguel and Levachkine, Serguei, *Dynamic Models of Geographic Environment Using Ontological Relations*, (Lectures Notes in Geoinformation and Cartography, 1a Edition USA: Springer, 2009).

Malleson, Nicolas, “Agent-Based Modelling of Burglary”, (Doctoral Thesis, The University of Leeds School of Geography, 2010).

Milenio Diario, “Accidentes viales causan 24 mil fallecimientos al año en México”, Milenio Diario, <http://www.milenio.com/node/580099> , (Consultado Noviembre, 2010).

Maycock G., “Drinking and Driving in Great Britain – a review”, Studio TRL, (Enero, 1997): 22.

Marble, Duane F., “Rebuilding the Top of the Pyramid: Structuring GIS Education to Effectively Support GIS Development and Geographic Research”, Department of Geography, The Ohio State University Columbus, http://www.ncgia.ucsb.edu/gishe/program_files/papers/marble/marble.html, (Consultado Noviembre, 2011).

Mwatelah, Dr. Josphat K. Z., “Application of Geographical Information Systems (Gis) to Analyze Causes of Road Traffic Accidents”, Case Study Of Kenya, Kenya, (October 2001): 1-7, <http://www.fig.net/pub/proceedings/nairobi/mwatelah-TS11-3.pdf> , (Consultado Mayo, 2013).

Murphy, John T., “A RePast Tutorial, University of Arizona & Arizona State University, 2011”, <http://www.perfectknowledgedb.com/Tutorials/H2R/HowTo00.htm> , (Consultado Enero, 2011).

Muttiah, R.S., Engel, B.A. and Jones, D.D., “Waste disposal site selection using GIS-based simulated annealing”, Computers and Geosciences, (1996): 22-29.

Navas Hernández, Raquel E., “Acción estratégica de la dirección general de tráfico (2011-2020) para la educación vial en ámbitos no formales”, ESTT – OEP 2013, http://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCoQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.dgt.es%2FGalerias%2Fla-dgt%2Fempleo-publico%2Foposiciones%2Fdoc%2F2013%2FTEMA_52_Parte_Comun_mov_segura37e.doc&ei=6ftmU4SjLIOg8QG0x4DgCw&usg=AFQjCNEPydrEwbYhRb8NHDbrGd8WBdAL8w&bvm=bv.65788261,d.b2U , (Consultado Mayo 2, 2013).

North Michael J. and Macal Charles M., *Managing Business Complexity*, USA: Oxxoford University Press, 2007.

Noticieros televisa, “Gasta México 120 mil mdp al año por accidentes de tránsito”,
<http://www2.esmas.com/noticierostelevisa/investigaciones-especiales/...> ,
(Consultado Junio 2009).

Newman, P. and J.R. Kenworthy, *Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*, United States of America: Island Press, 2010.

Noticieros Televisa, “Gasta México 120 mil mdp al año por accidentes de tránsito”, Noticieros Televisa, <http://www2.esmas.com/noticierostelevisa/investigaciones-especiales/...> ,
(Consultado Diciembre, 2010).

Nino Boccara, *Modeling Complex Systems*, New York: Springer, 2010.

North, Michael J. and Macal, Charles M., *Managing Business Complexity*, New York: Oxford University Press, 2007.

Orfeuill, J.P., “La mobilité nécessaire, quelles réponses en France et à l'étranger?”,
(conferencia impartida en el seminario Mobilités pour l'insertion, Saint Nazaire, 6-7
octubre 2005, [http://www.ville-
enmouvement.com/plateforme_insertion/telechargement/Conference_JPO.pdf](http://www.ville-enmouvement.com/plateforme_insertion/telechargement/Conference_JPO.pdf) ,
(Consultado Mayo, 2010).

Organización Mundial de la Salud (OMS), Factores de riesgo de las colisiones, Prevención de Lesiones Causadas por el Tránsito, Manual de Capacitación, Suiza, 2009.

Organización Mundial de la Salud (OMS), *Factores de riesgo de las colisiones, Prevención de Lesiones Causadas por el Tránsito*, Manual de Capacitación, Suiza, 2009.

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

Organización Panamericana de la Salud, Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud, *Informe sobre el estado de la seguridad vial en la región de las Américas*, Washington, D.C.: OMS, 2009.

Pineda Samano, Carmen, *Geografía*, México: Editorial Santillana, 2003.

Potrykowsky M. y Taylor, Z., *Geografía del Transporte*, Barcelona: Editorial Ariel, 1984.

Presidencia de la República, “Lanzamiento de la Estrategia de Seguridad Vial 2011”, Sitio Oficial de la Presidencia de la Republica,
<http://www.presidencia.gob.mx/2011/05/lanzamiento-de-la-estrategia-nacional-de-seguridad-vial-2011-2020/> , (Consultado Marzo, 2012).

Periódico Excelsior, “Conocimiento Científico apoya la Seguridad Vial”, Agosto 6, 2013,
<http://www.eluniversal.com.mx/ciencia/2013/conocimiento-cientifico-apoya-la-seguridad-vial-79495.html> , (Consultado en Diciembre 2013).

Periódico La Jornada, “México, entre los 10 países con mayor número de muertos por accidentes de tránsito”, Marzo 25, 2013,
<http://www.jornada.unam.mx/2013/03/25/sociedad/041n1soc> , (Consultado en Junio 2013).

Periódico Publimetro, “La UNAM nos dice cómo prevenir los siniestros viales”, Septiembre 6, 2013, <http://www.publimetro.com.mx/unam/la-unam-nos-dice-como-prevenir-los-siniestros-viales/mmif!2QBMwDrsoo/#> , (Consultado en enero, 2014).

Periódico Zócalo, “Alerta SSA sobre aumento de accidentes en fiestas decembrinas”,
<http://www.zocalo.com.mx/seccion/articulo/alerta-ssa-sobre-aumento-de...> ,
Periódico Zócalo, (Consultado Diciembre, 2011).

- Política Digital, “Los cruceros más peligrosos en el DF”, Serie Política Digital, <http://www.politicadigital.com.mx/?P=leernoticiaprint&Article=21038> , (Consultada en Diciembre, 2010).
- Qureshi, Zahid H., “A Review of Accident Modelling Approaches for Complex Socio-Technical Systems”, Defence and Systems Institute, University of South Australia, Mawson Lakes Campus, (2009).
- Quintero Pérez, José Antonio, *Temas Selectos de Geomática: métodos y aplicaciones*, México: Instituto de Geografía de la UNAM, Colección Geografía para el siglo XXI, 2012.
- Qureshi, Zahid H., “A Review of Accident Modelling Approaches for Complex Socio-Technical Systems”, Defence and Systems Institute, University of South Australia, Mawson Lakes Campus, (2009).
- Rosas Osuna, Segio Rodrigo; Uribe Leitz, Pablo Tarcisio y Sarmiento Zenteno, Andrea, “Situación de la Seguridad vial en México, Reporte Estadístico 2010”, Secretariado Técnico del Consejo Nacional para la Prevención de Accidentes (2010) http://www.cenapra.salud.gob.mx/interior/Materiales_CONAPRA/Publicaciones_Especializadas/3_Situacion_de_la_seguridad_vial_en_Mxxico.pdf (Consultado en Agosto 20, 2010).
- Rivas Tovar, Luis Arturo, *Efectos de la complejidad en la gestión ambiental en México*, Centro Mario Molina, Instituto Politécnico Nacional, 200.
- Rossetti, M. D, Hill, R. R., Johansson, B., Dunkin, A. and Ingalls, R. G., Simulation Based in Agents, Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, USA, 2009.
- Rodríguez, J. P, Comtois, C. and Slack, B., *The Geography of Transport System. Transportation and Geography*, Great Britain: Routledge, 2006.

Rivas Tovar, Luis Arturo, *Efectos de la teoría de la complejidad en la gestión ambiental en México*, Centro Mario Molina, México: Instituto Politécnico Nacional, 2009.

Raczynski, Stanislaw, *Simulación por Computadora*, México: Grupo Editorial Noriega, 1993.

Raczynski, Stanislaw, *Modeling and simulation, the computer science of illusion*, United States of America: John Wiley & Sons, Ltd, 2008.

Rob, Allan, “Survey of Agent Based Modelling and Simulation Tools”, Computational Science and Engineering Department, STFC Daresbury Laboratory, Daresbury, (England: Warrington WA4 4AD, 2009): 1-21.

Roche, Jerry, “Geographic information systems-based crash data analysis and the benefits to traffic safety”, (trabajo presentado por Center for Transportation Research and Education en Iowa State University en la Transportation Scholars Conference Ames, 2010).

Road Safety Research Center, “A GIS Support System For Road Safety Analysis And Management”, University Pertanian Malaysia Press, (15 May 1998):81-93.

Repast, “Lista de consulta de apoyo a desarrolladores”,
<https://lists.sourceforge.net/lists/listinfo/repast-interest>, (Consultado Febrero, 2011).

Sarang, Poornachandra, *Java Programming*, United States: Mc Graw Hill, 2010.

Sitios de publicaciones gratuitas de texto completo,

<http://redbiblio.unne.edu.ar/Sitios%20Publicaciones%20de%20texto%20completo%20Ogratuitas.pdf> , (Consultado, Abril 2009).

Software Mendeley, <http://www.mendeley.com/> , (Consultado Abril 2009).

Sampieri Gasperín, Lucio Victorio, *Geografía*, México: Editorial Nueva Imagen, S.A. de C. V., 2005.

Segrelles Serrano, José Antonio, “Geografía Humana, fundamentos, métodos y conceptos”, Departamento de Geografía Humana, Universidad de Alicante, (Enero, 2002): 42-56, <http://www.editorial-club-universitario.es/pdf/457.pdf> , (Consultado Febrero, 2011).

Secretariado Técnico Del Consejo Nacional Para La Prevención de Accidentes, *Situación de la seguridad vial en México*, Reporte Estadístico, Publicaciones del ST del CONAPRA, México: 2010.

SSPSS Company, “Manual de consulta del software SSPS versión 16.0, 2007”, <http://min.webs.upv.es/wp-content/uploads/2011/03/Manual-SPSS16.pdf> , (Consultado Enero, 2012).

Secretaría de Salud, “Diagnostico Espacial de los Accidentes de Tránsito en el DF”, http://www.cenapra.salud.gob.mx/sites/cenapra/imgs/htm2/2009/trabajos_de_investigacion/2.Atlas_DF.pdf , (Consultado Diciembre, 2010).

Serenko, Alexander and Degroote, Brian Detlor Michael G., “Agent Toolkits: A General Overview Of The Market And an Assessment of Instructor Satisfaction With Utilizing Toolkits In The Classroom”, School of Business, McMaster University Hamilton, Working Paper N. 455, (July, 2002): 1-10.

Samuelson, Douglas and Macal, Charles, "Agent-based Simulation Comes of Age," *OR/MS Today*, Vol. 33, Number 4, (Agosto, 2006): 34-38.

Schreckenberg, M.; Schadschneider, A. and Nagel, K., “Discrete stochastic models for traffic flow”, *Physical Review* No. 51(1995): 1-24.

- Sz, Erhart, “Motorist Conquest in Budapest”, Aitia Company,
http://www.erhartsz.extra.hu/Motorist_conquest_en.pdf , (Consultado Enero, 2011).
- Tomlinson, Roger, *Pensando en el SIG*, México: Esri Press, 2008.
- Torrens, Paul M., “Process Models and Next-Generation Geographic Information Technology”, Arc News Serie (2011),
<http://www.esri.com/news/arcnews/summer09articles/process-models.html> . ,
(Consultado en Junio 20, 2011).
- Traffix, “Programa para el diseño de sistemas viales basado en agentes”, Empresa Aitia, S.A. de C.V., <http://mass.aitia.ai/> , (Consultado Abril 2010).
- Truyols Mateu, Sebastián y Sampredo Rodríguez, Angel, *Fundamentos de la seguridad vial*, (Madrid España: Delta Publicaciones, 2010).
- Torrens, Paul M., “Geosimulation”, <http://geosimulation.org/> , (Consultado Diciembre, 2010).
- Tiglaco, Noriel Christopher C., “Development of Traffic Accident Information System using Geographic Information System (GIS)”, National Center for Transportation Studies, University of the Philippines Diliman, (2007): 1-10.
- Tongeren, R. Van; Gietelink, O.; De Schutter, B. and Verhaegen, M., “Traffic modelling validation of advanced driver assistance systems”, Trabajo presentado en el IEEE Intelligent Vehicles Symposium en Istanbul, Turkey, Junio, 2007.
- Treiber, M. y Helbing, D., “Realistische Mikrosimulation von Straßenverkehr mit einem einfachen Modell”, (Trabajo presentado en el Symposium de Simulations technik ASIM 2002 el 13 de Septiembre del 2002).
- Ullman, Edward L., “American Commodity Flow”, citado por Kenneth Gilbert en *Transport Geography* 2006, cap 4.

Universia, “Presenta UNAM herramienta para disminuir accidentes de tránsito en el DF”, <http://noticias.universia.net.mx/en-portada/noticia/2010/02/23/181621/presenta-unam-herramienta-disminuir-accidentes-transito-df.html> , (Consultado Febrero, 2010).

Martín A. Díaz Viera, Martín, *Geoestadística Aplicada*, México, D.F., Cuba: Instituto de Geografía de la UNAM y el Instituto de Geofísica y Astronomía, CITMA, 2002.

Whiteleg, J., “A geography of road traffic accidents”, Department of Geography, University of Lancaster, Bailings, Lancaster, *Transactions of the Institute of British Geographers*, (1987); 2:161-176.

Wolkowitsch, Maurice, “Géographie des transports”, Coll. Cursus, (1992): 191, http://www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/noroi_0029-182x_1993_num_158_1_6488_t1_0342_0000_1# , (Consultado Mayo, 2010).

Wenglesky, S, “S. Parcours effectif à l’emploi versus accès potentiel à l’emploi: une mesure des contraintes des actifs dans la métropole parisienne”, Colloque annuel de l’ASRDLF, Trois-Rivières, Canada, http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/54/22/36/PDF/2003_dest_aguilera_structures_des_localisations_intraurbaines_et_mobilite_domicile_travail.pdf , (Consultado Mayo, 2010).

Whiteleg, J., “A Geography of Road Traffic Accidents”, Department of Geography, *Transactions of the Institute of British Geographers, New Series*, Vol. 12, No. 2, (2010) 161-176.

Wu, B. M., Birkin, M. H. and Rees, P. H., *Bringing agents into the spatial microsimulation*, London: School of Geography University of Leeds, 2001.

Wikipedia, “Comparison of agent based modeling software”,
http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_agent-based_modeling_software ,
(Consultado Mayo, 2009).

Wu, C. Thomas, *La Programación Orientada a Objetos*, México: Mc Graw Hill, 2010.

Yeladaqui Ramírez, Brenda Lucía, *¿Cómo elaborar tu proyecto de investigación?*, México:
Editorial Mando, 2009.

Yuan, May, “Dynamics GIS: Recognizing the Dynamic Nature of Reality”, ArcNews,
<http://www.esri.com/news/arcnews/spring08articles/dynamics-gis.html> , (Consultado
Octubre, 2010).

Yilmaza; Bayburaa, Tamer and Gullua, Mevlut, “Geographical information systems aided
traffic accident analysis system case study: city of Afyonkarahisar”, Elsevier, Volume
No. 40, (15 June 2007): 174-181.

Zhu, Yin, “Study on Technologies and Methods of the Traffic, Safety Intelligent Warning
Decision”, Chinese People’s Public Security University, (2006):1-4.