



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN**

**“Simulador de Tráfico Vehicular implementado con Agentes”**

**TESIS**

**Para obtener el título de:  
Maestro en Ciencias de la Computación**

**Presenta  
Iván Jiménez Romero**

**Asesor  
Dr. Manuel I. Martín Ortiz**

Noviembre 2009





---

# Resumen

---

Este trabajo tiene como objetivo fundamental, realizar una aplicación que simule el comportamiento de flujo del tráfico vehicular en un escenario generado complejo a partir de la representación de las principales características de las entidades de tráfico con el fin de mejorar las vialidades de una zona poblacional o región. Para lograr el objetivo planteado, se realiza un estudio sobre los diferentes tipos de modelos de tráfico vehicular con el fin de seleccionar el modelo que más se ajuste a las necesidades del proyecto, se distingue entre tres tipos de editores, el editor de escenario que es el encargado de generar los escenarios, el editor de diseño que se encarga de representar de manera lógica las entidades que interactúan en el escenario y el simulador que realiza la interacción entre las diversas entidades de tráfico. Los datos generados por el editor de escenario son tomados de zonas poblacionales reales, es decir, se toma el modelo estructural de las vialidades de la región y se representan en el editor de escenario, de igual manera sucede con el editor de diseño tomando como datos las características de las entidades de tráfico como semáforos, señales de alto y la frecuencia con la que los automóviles cruzan por una determinada carretera, los resultados que arroja el simulador corresponden al comportamiento principalmente de los vehículos. Finalmente, se discuten sugerencias para futuras investigaciones similares que se realicen en el futuro.

---

---

---

# Índice

## **Introducción..... 1**

## **Capítulo 1- Clasificación del Modelado y Simulación del Tráfico Vehicular ..... 3**

1.1 Simulación del Tráfico Vehicular .....	4
1.2 Categorización y Clasificación de los Modelos de Tráfico Vehicular .....	6
1.3 Clasificación de los Modelos de Tráfico Vehicular según el Nivel de Detalle.....	8
1.3.1 Modelos Submicroscópico-Microscópicos .....	10
1.3.1.1 Modelos Car-Following .....	10
1.3.1.2 Modelos Safe-Distance .....	10
1.3.1.3 Modelos Stimulus-Response Car-Following.....	11
1.3.1.4 Modelos Psycho-Spacing .....	12
1.3.1.5 Modelos Microscópicos .....	13
1.3.1.6 Modelos Sub microscópicos.....	14
1.3.1.7 Modelos basados en Autómatas Celulares .....	14
1.3.2 Modelos Submicroscópico-Microscópicos .....	14
1.3.2.1 Teoría Cinética del Gas .....	15
1.3.2.2 Modelos de Cluster.....	16
1.3.3 Modelos Macroscópicos.....	17
1.4 Categorización y Clasificación de los Modelos de Tráfico Vehicular .....	19
1.4.1 Modelo de Autómata Celular para una sola cola .....	20

## **Capítulo 2 – Agentes Inteligentes y Simulación..... 21**

2.1 Agentes Inteligentes .....	21
2.1.1 Como debe actuar un agente .....	22
2.1.2 Autonomía.....	24
2.1.3 Estructura y Programas de Agentes Inteligentes.....	25
2.1.4 Clasificación de los programas de agentes.....	25
2.1.4.1 Agentes Reactivos Simples .....	26
2.1.4.2 Agentes Reactivos basados en modelo.....	26
2.1.4.3 Agentes basados en objetivos.....	27
2.1.4.4 Agentes basados en Utilidad .....	27
2.1.4.5 Agentes que aprenden .....	28
2.1.5 Relación entre Autómatas Celulares y Agentes Inteligentes.....	29
2.2 Simulación.....	32
2.2.1 Etapas para realizar el estudio de la simulación.....	33
2.2.2 Simulación por computadora .....	34
2.2.3 Ventajas y desventajas de la simulación por computadora .....	35
2.2.4 Ventajas y desventajas de la simulación por computadora .....	36
2.2.5 Algunos usos de la simulación .....	36

---

---

**Capítulo 3 - Definición del Proyecto, Análisis y Diseño..... 39**

3.1 Descripción de los Requerimientos..... 39  
3.2 Requerimientos funcionales del sistema ..... 41  
3.3 Análisis..... 42  
3.3 Diseño ..... 53  
    3.3.1 Diagramas de Casos de Uso ..... 42  
    3.3.1 Diagramas de Secuencia..... 53  
    3.3.2 Diagramas de Clases ..... 48

**Capítulo 4 - Implementación..... 57**

4.1 Hardware y Software utilizado para la elaboración del sistema..... 57  
4.2 Editor de Escenario. .... 58  
4.3 Editor de Diseño..... 64  
    4.3.1 Archivos. .... 64  
    4.3.2 Cruce o intersección vehicular y preferencia ..... 65  
    4.3.3 Calles ..... 67  
    4.3.4 Carriles: Probabilidad de Vuelta. .... 70  
    4.3.5 Semáforos..... 76  
4.4 Simulador. .... 79  
    4.4.1 Escala de Calles y Vehículos. .... 79  
    4.4.2 Generación de Vehículos. .... 80  
    4.4.3 Movimiento de un Vehículo..... 81  
    4.4.4 Cambio de Carril y Rebase..... 83  
    4.4.5 Parada y evaluación de un cruce vehicular ..... 84  
    4.4.6 Cruce Vehicular ..... 85  
    4.4.7 Reglas de comportamiento ..... 87

**Capítulo 5 - Pruebas y Resultados ..... 89**

5.1 Pruebas de escenario. .... 89  
    5.1.1 Prueba Escenario 1..... 91  
    5.1.2 Prueba de Escenario 2. .... 92  
5.2 Pruebas de simulación..... 93  
    5.2.1 Prueba de simulación 1, Autopista de tres carriles..... 93  
    5.2.2 Prueba de simulación 2, Autopista de cinco carriles..... 96  
    5.2.3 Prueba de simulación 3, Análisis de un cruce con semáforo. .... 98

**Conclusiones..... 101**

**Trabajo a Futuro ..... 103**

**Aportaciones ..... 105**

**Bibliografía ..... 107**

---

---

# Índice de Figuras

## Capítulo 1

Figura 1.1 - Clasificación de los Modelos de Tráfico Vehicular .....	9
Figura 1.2 - Relación entre los diferentes Modelos de Tráfico Vehicular .....	18
Figura 1.3 - Representación de un autómata celular utilizado por el Modelo Kai Nagel .....	19
Figura 1.4 - Representación de un gap con valor de 3 .....	19

## Capítulo 2

Figura 2.1 Representación de un Agente y como interactúa con su Medio Ambiente.....	22
Figura 2.2 Estructura esquemática de una agente reactivo simple.....	27
Figura 2.3 Estructura interna de un agente basado en objetivos.....	28
Figura 2.4. Estructura Interna de un agente basado en Utilidad.....	29
Figura 2.5 Estructura Esquemática de un agente que aprende.....	30

## Capítulo 3

Figura 3.1 Servicios Generales del Sistema de Simulación de Tráfico Vehicular.....	42
Figura 3.2 Diagrama de Casos de Usos que muestra los servicios del Editor de Escenarios.....	43
Figura 3.3 Diagrama de Casos de Uso que muestra los Servicios del Editor de Diseño.....	44
Figura 3.4 Diagrama de Casos de Uso que muestra los Servicios de la Simulación.....	45
Figura 3.5 Diagrama de Casos de Uso de los objetivos del Agente Vehículo y el Agente Vehículo con Voluntad que son representados por los actores del diagrama.....	47
Figura 3.6 Diagrama de Clases del Editor de Escenario.....	48
Figura 3.7 Diagrama de Clases del Editor de Diseño.....	51
Figura 3.8 Diagrama de Clases de la Simulación.....	52
Figura 3.9 Diagrama de Clases Secuencia de la creación de una Calle en el Escenario. Las características principales son inicializadas de manera automática .....	54
Figura 3.10 Diagrama de Secuencia de la edición de una Calle del Escenario.....	54
Figura 3.11 Diagrama de Clases Secuencia de la creación de un Cruce Vehicular en el Escenario. Las características principales son inicializadas de manera automática sin embargo es posible editarlas en el momento de la creación así como de asociar calles al cruce.....	55
Figura 3.12 Diagrama de Clases Secuencia de la inicialización del tipo de un cruce ya sea con semáforo o sin semáforo.....	56
Figura 3.13 Diagrama de Clases Secuencia de la edición del número de vehículos que se producen por cantidad de tiempo .....	56

## Capítulo 4

Figura 4.1 Pantalla principal del editor de escenario .....	60
Figura 4.2 Pantalla de edición de propiedades del objeto calle.....	61

---

Figura 4.3 Pantalla de edición de propiedades del objeto cruce.....	62
Figura 4.4 Pantalla que realiza la unión de dos calles.....	63
Figura 4.5 Pantalla de selección de cruce o intersección vehicular con señalización de alto.....	66
Figura 4.6 Pantalla de selección de cruce o intersección vehicular con semáforo.....	66
Figura 4.7 Calle Generadora.....	68
Figura 4.8 Calle Normal.....	68
Figura 4.9 Calle Eliminadora.....	68
Figura 4.10 Calle Mixta.....	68
Figura 4.11 Propiedades de los objetos calle en el editor de diseño.....	69
Figura 4.12 Probabilidad de vuelta de un carril a llegar a un cruce o intersección vehicular.....	70
Figura 4.13 Probabilidad de vuelta para los carriles de entrada por la izquierda.....	72
Figura 4.14 Probabilidad de vuelta para los carriles de entrada por la derecha.....	73
Figura 4.15 Probabilidad de vuelta para los carriles de entrada por la parte superior.....	74
Figura 4.16 Probabilidad de vuelta para los carriles de entrada por la parte inferior.....	75
Figura 4.17 Fases y diagrama de fases de una intersección con semáforo.....	77
Figura 4.18 Pantalla principal de la inicialización de Semáforos.....	78
Figura 4.19 Ancho de un carril.....	79
Figura 4.20 Largo y ancho de los vehículos.....	80
Figura 4.21 Porcentaje de generación de vehículos.....	81
Figura 4.22 Distancia y velocidades entre dos vehículos.....	82
Figura 4.23 Calle de dos carriles.....	83
Figura 4.24 Rebase en una calle de dos carriles.....	84
Figura 4.25 Distancia de un vehículo al cruce vehicular.....	85
Figura 4.26 Semáforo en rojo.....	85
Figura 4.27 Semáforo en verde.....	86

## **Capítulo 5**

Figura 5.1. Zona poblacional a representar.....	90
Figura 5.2. Representación en el editor de escenarios de un fragmento de la zona poblacional a representar.....	91
Figura 5.3. Representación en el editor de escenarios de un fragmento de la zona poblacional a representar.....	92
Figura 5.4. Autopista de tres carriles con tres tipos de vehículo.....	93
Figura 5.5. Gráfica de resultados de la prueba 1.....	94
Figura 5.6. Gráfica de resultados de la prueba 1.....	94
Figura 5.7. Gráfica de resultados de la prueba 1.....	94
Figura 5.8. Comparación entre los resultados de la prueba 1, con máxima generación y diferentes tipos de vehículo.....	95
Figura 5.9. Autopista de cinco carriles con dos tipos de vehículo.....	96
Figura 5.10 Gráfica de resultados de la prueba 2.....	97
Figura 5.11 Gráfica de resultados de la prueba 2.....	97
Figura 5.11 Gráfica de resultados de la prueba 2.....	97
Figura 5.12 Gráfica de resultados de la prueba 2.....	97
Figura 5.13. Modelo del cruce vehicular a simular realizado en el editor de escenario.....	98

---

## Índice de Tablas

Tabla 3.1	Objetivos y Metas del agente Vehículo.....	46
Tabla 3.2	Objetivos y Metas del agente Vehículo con Voluntad.....	47
Tabla 4.1	Muestra las diferentes acciones que realiza cada botón del editor de escenario.....	61
Tabla 4.2	Muestra las diferentes acciones que realiza la ventana de edición de calles.....	62
Tabla 4.3	Muestra las diferentes acciones que realiza la ventana de edición de cruces.....	63
Tabla 4.4	Muestra las diferentes acciones que realiza la ventana de unión.....	64
Tabla 4.5	Muestra las diferentes acciones que realiza la ventana de selección de tipo de cruces y cruce con señalización.....	67
Tabla 4.6	Muestra las diferentes acciones que realiza la ventana de propiedades de una calle.....	69
Tabla 4.7	Muestra las diferentes acciones que realiza la ventana de propiedades del semáforo.....	78
Tabla 4.8	Representación del tamaño de los tres diferentes tipos de vehículos del simulador.....	80
Tabla 5.1.	Listado de calles a tomar en cuenta para realizar la representación de escenario con latitud y longitud.....	90
Tabla 5.2.	Distancia en metros de la longitud de las calles a representar.....	90
Tabla 5.3.	Tabla de resultados de la prueba 1.....	94
Tabla 5.4.	Tabla de resultados de la prueba 2.....	96
Tabla 5.5.	Lista de características propias del cruce a simular, se considera la longitud de la calle, el porcentaje de generación de vehículos y los tiempos de los semáforos.....	98

---

---

---

# Introducción

---

El transporte es esencial para el desarrollo y el crecimiento de una nación. Tanto en el sector público como en el privado, constantemente se están añadiendo elementos a los sistemas mundiales de carreteras y transporte en general y se están aplicando nuevas técnicas para operar y mantener estos sistemas de forma segura y económica. Actualmente existen muchos modelos para planificar, diseñar, construir, operar y conservar el sistema de transporte de una nación.

Durante los pasados 50 años se han desarrollado un amplio rango de modelos que intentan describir las principales características del flujo de tráfico vehicular. Teorías basadas en modelos matemáticos, dinámica de fluidos, teoría de colas, teoría cinética del gas, teoría Car-Following solo describen algún aspecto del flujo de tráfico vehicular, sin embargo, no cubren la mayoría de los aspectos que influyen en el comportamiento de las entidades de tráfico.

El proyecto consiste en la realización de la propuesta de un modelo que simule el comportamiento del tráfico vehicular realizando una aplicación que consiste en un Simulador de Tráfico Vehicular tomando como base el modelo que propuso Kai Nagel y que está basado en la teoría de los Autómatas Celulares, incrementando las reglas y condiciones que ya propone con la finalidad de mejorar el modelo general existente.

De una manera más objetiva, este trabajo pretende desarrollar una aplicación que simule el comportamiento del tráfico vehicular en un escenario generado así como la voluntad y las metas de las entidades de tráfico a partir del modelo de Kai Nagel agregando situaciones mediante reglas de comportamiento que no considera el modelo actual, como la definición de tres tipos de vehículos diferentes que circulan en una calle de varios carriles, etc., elaborando escenarios complejos con el fin de que las entidades de tráfico interactúen de acuerdo a las reglas de comportamiento.

---

## **Descripción del Documento**

Este documento está dividido en seis capítulos, a continuación se describe brevemente el contenido de cada uno de ellos:

Capítulo 1: Se describen los diferentes modelos que describen el comportamiento de tráfico vehicular que se han presentado a lo largo de la historia con el fin de entender las características principales de cada uno de ellos.

Capítulo 2: Se describe la teoría general que se utilizará para realizar la aplicación que simule el comportamiento de tráfico vehicular.

Capítulo 3: Se realiza la especificación de los requerimientos del sistema, así como el análisis de los objetivos del trabajo.

Capítulo 4: Se realiza la especificación de la implementación de cada uno de los editores y el simulador, se detallan los elementos principales y se especifican su funcionalidad.

Capítulo 5: Se presentan las distintas pruebas y resultados del editor de escenarios y de la simulación tomando como base datos de campo para cada uno de ellos.

## *Capítulo 1*

# **Clasificación del Modelado y Simulación del Tráfico Vehicular**

---

Desde que existe la raza humana el transporte ha constituido una de las partes primordiales que ha consumido considerable parte de su tiempo y de sus recursos debido a la necesidad primordial de buscar comida o trabajo, o simplemente realizar un viaje de negocios o comerciales, buscando una mejor calidad de vida. El movimiento de personas y de bienes es lo que se entiende por transporte y se lleva a cabo para alcanzar objetivos o tareas que son básicos y requieren el desplazamiento de una localidad a otra [1].

Hoy en día uno de los principales problemas y preocupaciones de las ciudades industrializadas es el tráfico vehicular, esto gracias al gran número de personas que emigran a las grandes ciudades en busca de mejores oportunidades de desarrollo, y a que las grandes industrias buscan mover sus productos a lo largo de la ciudad para ofrecer mejores oportunidades. Además, una ciudad con una buena infraestructura carretera y de transporte compite con otras ciudades por el liderato económico de la región logrando así mayor crecimiento.

La calidad del transporte en una región impacta de manera significativa sobre su economía y sobre el aprovechamiento de sus recursos naturales, las sociedades de mayor desarrollo destacan por sus servicios de transporte, sin embargo, los servicios de transporte no garantizan el desarrollo económico de dicha región pero si contribuye a su fracaso, si una nación desea desarrollarse y crecer debe contar una buena red de transporte interna así como las conexiones necesarias para comunicarse con el resto del mundo.

La razón principal por lo que es tan importante el transporte es porque las personas tienen la necesidad de trasladarse o de transportar sus bienes de un lugar a otro. Así mismo es una condición necesaria para la interacción humana y la supervivencia económica.

Dependiendo de las instalaciones de transporte se determina el crecimiento y desarrollo de una región o de una nación, ya que para la industria y el comercio se reducen los costos de la materia prima o de los bienes manufacturados aumentando de esta manera la competencia entre las regiones, dando como resultado menores costos y mayor oferta para el consumidor.

El mejoramiento del sistema de transporte implica realizar inversión grande en cuanto a energía, materiales y terreno. El espacio utilizado por las vías carreteras en una ciudad grande puede llegar a ocupar más de la mitad del espacio de la región. Por lo mismo, la sociedad ha aceptado ciertos riesgos y algunas modificaciones del medio ambiente con tal de obtener los beneficios de los sistemas de transporte. Los beneficios sociales que provee el transporte son los de obtener servicios en beneficio de su calidad de vida, como servicios médicos o comerciales, también les permite a las personas que viven en lugares alejados el disfrutar de los mismos servicios que las personas que viven en las grandes ciudades, sin que esto implique un incremento en los costos de transportación. Otro beneficio para las personas es obtener mayores oportunidades de conseguir empleo debido a la diversidad de industria que se encuentra en las grandes ciudades

Una industria derivada de las necesidades de las personas es la del transporte, para trasladarse de una ciudad a otra el medio de transporte más utilizado por las personas es el aéreo, sin embargo, dentro de las ciudades el medio de transporte más utilizado es el automóvil, seguido por autobuses y ferrocarriles. El movimiento en masa dentro de la ciudad es principalmente dominado por las compañías de auto transporte. Las habilidades profesionales necesarias para planificar, construir y operar este extenso sistema de transporte requieren diferentes disciplinas, entre estas están: ingeniería, planificación, derecho y ciencias económicas, administrativas y sociales.

El transporte es un elemento esencial para cualquier nación, así como para el desarrollo económico de su sociedad, sin un buen sistema de transporte ninguna región podría alcanzar su máximo aprovechamiento de los recursos naturales, ni la población la más alta productividad.

## **1.1 Simulación del Tráfico Vehicular**

La investigación para realizar un modelo sobre el problema del tráfico vehicular comenzó en los años cuarenta cuando Lighthill y Whitham propusieron un modelo matemático que estaba basado en la analogía de la descripción del movimiento de las partículas, desde entonces se han hecho múltiples propuestas basados en distintos modelos matemáticos que intentan representar las distintas características que conforman al

fenómeno del tráfico vehicular, y que han sido causa de debate para diferentes ingenieros del Tráfico Vehicular.

La simulación del tráfico vehicular ha sido ampliamente usada en los campos de la investigación, planeación, toma de decisiones, demostración y desarrollo de sistemas de tráfico vehicular. Con el desarrollo de la tecnología computacional, la simulación por computadora digital y visual es ahora la principal forma en que se realiza la simulación de tráfico vehicular moderno. En general, la simulación se define como la representación dinámica de alguna parte del mundo real lograda mediante la construcción de un modelo de computadora y moviéndolo a través del tiempo [2]. Además, la simulación es una herramienta eficiente y efectiva para evaluar de manera inteligente el Sistema de Transporte [3].

Los sistemas de tráfico en transporte terrestre pueden ser representados con un gran número de características que son muy difíciles de analizar, controlar y optimizar en los sistemas de tráfico. Los sistemas de tráfico normalmente cubren áreas físicas amplias y una gran cantidad de participantes activos. No obstante, las metas y objetivos de los participantes no son necesariamente coincidentes con los de los otros o con los del operador del sistema (grado óptimo del sistema contra grado óptimo del usuario) y muchas entradas al sistema incluyendo los controles del operador y de los participantes (tales como las condiciones climatológicas, el número de usuarios, etc.).

Es obvio que los sistemas de transporte son sistemas hombre-máquina, lo que significa que las actividades en el sistema incluyen la interacción humana, por ejemplo la interacción entre los conductores y operadores, e interacciones hombre-máquina-interacción, conductores interactuando con otros vehículos, información del tráfico y los sistemas de control, las leyes de interacción no son precisas en la naturaleza, la observación y las reacciones de los conductores son gobernadas por la percepción humana en vez de tecnología de sensores y sistemas de monitoreo.

El avance en la tecnología hizo posible desarrollar estrategias sofisticadas del manejo del tránsito, pero se ha mostrado que estrategias avanzadas no siempre dan como resultado el mejoramiento del rendimiento. Cuando se diseña para un sistema de manejo de tráfico particular, es posible elegir entre muchas arquitecturas y alternativas. La evaluación es entonces, un elemento importante para el diseño del proceso.

En años recientes la simulación ha llegado a ser una herramienta usada comúnmente para entender las características de los sistemas de tráfico y para seleccionar una política de diseño apropiada [3]. Las razones para aplicar la simulación computacional al campo del tráfico vehicular son las mismas por las que se utiliza en otros campos, lo cual incluye la

dificultad de la resolución analítica para una cuestión, la necesidad de probar, la evaluación y demostración del curso que toma una acción propuesta antes de su implementación.

El desarrollo de los simuladores de tráfico vehicular desde los años 50's y 60's ha sido tremendo, por supuesto, han ido de la mano con el desarrollo de la computación y en general de la tecnología. Por otro lado, la investigación de la ingeniería del tráfico y transportación ha avanzado desde los años 40's. La simulación es una herramienta cotidiana para los usuarios e investigadores de todos los campos de esta profesión.

## 1.2 Categorización y Clasificación de los Modelos de Tráfico Vehicular

La investigación de los modelos tráfico vehicular ha dado como resultado la construcción de modelos de alto alcance que describen diferentes aspectos de las operaciones de tráfico vehicular, considerando el comportamiento de los conductores en espacio tiempo bajo la influencia de vehículos que están a su alrededor, el comportamiento de los conductores que pueden ser distinguidos explícitamente en el espacio tiempo, o desde el punto de vista del flujo en una colección de vehículos.

Los modelos de Tráfico Vehicular se han categorizado de acuerdo a diversos criterios (nivel de detalle, operatividad, representación del proceso). Las operaciones en los caminos pueden ser mejorados por la investigación y experimentación de campo en el flujo vehicular en la vida real. Sin embargo, además de la dificultad científica de reproducir dichos experimentos, los costos y la seguridad juegan también un rol muy importante. Debido a la complejidad de los sistemas de tráfico vehicular, los modelos matemáticos pueden no presentar los resultados que se esperan. Por tanto, los modelos de tráfico vehicular diseñados para caracterizar el comportamiento de los sistemas complejos de tráfico vehicular se han vuelto herramientas esenciales para el análisis y la experimentación [4].

Dependiendo del tipo de modelo, las áreas de aplicación de esos modelos de flujo vehicular son muy amplias,

- Evaluación de tratamientos alternativos en el manejo (dinámica) del tráfico.
- Diseño y pruebas de los nuevos servicios de transporte.
- Operatividad de los modelos de flujo que actúan como un sub-módulo en otras herramientas.

- Entrenamiento de los administradores del tráfico.

La descripción del fenómeno de tráfico observado no es evidente. Modelos matemáticos encaminados a describir este comportamiento utilizando ecuaciones matemáticas incluyen los siguientes enfoques:

1. Enfoques puramente deductivos donde el conocimiento exacto de las leyes de la física es aplicado.
2. Enfoques puramente inductivos donde los datos de entrada/salida disponibles del sistema real son usados para dar forma a estructuras matemáticas genéricas.
3. Enfoques intermedios, donde se desarrolla la primera modelo-estructura matemática básica en primer lugar, después la estructura específica le da forma a los datos reales.

Papageorgiou (1998) convincentemente argumenta que es muy poco probable que la teoría del tráfico vehicular llegue a la precisión descriptiva alcanzada en otros ámbitos de la ciencia. La única ley de la física en la que se ha logrado exactitud en la teoría del tráfico vehicular es la ecuación de la conservación de los vehículos.

Se realiza una clasificación de los modelos de tráfico vehicular de acuerdo a lo siguiente:

- Escala de las variables independientes (continua, discreta, semi-discreta).
- Nivel de Detalle (submicroscópico, microscópico, mesoscópico, macroscópico).
- Representación del proceso (determinístico, estocástico).
- Operatividad (analítica, simulación).
- Escala de Aplicación (redes, enlaces, intersecciones).

**Nivel de detalle:** Los modelos de tráfico pueden ser clasificados de acuerdo al nivel de detalle con el cual son representados los sistemas de tráfico. Esta categoría puede ser operativa considerando la distinción de las entidades de tráfico y la descripción de las entidades en los respectivos modelos de flujo (sub microscópicos, microscópicos, mesoscópicos, macroscópicos).

**Escala de las variables independientes:** Dado que casi todos los modelos describen sistemas dinámicos, una clasificación natural es la escala de tiempo. Se distinguen dos escalas de tiempo, llamadas continuas y discretas. Un modelo continuo describe como el estado del sistema de tráfico cambia continuamente a lo largo del tiempo en respuesta de un estímulo constante. Los modelos discretos asumen que los cambios en el estado ocurren discontinuamente a lo largo del tiempo en el instante discreto del tiempo. Además del

tiempo, se pueden describir otras variables independientes continuas o discretas (posición, velocidad, velocidad deseada).

**Representación del Proceso:** En este caso se distinguen modelos estocásticos y determinísticos. Los modelos que se pueden formar no tienen variables aleatorias implicando que todos los actores del modelo son definidos por una relación exacta. Los modelos estocásticos incorporan procesos que incluyen variables aleatorias. Por ejemplo, la teoría car-following puede ser formulada en cualquier modelo estocástico ó determinístico definiendo la reacción del conductor como una constante o como una variable aleatoria respectivamente.

**Operatividad:** Con respecto al criterio de operatividad, cualquier modelo puede ser operativo como una solución analítica de un conjunto de ecuaciones, o como una simulación del modelo.

**Escala de la Aplicación:** La escala de la aplicación indica el área del modelo de la aplicación. Por ejemplo, el modelo puede describir la dinámica de sus entidades para un único tramo de la carretera

### 1.3 Clasificación de los Modelos de Tráfico Vehicular según el Nivel de Detalle

Los modelos de tráfico vehicular pueden ser clasificados de diferentes maneras de acuerdo a algunos criterios, sin embargo la manera más común de realizar esta clasificación es por el nivel de detalle con el cual representan el sistema de tráfico. Se hace distinción de dos características principales, las entidades que representan al tráfico vehicular y el nivel de descripción de los mismos. Se propone la siguiente clasificación:

1. Modelos de simulación Sub microscópica. Alto nivel de detalle en la descripción del funcionamiento de las unidades vehiculares y sus alrededores.
2. Modelos de simulación Microscópica. Alto nivel de detalle en la descripción de las entidades individuales.
3. Modelos de simulación Mesoscópica. Nivel medio de detalle.
4. Modelos de simulación Macroscópica. Nivel bajo de detalle.

Nivel de Detalle	Nombre del Modelo / REF	Di				SC	RE	OP	AR
		v	v0	y	o				
Modelo (sub) Microscópico	MIXIC (Van Arem and Hogema (1995))	+		+	+	d	s	s	ml
	SIMONE (Minderhoud (1999))	+	+	+	+	d	s	s	mld
	PELOPS (Ludmann (1998))	+		+	+	d	s	s	ml
	Safe-Distance models (May (1990))	+				c	d	a	sl
	Stimulus-response models (Leutzbach (1988), May (1990))	+				c	d	a	sl
	Psycho-spacing models (Wiedemann (1974))	+	+	+		c	s	s	ml
	FOSIM (Vermijs <i>et al.</i> (1995))	+	+	+	+	d	s	s	mld
	CA-models (Nagel (1996,1998), Wu and Brilon (1999), Esser <i>et al.</i> (1999))	+	+			d	s	s	n u
	Particle pedestrian model (Hoogendoorn and Bovy (2000a))	+	+	+	+	d	s	s	o
	INTEGRATION (Van Aerde (1994)).	+				d	d	s	n
Modelo Mesoscópico	Headway distr. models (Hoogendoorn and Bovy (1998a))			+	+	c	s	a	c
	Reduced gas-kinetic model (Prigogine and Herman (1971))	+				c	d	a	al
	Improved gas-kinetic model (Paveri-Fontana (1975))	+	+			c	d	a	al
	Multilane gas-kinetic model (Helbing (1997b))	+	+		+	c	d	a	mld
	Multiclass gas-kinetic model (Hoogendoorn and Bovy (2000b))	+	+	+	c	d	a	al	
	Multiclass multilane model (Hoogendoorn (1999))	+	+	+	c	d	a	al	mld
	Cluster models (Botma (1978))	+	+			c	d	a	al
Modelo Macroscópico	LWR model (Lighthill and Whitham (1955))	+				c	d	a	al
	Payne-type models ((Payne (1971,1979))	+				c	d	a	al
	Helbing-type models (Helbing (1996,1997))	+			+	c	d	a	al
	Cell-Transmission Model (Daganzo (1994a,b, 1999))	+				d	d	s	n
	METANET (Kotsialos <i>et al.</i> (1998,1999))	+				d	d	s	n
	semi-discrete model (Smulders (1990))					sd	s	a	ald
	FREFLO (Payne (1979))	+				d	d	s	n
MASTER (Treiber <i>et al.</i> (1999))	+				d	d	a	ml	

DI – Distancia (Espacio/Tiempo): velocidad *v*, velocidad deseada *v0*, posición lateral *y* (carriles) y *o*tro

SC – Escala (continuo, discreto y semidiscreto)

RE – Representación del Proceso (determinístico y estocástico)

OP – Operatividad (analítico y simulación)

AR – Área de Aplicación (sección cruzada, ext solo carril, ext multicarril, ext carril agregado, discontinuidades, red de autopistas n, red urbana y otro)

Figura 1.1 Clasificación de los Modelos de Tráfico Vehicular

### 1.3.1 Modelos Submicroscópico-Microscópicos

El modelo de simulación microscópica describe tanto el comportamiento en espacio-tiempo de las entidades del sistema (por ejemplo vehículos y conductores) así como su interacción a un alto nivel de detalle (individualmente) [5]. De la misma manera, el modelo de simulación sub microscópico describe el comportamiento de las entidades a un alto nivel de detalle, sin embargo, también se describen tanto las acciones que describe el conductor y sus reacciones al medio ambiente, así como la respuesta que tienen a su vez las partes del automóvil al mismo, por ejemplo, como se desempeñarían las llantas tanto en un camino con agua como en un camino seco.

#### 1.3.1.1 Modelos Car-Following

Durante los años 60's, los esfuerzos de la investigación se centraron en los llamados modelos *follow the leader*. Estos modelos se basan en el mecanismo que describe el proceso de un vehículo siguiendo a otro. **Cumming (1963)** categorizó varias sub tareas que en conjunto se realizan la acción de manejar y que el conductor realiza de forma paralela como un procesador de información [6].

Una de éstas tareas es la de seguir a un automóvil a lo largo de un camino. Esta sub tarea es de un particular interés ya que se ha logrado describir de manera exitosa y sencilla un modelo matemático que la describa, debido a que seguir a un automóvil es relativamente simple comparado con las demás sub tareas que se requieren para controlar el automóvil.

Los principales modelos propuestos que emplean como base a el modelo "Car-Following" son el modelo Psycho-Spacing de Wiedemann (1974), el modelo Stimulus-Response de Leutzbach (1988) y el modelo Safe - Distance" propuesto por May (1990).

#### 1.3.1.2 Modelos Safe-Distance

El modelo "safe - distance" propuesto por **May (1990)** asume que el conductor considera la distancia de frenado lo suficientemente grande para hacer alto total sin causar una colisión con el vehículo predecesor si éste realiza un alto total inmediato (modelo distancia de tiempo de reacción).

Este modelo describe la dinámica de un solo vehículo en relación a su predecesor. A este respecto, un modelo muy simple es la regla de **Pipe (1953)**: “Una buena regla para seguir a otro vehículo a una distancia segura es mantener una distancia de por lo menos la longitud de un automóvil entre tú y el vehículo que va adelante por cada diez millas una hora (16.1 km/hrs) de velocidad cuando estés viajando”. Usando esta regla de manejo, podemos determinar la distancia en bruto para avanzar  $D_n$  del vehículo  $n$  manejando a una velocidad  $v$  con respecto al vehículo  $n - 1$ .

$$D(n)_v = L_n(1 + v/16.1)$$

**Leutzbach (1988)** discute un modelo más refinado describiendo el espacio que limita a los vehículos, en el tráfico vehicular. Señala que los conductores que siguen a otro tratan de ajustar su comportamiento a los conductores que les preceden.

En general, la respuesta es la aceleración o desaceleración del vehículo al que está siguiendo, con un retraso  $T$ . El estímulo está definido por la diferencia entre las velocidades del coche líder y el coche que lo sigue. En general, el tiempo de reacción  $T$  está compuesto de:

- Tiempo de percepción – Tiempo necesario para el conductor para reconocer que hay un obstáculo.
- Tiempo de Decisión – Tiempo necesario para tomar la decisión de acelerar.
- Tiempo de Frenado – Tiempo necesario para aplicar los frenos.

La distancia de frenado es definida por la distancia necesaria de un vehículo para realizar alto total. Este último entre otras cosas es una función de el peso de la restricción de la superficie del terreno  $\mu$  y de la aceleración producida por gravedad  $g$ . El modelo de *safety distance* asume que el conductor considera que las distancias de frenado son suficientemente grandes para permitirle frenar hasta el alto total sin causar una colisión real con el vehículo predecesor si éste frena de manera repentina.

### 1.3.1.3 Modelos Stimulus-Response Car-Following

Los conductores que siguen tratan de conformar el comportamiento del conductor que les precede. Este proceso *car-following* está basado en el principio:

Respuesta = Sensibilidad x Estímulo

En general, la respuesta es el frenado o la aceleración del vehículo que sigue, retrasado por un tiempo de reacción total  $T$ . Considérese al vehículo  $n$  siguiendo al vehículo  $n-1$ . Sea  $x_n(t)$  que denota la posición del vehículo  $n$  al instante  $t$ . Un conocido modelo propuesto por **Chandler (1958)** especifica que

$$a_n(t + T) = \gamma(v_{n-1}(t) - v_n(t))$$

Donde  $v_n(t)$  y  $a_n(t)$  respectivamente denotan la velocidad y la aceleración del vehículo  $n$  al tiempo  $t$ , y  $\gamma$  denota la sensibilidad del conductor. Así, el estímulo es definido por la diferencia de velocidades entre el líder y el que sigue. La expresión siguiente ha sido propuesta para representar la sensibilidad del conductor **Gazis (1961)**:

$$\gamma = c \cdot (v_n(t + T))^m / (x_{n-1}(t) - x_n(t))^l$$

Así, el vehículo que sigue ajusta su velocidad  $v_n(t)$  proporcionalmente a la diferencia de velocidad y distancia con el retraso  $T$ . En qué medida ocurre esto depende de los valores de  $c$ ,  $l$  y  $m$ .

En el modelo de Gazis, el comportamiento de los conductores libres de seguir a otro vehículo es modelado de manera muy entendible: cuando la distancia del camino es muy grande, los conductores tienden a reaccionar a velocidades diferentes. Además, los conductores más lentos son rebasados por vehículos de velocidad mayor. Cuando se distingue entre tipos de vehículos, este modelo asume la implicación de que el vehículo más lento que se encuentra siguiendo a otro, aumentará su velocidad hasta que iguale la velocidad de vehículo que va siguiendo, y se asume que el tráfico es homogéneo. Por lo tanto, todos los parámetros del modelo son iguales para todas las clases de usuarios y para todos los carriles del camino.

#### 1.3.1.4 Modelos Psycho-Spacing

**Wiedemann (1974)** propuso el modelo Psycho-Spacing que se basa en los modelos “Follow the Leader” estos tipos de modelos se basan en un supuesto mecanicismo en el cual un automóvil sigue a otro. El modelo consiste en que para cada ecuación que corresponde a un automóvil supone que el siguiente conductor reacciona, por un lado, a

pequeños cambios de velocidad aún cuando la distancia sea muy grande. Y por el otro lado, el modelo asume que la respuesta es igual a cero en el momento que la diferencia entre las velocidades desaparece, sin importar que las distancias entre los vehículos sean muy grandes o muy pequeñas. Las reglas básicas de este modelo son las siguientes:

1. A distancias más grandes, el conductor siguiente no es influenciado por la diferencia entre las velocidades.
2. A distancias más cortas, algunas combinaciones de velocidades relativas y distancias no producen una respuesta en el conductor siguiente porque el movimiento relativo es demasiado pequeño.

Wiedemann consideró umbrales de percepción limitados e ilimitados del conductor. Por otra parte, se han incorporado cambios de carril y rebases a su modelo.

### **1.3.1.5 Modelos Microscópicos**

La habilidad de las computadoras por realizar cálculos de manera rápida a lo largo del tiempo, ha resultado en un interesante incremento de complejos modelos micro-simulación. El comportamiento de los conductores es generalmente descrito por un gran conjunto de reglas if-then, (sistemas producción-regla). Desde el comportamiento del conductor y las características del vehículo, posición, velocidad y aceleración para cada automóvil se calcula en cada instante de tiempo.

Un gran número de modelos de simulación microscópica se han desarrollado. Para ilustrar, el proyecto SMART-EST **Algers (1997)** identificó 58 modelos de simulación microscópica de los cuales 32 fueron analizados. Algunos de ellos son verdaderas simulaciones microscópicas, en el sentido que esos modelos distinguen el comportamiento del automóvil que sigue y el comportamiento del cambio de carril de cada vehículo individual en el tránsito vehicular.

Usualmente, el comportamiento *car-following* está basado en el paradigma del modelo *psycho-spacing*. Para describir el comportamiento de cambio de carril, los modelos microscópicos generalmente distinguen entre la decisión de un cambio de carril, la elección de un carril, y la aceptación de la distancia disponible en el carril seleccionado.

### 1.3.1.6 Modelos Sub microscópicos

Además, para describir el comportamiento espacio-tiempo de las entidades individuales en el sistema de tráfico vehicular, los modelos de simulación submicroscópica describen la función de partes específicas de los vehículos y de los conductores. Por ejemplo, un modelo de simulación submicroscópica describe la forma en que el conductor aplica los frenos, considerando entre otras cosas el tiempo de reacción del conductor, el tiempo necesario para aplicar los frenos, etc. Esos modelos de simulación submicroscópica son muy adecuados para modelar el impacto del controlador del sistema de apoyo del vehículo y del comportamiento del conductor.

### 1.3.1.7 Modelos basados en Autómatas Celulares

El modelo **Naigel (1999)** está basado en la teoría de los autómatas celulares, en este modelo el sistema del flujo está conformado por una red de células de igual tamaño que representa el momento en que en una carretera hay un vehículo o no, el modelo CA describe de manera discreta el movimiento de los vehículos de una célula a otra, el modelo describe como un vehículo con velocidad uno, se mueve a la siguiente célula en un instante de tiempo. Los espacios vacíos que tiene delante de sí el vehículo determina el espacio vacío en la carretera, a esta variable se le denomina GAP. La velocidad del vehículo puede variar de 0 a  $V_{max}$  dependiendo del valor de GAP ya que si es muy grande la velocidad del vehículo tiende a  $V_{max}$  y si es muy pequeño tiende a 0.

Este proceso puede ser dividido en tres partes:

- Aceleración: Cada vehículo con velocidad menor a  $V_{max}$ , eventualmente acelera
- Desaceleración: Si la velocidad es menor que la distancia GAP entre dos vehículos entonces el vehículo desacelera
- Frenado: Con la probabilidad  $p_{max}$ , la velocidad del vehículo disminuye espontáneamente.

## 1.3.2 Modelos Submicroscópico-Microscópicos

El modelo Mesoscópico no distingue entre ningún vehículo de manera individual, pero especifica el comportamiento de individuos, por ejemplo en términos probabilísticos. Con este fin, el tráfico es representado en grupos pequeños de entidades de tráfico, de los

cuales las actividades e interacciones son descritas en un bajo nivel de detalle [5]. Algunos de los modelos mesoscópicos son derivados haciendo referencia a la analogía de la teoría de la teoría cinética del gas y por lo mismo llamados modelos de la teoría cinética del gas que describen la dinámica de la distribución de la velocidad.

Los modelos de tráfico vehicular de la teoría cinética del gas son modelos mesoscópicos que describen la dinámica de la densidad en espacio-tiempo. Este tipo de modelo permite integrar un nivel agregado (los vehículos no son descritos de manera individual) distribuciones del comportamiento individual de las reglas (como la distribución de velocidad) [8]. Varios ejemplos del uso de este modelo son los siguientes:

### 1.3.2.1 Teoría Cinética del Gas

**Prigogine and Herman (1971).** Los modelos de la teoría cinética del gas describen la dinámica del PSD (Phase-Space Density). El concepto del PSD refleja la función de distribución de un solo vehículo. Prigogine and Herman introdujeron la función de distribución para dos vehículos. Y asumieron que los cambios en la dinámica del PSD son causados por los siguientes procesos [5, 8]:

- Convección – los vehículos con una velocidad  $v$  dentro o fuera del flujo de un segmento del camino causan cambios en el PSD [5, 8].
- Aceleración hacia la velocidad deseada – Los vehículos que no lleven una velocidad deseada acelerarán si es posible [5, 8].
- Desaceleración provocada por la interacción con otros conductores – Un vehículo que interactúa con otro vehículo con velocidad menor deberá reducir su velocidad mientras no lo pueda rebasar [5, 8].

**Paveri – Fontana (1975)** consideraron un caso hipotético donde un vehículo en flujo libre es capturado por una cola de movimiento lento. Considerando dos casos extremos:

1. El vehículo entrante pasa a través de la cola completa como si ésta fuera un solo vehículo [5].
2. El vehículo pasa cada vehículo a la vez en la cola de manera independiente [5].

A este modelo se le llamó Modelo de la teoría cinética del gas mejorado.

**Helbing (1997)** presentó un modelo de la teoría cinética de gas para operaciones de flujo de tráfico multilínea (multiline gas-kinetic model), muy parecido al modelo de Prigogine and Herman (1971), con la diferencia que considera explícitamente el cambio de carril. El modelo multilínea de Helbing considera tres términos adicionales al de Prigogine and Herman:

- El término de difusión de velocidad – Toma en cuenta las fluctuaciones individuales de la velocidad debido a un manejo imperfecto [5, 9, 10].
- El término de cambio de carril – Modela los cambios en la dinámica del ML-PSD debido a los cambios de carril de un vehículo [5, 9, 10].
- El ritmo de los vehículos con el que entran y salen del camino [5, 9, 10].

Recientemente **Hoogendoorn (1999)** desarrolló un modelo de flujo de tráfico mesoscópico que describe los sistemas genéricos de flujo de tráfico. El modelo describe el g-PSD (generic phase-space density)  $p_u(x, v, w, t)$  donde  $x$  y  $v$  son vectores de  $n$ -dimensiones respectivamente que denotan la velocidad y la ubicación de las entidades del tráfico. Los vectores  $w$  y  $a$  denotan respectivamente los atributos continuos y discretos de las entidades de tráfico [11], por ejemplo la velocidad deseada, el carril, el destino, etc. Las ecuaciones de la dinámica del modelo describen al modelo g-PSD y sus principales características: convecciones, aceleraciones, pequeñas adaptaciones y atributos continuos. Cabe señalar que el modelo g-PSD unifica los distintos modelos de la teoría cinética de gas ya que son casos especiales del modelo genérico de Hoogendoorn.

Representando el tráfico como una colección de “pelotones”, tan amplios como en gran medida entidades con movimiento independiente, muchos de los inconvenientes de los modelos de la teoría cinética de gas fueron modificados. **Hoogendoorn (1999)** argumenta que los modelos de flujo de la teoría cinética de gas sobreestiman el número de vehículos que interactúan debido a la hipótesis del caos vehicular. Segundo, en la vida real, en el flujo vehicular el comportamiento de la aceleración de los pelotones de vehículos es completamente determinado por el líder del pelotón [5, 11].

### 1.3.2.2 Modelos de Cluster

Los modelos de la teoría cinética de gas no son los únicos que toman como base al modelo mesoscópico, también lo hacen los modelos de clúster. Los Modelos Cluster se caracterizan por tener como papel central a un “clúster” de vehículos. Siendo un clúster un grupo de vehículos que comparten una propiedad específica. Se consideran diferentes

aspectos de clúster como su tamaño (número de vehículos en el clúster) y la velocidad del clúster que es de gran importancia. Una de las principales características es que el tamaño del clúster es dinámico, es decir que puede crecer o disminuir su tamaño en cualquier momento. Las condiciones dentro del clúster no son consideradas explícitamente ya que el clúster es homogéneo según **Botma (1978)**.

### 1.3.3 Modelos Macroscópicos

Los modelos de flujo Macroscópico describen el tráfico a un alto nivel de agregación sin distinguir las partes que le constituyen [1]. Por ejemplo, el flujo del tráfico es representado de una forma agregada utilizando características como ritmo del flujo, densidad y velocidad, las maniobras de los vehículos como cambios de carril, no son representados. Los modelos macroscópicos pueden ser clasificados por un lado de acuerdo al número de ecuaciones parciales y por el otro al nivel de orden de las mismas. Se consideran las variables independientes del modelo macroscópico de flujo continuo, la ubicación  $x$  en el instante  $t$ . Un aspecto importante a considerar en este tipo de modelos es que están conformados por ecuaciones diferenciales parciales que representan la varianza de la velocidad  $\Theta = \Theta(x, t)$ , o de la presión del tráfico  $P = P(x, t) = r \Theta$ .

**En 1955 Lighthill y Whitham** presentaron un proyecto que consistía en mostrar un modelo matemático en base a una analogía entre el tráfico vehicular y las partículas de un fluido, utilizando el método de ondas cinemáticas tomando como base la relación funcional que hay entre el flujo y la concentración del tráfico vehicular en las principales arterias carreteras de las ciudades, a partir de aquí se puede deducir una teoría de propagación de los cambios en la distribución del tráfico a través de las carreteras. La teoría se aplica a como se realiza el desplazamiento en una región de mayor concentración a lo largo de una carretera muy concurrida. Se sugiere que se moverá ligeramente más lento que la media de la velocidad del vehículo al momento de entrar a la congestión, y que los vehículos tendrán que reducir la velocidad de manera gradual y no de repente, pero que aumenten su velocidad poco a poco a medida que salgan de la congestión (como una onda de choque). La congestión se extiende a lo largo de la carretera y se estima una escala de tiempo para este proceso. El comportamiento de la congestión a la hora de entrar en un cuello de botella, se vuelve demasiado estrecho el camino para poder soportar el incremento del flujo, el estudio de esto genera métodos para estimar el alcance y la duración resultante. La teoría es aplicable principalmente a la conducta del tráfico durante un tramo largo de la carretera pero el resultado es debatible principalmente sobre los problemas del flujo cerca de los cruces.

**En 1971 Payne** propuso el primer modelo de flujo vehicular continuo que consistía de un sistema de dos ecuaciones diferenciales parciales, que son extensión de una ecuación diferencial parcial que se describe en la dinámica de la velocidad. Payne identificó los

términos: Convección que describe los cambios de la velocidad media de los vehículos que entran y que salen, relajación que describe la tendencia del flujo del tráfico a relajarse a una determinada velocidad y anticipación que describe la anticipación de los conductores ante las cambiantes condiciones del tráfico a su alrededor.

**Philips (1979)** propuso usar un tiempo de relajación dependiente de la densidad  $T = T(r)$ . Además, aproxima a la presión del tráfico con las ecuaciones  $P(r) = r\Theta^e(r)$ , con  $\Theta^e(r) = \Theta^0(1-r/r_{jam})$ . Sin embargo, **Kühne (1991)** y **Kerner (1996)** eligieron  $P = r \cdot c_0^2$  y  $\eta = \eta_0$ . Donde la varianza de la velocidad y la viscosidad del tráfico son constantes [1]. Suponer que la varianza de la velocidad no es real, pero hay un equilibrio entre descenso de la varianza de la velocidad con el incremento de la densidad del tráfico.

Una reciente contribución en el campo de los modelos de flujo macroscópicos son los de **Treiber (1999)**. Los autores propusieron un modelo de flujo basado en los principios de la teoría cinética del gas. La relación del equilibrio de la velocidad es causada por la aceleración de los vehículos por un lado, y por otro por la interacción entre ellos. Este último proceso incorpora un término de interacción no local que refleja la anticipación del comportamiento de los conductores. Helbing (1998) muestra como estos comportamientos no locales ocurren de diferentes estados del tráfico, dependiendo de los valores combinados del ritmo del flujo de un camino principal o de una rampa respectivamente.

A pesar de ser diferentes en su fundamentación, es posible establecer una relación entre los diferentes modelos microscópicos, mesoscópicos y macroscópicos. Klar y Wegener describieron un comportamiento de modelos presentando un modelo de flujo vehicular que es usado para determinar ecuaciones del flujo de la teoría cinética del gas. Que subsecuentemente fueron transformados en un modelo macroscópico de flujo vehicular.

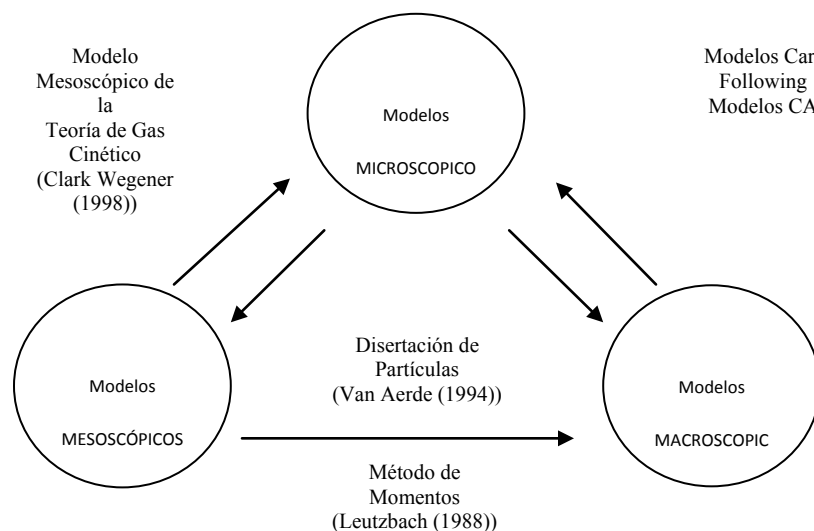


Figura 1.2 Relación entre los diferentes Modelos de Tráfico Vehicular

## 1.4 Categorización y Clasificación de los Modelos de Tráfico Vehicular

Kai Nagel creó un modelo para resolver el problema del tránsito vehicular basado en los autómatas celulares para la representación de las entidades del tráfico, es decir, se crea un arreglo de autómatas celulares tomando en cuenta condiciones de límites periódicos, donde cada autómata representaba la ausencia o estancia de un automóvil como es representado en la figura 1.3.

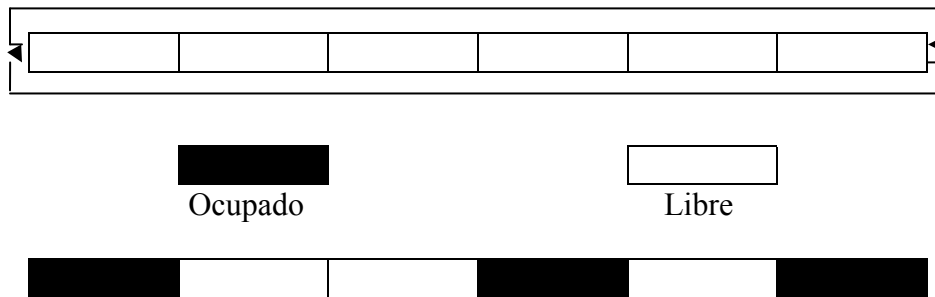


Figura 1.3 Representación de un autómata celular utilizado por el Modelo Kai Nagel

A diferencia de otros modelos donde es posible identificar los espacios vacíos en un grupo de autómatas, para saber si hay un lugar vacante que les permita avanzar en bloque en el mismo paso de tiempo, en el modelo de Nagel existe una variable que condiciona el avance de todos y cada uno de los autos que contiene el arreglo, esta variable conocida como *gap* (claro) el cual representa el total de espacios vacíos que tiene enfrente un auto como se muestra en la figura 1.4.

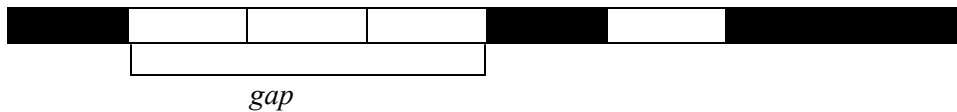


Figura 1.4 Representación de un *gap* con valor de 3

En este modelo es posible que los automóviles avancen con una velocidad mayor que 1, es decir, existe la posibilidad de asignar una  $V_{max}$ , generando que cada automóvil tenga una velocidad de 0 a  $V_{max}$ . Otra condición es que si la velocidad del automóvil es mayor al número de espacios vacíos que tiene delante de él (*gap*), la velocidad del

automóvil deberá recalcularse de acuerdo a los espacios disponibles que tenga en frente de él.

De esta manera para cada instante de tiempo deberán actualizarse siguiendo los siguientes pasos de manera consecutiva:

1. Aceleración: si la velocidad  $v$  de un vehículo es menor que  $V_{max}$  y si hay bastante espacio al frente ( $v \leq \text{gap} - 1$ ) la velocidad se incrementa en uno
2. Reducir la velocidad (debido a la interacción con otros vehículos): si el siguiente vehículo al frente está muy cerca ( $v \geq \text{gap} + 1$ ) entonces la velocidad se reduce a  $\text{gap}$ .
3. Movimiento de Automóviles: cada automóvil avanza  $v$  sitios.

### 1.4.1 Modelo de Autómata Celular para una sola cola

Supóngase el autómata celular 1D, la carretera es discretizada en  $n$  celdas, el tamaño de la celda equivale a  $\Delta x, = 7.5$  mts. Cada celda puede estar vacía u ocupada por un vehículo con velocidad  $v_i$ .

$$V = \bar{v} \in \{0, 1, \dots, \bar{v}_{max}\}$$

$$\Delta_t$$

$$\bar{v}_{max} = 5 = 37,5m/s$$

Las reglas de cambio son las siguientes:

- 1. Aceleración  $V_1 = \min(v^{i+1}, v^{max})$
- 2. Freno aleatorio con probabilidad  $R$   $V_1 = \max(V^{i-1}, 0)$
- 3. Desaceleración  $V^{i+1} = \min(d'ieff, v''_i)$   $d'ieff = (d'_i(1 - \alpha) * v^{fi}, \alpha \in [0,1])$
- 4. Movimiento  $X = X + V^{i+1}$

## *Capítulo 2*

# **Agentes Inteligentes y Simulación**

---

## **2.1 Agentes Inteligentes**

Un agente es cualquier cosa capaz de percibir su medioambiente con la ayuda de sensores y actuar en ese medio utilizando actuadores [12]. Un agente observa y actúa según sea su entorno y dirige su actividad en consecuencia de sus metas, también pueden adquirir y utilizar conocimiento para alcanzar sus metas y pueden ser muy simples o muy complejos.

Un agente que interactúa y cambia según su medio ambiente debe ser capaz de razonar esos cambios así como los eventos y acciones que los provocan y los efectos pueden recaer en el medio ambiente o en el tiempo en caso de que los cambios se den o no. Sin embargo, sin importar el tipo de ambiente en el que se encuentre ni el nivel de complejidad del mismo, un agente nunca tendrá el control completo sobre su medio ambiente, a lo más, tendrá un control parcial en lo que lo puede influenciar. Esto significa que aún cuando se realice la misma acción dos veces con aparentemente las mismas condiciones, esta puede producir diferentes efectos y más aún, puede no producir los resultados esperados.

Se utiliza el término percepción en este contexto para indicar que el agente puede recibir entradas en cualquier instante. La consecuencia de percepciones de un agente refleja el historial completo de lo que el agente ha recibido. En general un agente tomará una decisión en un momento dado dependiendo de la secuencia completa de percepciones hasta ese instante [12]. Normalmente, un agente tendrá un conjunto de acción que podrán realizar. Este conjunto de posibles acciones representan la capacidad de modificar su medio ambiente como se muestra en la Figura 2.1.

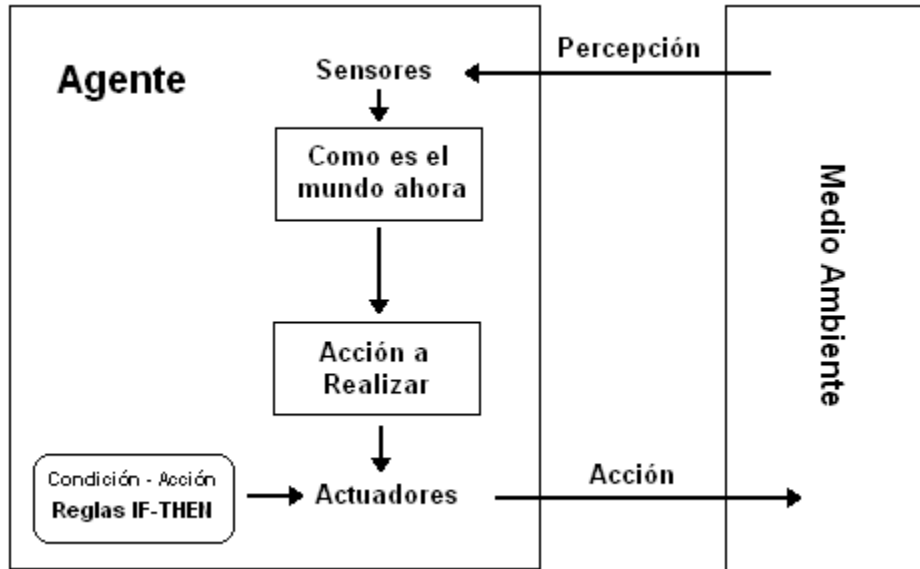


Figura 2.1 Representación de un Agente y como interactúa con su Medio Ambiente.

En términos matemáticos se puede decir que el comportamiento de un agente viene dado por la función del agente que proyecta una percepción dada en una acción. Esta puede ser presentada en forma de tabla, en la mayoría de los casos esta tabla sería muy grande. Dado un agente se puede construir esta tabla teniendo en cuenta las consecuencias de percepción y determinando que acción lleva a cabo en respuesta. La tabla es la caracterización externa del agente.

### 2.1.1 Como debe actuar un agente

No todas las acciones pueden ser desarrolladas en todas las situaciones. Uno de los principales problemas de un agente es el de decidir qué acción se debe efectuar bajo las condiciones adecuadas con el fin de satisfacer de la mejor manera sus tareas. Un agente racional es aquel que hace lo correcto, es decir, cada vez que el agente decide la acción a tomar a consecuencia de cualquier percepción, su tabla debería llenarse correctamente. El problema del proceso de la toma de decisiones puede ser afectado por un gran número de propiedades que tiene el medio ambiente. Rusell y Norving sugieren la siguiente clasificación de las propiedades del medio ambiente:

- Accesible contra Inaccesible. Un medio ambiente accesible es aquel en el que el agente puede obtener la información completa, exacta y actualizada del estado del medio ambiente. La mayoría de los medios ambientes moderadamente complejos son inaccesibles.

- Determinístico contra No determinístico. Un medio ambiente determinístico es aquel en el cual cada acción puede producir solo un efecto garantizado. No hay certeza sobre el estado que resultará dependiendo de la acción. Todos los efectos del mundo físicos son considerados como no determinísticos.
- Episódico contra no Episódico. En un medio ambiente episódico el rendimiento de un agente es dependiente del número de episodios discretos, sin relación entre el rendimiento de un agente en diferentes escenarios.
- Estático contra Dinámico. Un medio ambiente estático es uno en el que se puede asumir que no sufrirá ningún cambio por el desempeño de las acciones del agente. Un medio ambiente Dinámico es aquel en el que otros procesos operan sobre él. El mundo físico es altamente un ambiente dinámico.
- Discreto contra Continuo. Un medio ambiente es discreto si hay un número finito de acciones y de percepciones en el.

Si un medio ambiente es lo suficientemente complejo, entonces el hecho de que es determinístico no es de mucha ayuda, para todos los intentos y propuestas, puede ser también no determinístico. La clase general de medio ambiente más compleja son aquellos que son inaccesibles, no determinísticos, no episódicos, dinámicos y continuos. Otro de los aspectos, de cómo se debe de comportar un agente es a la hora de evaluarlo, es decir, decidir el *cómo* y el *cuándo* un agente realiza su acciones de manera exitosa.

Se utiliza el término **medida de rendimiento** para determinar el criterio de *cómo* un agente es exitoso o no. Cuando un agente se encuentra en el medio ambiente, se genera una secuencia de acciones de acuerdo a las percepciones que recibe. Esto genera que el agente entre en una secuencia de estados, si la secuencia es adecuada entonces el agente habrá actuado de manera exitosa. Nosotros como observadores podemos determinar un estándar de lo que signifique ser exitoso en un medio ambiente y usarlo como medida para el rendimiento del agente.

Evaluar el *cuándo* el rendimiento de un agente es adecuado también es importante. Si se evalúa un agente limpiador en la primera hora de trabajo, se estaría gratificando a los agentes que iniciaron de manera rápida y castigando a aquellos que trabajaron de manera consistente. Por lo tanto se debe realizar la evaluación después de varias horas después.

Es necesario diferenciar entre dos conceptos muy importantes, racionalidad y omniscencia. Un agente omnisciente sabe el resultado real de sus acciones, y puede actuar de acuerdo a ellas. Pero la omniscencia es imposible en la realidad. En cambio racionalidad tiene que ver con el éxito esperado teniendo en cuenta lo que se percibe. En otras palabras no podemos culpar al agente por tomar una decisión incorrecta por no percibir algo, o por fallar a la hora de realizar una acción, diseñar un agente que cumpla con todos estos requerimientos es imposible. Lo que es racional en cualquier momento dado depende de los siguientes cuatro puntos:

- La medida de rendimiento que define el grado de éxito.
- Todo lo que ha percibido el agente hasta ahora. A esta completa historia de percepción se le llama secuencia de percepción.
- Lo que el agente conoce de su medio ambiente.
- Las acciones que el agente puede realizar

Esto nos lleva a la definición de **Agente Racional Ideal**: para cada posible secuencia de percepción, un agente racional ideal debe realizar cualquier acción que es esperada para maximizar su medida de rendimiento, sobre las bases de evidencia aportadas por la secuencia de percepción y cualquier cosa que el agente haya construido en su base de conocimiento [13]. La noción de un agente significa ser una herramienta útil para analizar un sistema y no una caracterización absoluta que divide el mundo entre agentes y no agentes.

### 2.1.2 Autonomía

Otro de los aspectos importantes a considerar para el diseño de agentes racionales es la construcción de conocimiento. Si las acciones del agente están basadas en la construcción de conocimiento de tal forma que no necesitara poner atención a sus percepciones, entonces decimos que el agente carece de autonomía.

El comportamiento de un agente puede basarse en su propia experiencia y en la construcción de conocimiento utilizado para construir al agente para un medio ambiente en específico en el cual operará. Un sistema es autónomo en la medida en que su propio comportamiento esté determinado por su propia experiencia [13]. Cuando el agente ha tenido poca experiencia o ninguna, el agente tiende a actuar de manera aleatoria a menos que el diseñador le dé un poco de ayuda. Así como la evolución da a los animales la experiencia necesaria para sobrevivir (instinto) en su medio ambiente para tener el tiempo

necesario para aprender por su propia cuenta, sería razonable proporcionarle al agente inteligente artificial algún conocimiento inicial así como la capacidad para aprender.

La autonomía no solo se ajusta a la intuición, un agente que actúa sobre la base de construcción de hipótesis solo opera con éxito cuando esas hipótesis se mantengan y entonces pierde flexibilidad.

### **2.1.3 Estructura y Programas de Agentes Inteligentes**

El trabajo de la inteligencia artificial es la de crear el programa del agente que implemente la función del agente que proyecta las percepciones a las acciones. Se asume que este programa se ejecutará en alguna computadora con sensores físicos y actuadores, lo cual se conoce como arquitectura, obviamente el programa que elegimos tiene que ser uno que la arquitectura aceptará y correrá. La arquitectura puede ser para una computadora en específico, o puede incluir hardware de propósito especial para ciertas tareas. En general la arquitectura hace las percepciones de los sensores disponibles al programa, corre el programa. La relación entre el agente, el programa y la arquitectura se define como sigue:

$$\text{Agente} = \text{Arquitectura} + \text{Programa}$$

Las principales características a considerar para realizar una adecuada arquitectura del agente es tener una buena idea de las posibles percepciones y acciones, que metas o acciones de rendimiento el agente debe lograr, y en qué tipo de medio ambiente va a operar. El medio ambiente artificial más famoso es el medio ambiente de prueba de Turing en el que el punto es que los agentes están en igualdad de condiciones, sea real o artificial, pero el medio ambiente cambia lo suficiente que es muy difícil para un programa de agente realizar las acciones que un humano hace.

### **2.1.4 Clasificación de los programas de agentes**

Gracias a que existen diferentes enfoques para realizar la estructura de del programa de agente, se consideran cinco tipos de programas de agentes:

1. Agentes Reactivos Simples
2. Agentes Reactivos basados en modelo
3. Agentes basados en objetivos
4. Agentes basados en utilidad
5. Agentes que aprenden

### 2.1.4.1 Agentes Reactivos Simples

Son los agentes más simples que hay. Estos agentes seleccionan las acciones sobre la base de las percepciones actuales ignorando el resto de las percepciones históricas. La entrada visual de una cámara viene dada por un rango de 50 megabytes por segundo, así que la tabla resultante en una hora será del rango de  $2^{60 \times 60 \times 50M}$  entradas. Se pueden resumir algunas porciones de la tabla señalando algunas entradas que ocurren comúnmente. A este tipo de reglas se le definen como reglas de condición – acción y se escribe como sigue:

**if** condición **then** acción

Los humanos también tienen muchas conexiones, muchas de las cuales son respuestas aprendidas y algunos de los cuales son reflejos innatos, la figura 2.1 muestra la estructura esquemática de un agente reactivo simple mostrando como las reglas condición – acción permite al agente realizar las conexiones percepción acción.

Los agentes reactivos simples tienen la admirable propiedad de ser simples pero poseen una inteligencia muy limitada. Un agente funcionará solo si puede tomar la decisión correcta sobre la base de la percepción actual lo cual es posible solo si el entorno es totalmente observable.

### 2.1.4.2 Agentes Reactivos basados en modelo

Un agente de reacción simple trabajará solo si puede tomar la decisión correcta con las bases de la percepción. Sin embargo, no siempre los sensores nos proveen de un acceso completo al estado del medio ambiente. En tales casos, el agente puede necesitar mantener alguna información interna del estado con el fin de distinguir entre el estado del medio ambiente que genera la misma percepción pero que no obstante tengan significado diferente. Siendo que, significado diferente signifique que diferentes acciones sean apropiadas para los dos estados.

Actualizando la información interna del estado requiere la codificación de dos tipos de conocimiento por el programa del agente. Primero se necesita alguna información sobre cómo evoluciona el mundo independientemente del agente y segundo se necesita información de cómo las acciones del agente afectan al mundo. La estructura de un agente reactivo simple se muestra en la figura 2.2 mostrando cómo la percepción actual se combina con el estado interno para generar la actualización de la descripción del estado interno.

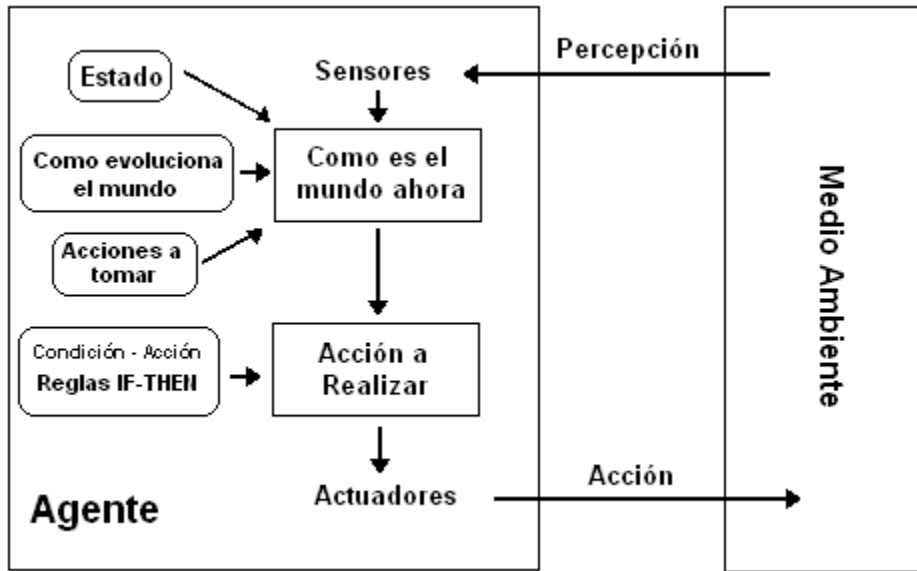


Figura 2.2 Estructura esquemática de una agente reactivo simple.

### 2.1.4.3 Agentes basados en objetivos

El conocimiento del estado del medio ambiente no siempre es suficiente para poder tomar la decisión adecuada. La decisión adecuada depende del objetivo de la meta del agente, es decir, además de la información del estado, el agente necesita algún tipo de información sobre la meta que el agente debe de lograr, la cual describe la situación que es deseable. El programa de agente puede combinar la meta con la información para obtener como resultado las posibles acciones a realizar. La toma de decisiones basada en objetivos es diferente a la toma de decisiones basada en las reglas condición – acción. La búsqueda y planificación son dos sub áreas de la inteligencia artificial dedicadas a la resolución de problemas utilizando objetos. La figura 2.3 muestra la estructura de un agente basado en objetivos.

### 2.1.4.4 Agentes basados en Utilidad

Las metas para los agentes no son como tales realmente buenos para generar un alta calidad en el comportamiento, por ejemplo, un agente puede realizar una acción para alcanzar su meta, sin embargo, esto no significa que sea la mejor manera de lograrlo, pueden existir diferentes acciones que lleven a la obtención de la misma meta pero algunas acciones van a llevar a su objetivo de manera más rápida o eficiente. Las metas solo proveen una distinción muy cruda entre los estados feliz e infeliz, más que una medida de ejecución general, debe de permitir la comparación entre los diferentes estados del medio ambiente de acuerdo a que tan feliz estaría el agente si realizara una acción u otra.

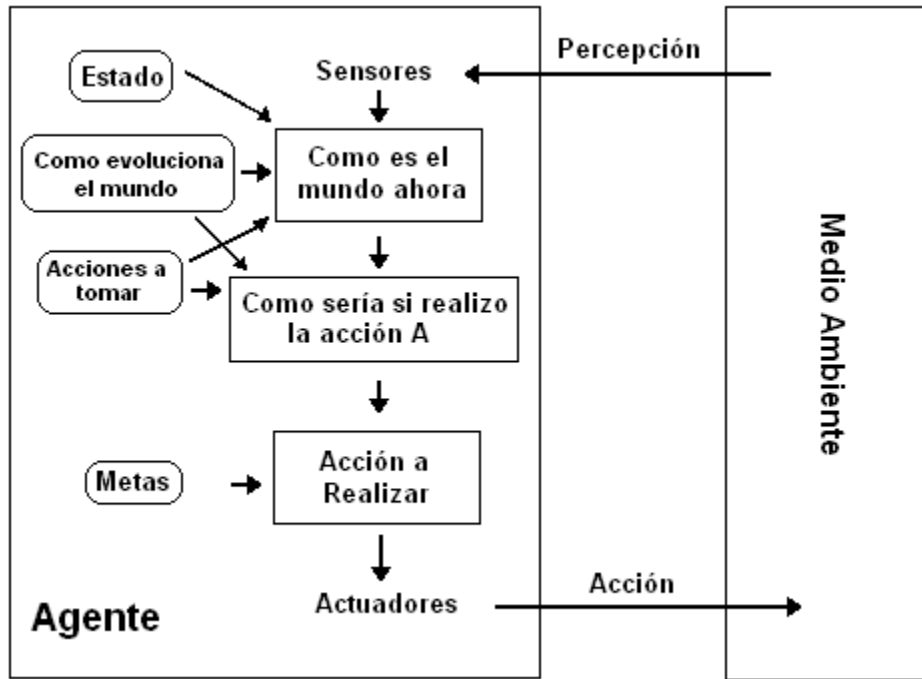


Figura 2.3 Estructura interna de un agente basado en objetivos.

Por lo tanto la utilidad es lo que mapea a un número real el estado, el cual describe el grado de felicidad. Una especificación completa de la función de utilidad permite racionalizar decisiones entre dos tipos de casos donde una meta tendría problemas. Cuando hay dos tipos de metas distintas en conflicto solo una se puede realizar, la función de utilidad determina cual es la más adecuada. Cuando hay muchas metas que el agente puede considerar, ninguno de los cuales puede lograr con certeza, la función de utilidad puede lograr una forma en la cual la probabilidad de éxito sea mayor para la importancia de las metas como se muestra en la figura 2.4.

#### 2.1.4.5 Agentes que aprenden

Turing en 1950, en su temprano y famoso artículo, considera la idea de programar sus máquinas inteligentes a mano. Estimó en cuánto tiempo podía llevar y concluyó que “Sería deseable obtener un método más rápido”. El método que propuso fue el de crear máquinas que aprenden y después enseñarles. El aprendizaje tiene varias ventajas, permite que el agente opere en medios totalmente desconocidos y que sea más competente que si solo utilizara su conocimiento inicial.

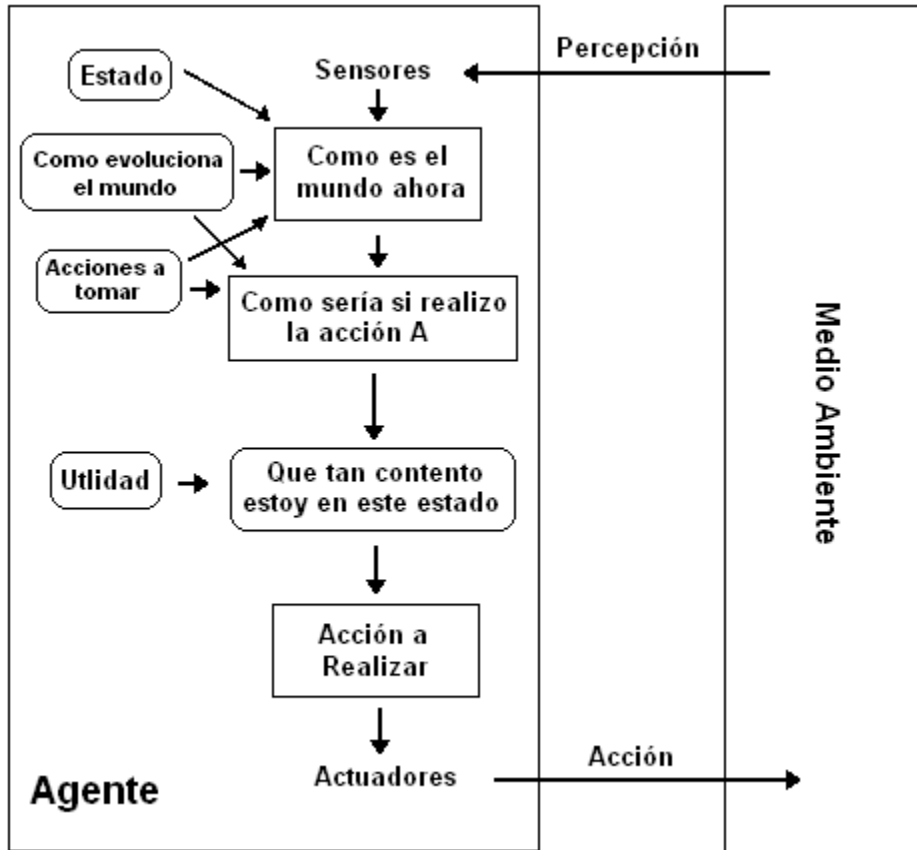


Figura 2.4. Estructura Interna de un agente basado en Utilidad.

Un agente que aprende se puede dividir en cuatro etapas como se muestra en la figura 2.5. La distinción más importante entre el elemento de aprendizaje y el elemento de actuación es que el primero está responsabilizado de hacer mejores y el segundo se responsabiliza de la selección de las acciones externas. El elemento de actuación es lo que se considera como un agente completo, es decir, recibe estímulos y determina las acciones a realizar. El elemento de aprendizaje se realimenta con las críticas sobre la actuación del agente y determina cómo se debe modificar el elemento de actuación para proporcionar mejores resultados en el futuro.

### 2.1.5 Relación entre Automatas Celulares y Agentes Inteligentes

Los autómatas celulares (AC) son sistemas dinámicos discretos en todas sus componentes: espacio, tiempo y variable(s) de estado. El reto de modelar mediante AC estriba en formular la regla de transición apropiada al fenómeno estudiado. Los AC permiten describir fenómenos complejos, pero sus reglas tienden a ser sencillas, en cierta medida cualitativa, con el mínimo aparato matemático.

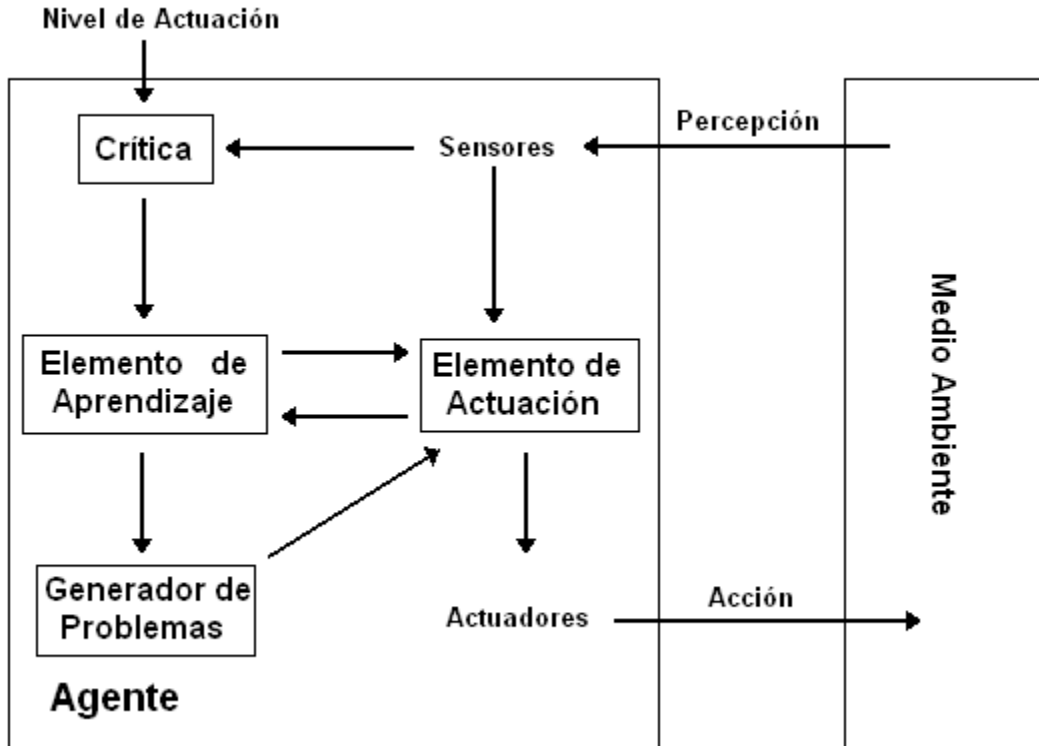


Figura 2.5 Estructura Esquemática de un agente que aprende.

La estructura de un Autómata Celular, se define con sus componentes básicos:

- Un plano bidimensional o un espacio n-dimensional dividido en un número de sub espacios homogéneos conocido como celdas. A todo esto se le denomina Teselación Homogénea.
- Cada celda puede estar en uno o en un conjunto finito o numerable  $\Sigma$  de estados.
- Una configuración C, la que consiste en asignarle un estado a cada celda del autómata.
- Una vecindad definida para cada celda, la que consiste en un conjunto contiguo de celdas, indicando sus posiciones relativas respecto a la celda misma.
- Una regla de evolución, la cual define cómo debe cada celda cambiar de estado, dependiendo del estado inmediatamente anterior de su vecindad.
- Un reloj virtual de cómputo conectado a cada celda del autómata, el cual genera "tics" o pulsos simultáneos a todas las células indicando que debe aplicarse la regla de evolución y de esta forma cada celda cambiara de estado.

A partir de la publicación del juego de la vida de Conways, los autómatas celulares han sido usados como modelos en diferentes áreas de las ciencias físicas y espaciales, biología, matemáticas y ciencias de la computación, así como en las ciencias sociales. Son una plataforma de modelado muy útil, desde células de una malla que pueden cambiar de encendido a apagado hasta un vecindario de celdas que pueden representar un fenómeno dinámico sus actitudes o acciones por ejemplo.

Una vez que se desea desarrollar un sistema con autómatas que es de alguna manera más complejo en su proceso interno y por consecuencia en su comportamiento, nos introducimos en un mundo diferente conocido como simulación o modelado basado en agentes. Tal autómatas es convencionalmente llamado agente, hay varias corrientes de crecimiento en que un agente se puede diseñar, construir y utilizar. Si bien no hay una generalidad, un acuerdo en su definición de que es un agente, el término usualmente implica autonomía, una entidad inteligente que puede interactuar o comunicarse con otras entidades autónomas inteligentes. Como con los autómatas celulares, hay reglas que gobiernan el comportamiento interactivo y los agentes operan dentro o sobre un medio ambiente de algún tipo.

Algunas de las principales similitudes y diferencias de los Autómatas Celulares y los Agentes Inteligentes pueden verse en la siguiente tabla:

<b>Agentes Inteligentes</b>	<b>Autómatas Celulares</b>
Un agente puede verse como una entidad que es capaz de percibir su medio ambiente y reaccionar en consecuencia.	Un Autómata Celular es un sistema dinámico bidimensional que puede ser dividido en $n$ – sub espacios llamados células que evolucionan dependiendo de la salida de su vecino en un instante de tiempo.
El agente tiene un conjunto de reglas que utiliza para resolver que acción tomará dependiendo de la percepción.	El Autómata Celular tiene un conjunto de estados y que definen la acción que está realizando.
No tiene un estado fijo, simplemente selecciona la acción dependiendo del análisis interno que realice tomando en cuenta el aprendizaje que haya adquirido hasta ese momento.	Cada celda del Autómata Celular puede estar en un estado diferente al de su vecino y por consecuencia realizando diferentes acciones.
Por alguna percepción dada, el agente puede realizar siempre la misma acción.	Con cada estímulo que recibe de su vecino puede evolucionar a un diferente estado dependiendo del estado en el que se encuentre en ese momento.

No sabe si existen otros autómatas en el medio ambiente simplemente reacciona a las percepciones del mismo.	Está conformado por un conjunto de células, y sabe quiénes son sus vecinos.
Es capaz de agrandar su base de conocimientos analizando sus previas decisiones y que tan exitosos fueron.	No es capaz de aprender.
Si hay más de un agente en el medio ambiente, cada uno puede aprender diferentes situaciones según los estímulos que hayan recibido, es decir, aunque al principio los agentes tuvieran la misma base de conocimiento, después de un tiempo ésta puede ser muy diferente a la de los demás.	Contiene un conjunto finito de estados que son iguales para toda la vecindad y que no cambia.

## 2.2 Simulación

La simulación es una técnica muy poderosa y ampliamente usada en las ciencias para analizar y estudiar sistemas complejos. En Investigaciones se formularon modelos que se resolvían en forma analítica. En casi todos estos modelos la meta era determinar soluciones óptimas. Sin embargo, debido a la complejidad, las relaciones estocásticas, etc., no todos los problemas del mundo real se pueden representar adecuadamente en forma de modelo. Cuando se intenta utilizar modelos analíticos para sistemas como éstos, en general necesitan de tantas hipótesis de simplificación que es probable que las soluciones no sean buenas, o bien, sean inadecuadas para su realización. En ese caso, con frecuencia la única opción de modelado y análisis de que dispone quien toma decisiones es la simulación [14].

La simulación es la representación de un proceso o fenómeno mediante otro más simple, que permite analizar sus características, existen muchas definiciones de simulación pero aquí se presentan dos de las más aceptadas [15] [16].

Simulación es la reproducción de un suceso basado en el modelo de una hipótesis con el fin de obtener el comportamiento del mismo. Simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos periodos de tiempo [17].

La simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias -dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos - para el funcionamiento del sistema [18].

Hoy en día, la simulación es algo cotidiano puede ser desde la simulación de un examen, que le hace la maestra a su alumno, la producción de textiles, alimentos, juguetes, construcción de infraestructuras, hasta el entrenamiento virtual de los pilotos de combate [16].

Simular, es reproducir artificialmente un fenómeno o las relaciones entrada salida de un sistema. Esto ocurre siempre cuando la operación de un sistema o la experimentación en él son imposibles, costosas, peligrosas o poco prácticas. Si esta reproducción está basada en la ejecución de un programa en una computadora digital, entonces la simulación se llama digital y normalmente se conoce como simulación por computadora, aunque esto incluye la simulación en las computadoras analógicas.

### **2.2.1 Etapas para realizar el estudio de la simulación**

Para llevar a cabo un experimento de simulación es necesario estudiar las siguientes etapas:

- **Definición del Sistema:** Para tener una definición exacta del sistema que se desea simular, es necesario hacer primeramente un análisis preliminar del mismo, con el fin de determinar la iteración del sistema con otros sistemas, las restricciones del sistema, las variables que interactúan dentro del sistema y sus interrelaciones, las medidas de efectividad que se van a utilizar para definir y estudiar el sistema y los resultados que se esperan obtener del estudio.
- **Formulación del Modelo:** Una vez que están definidos con exactitud los resultados que se desean obtener del estudio, el siguiente paso es definir y construir el modelo con el cual se obtendrán los resultados deseados. Aquí es necesario definir las variables que forman parte del modelo, sus relaciones lógicas y los diagramas de flujo que describan en forma completa al modelo.
- **Colección de Datos:** Es posible que la facilidad de obtención de algunos datos o la dificultad de conseguir otros, pueda influenciar el desarrollo y formulación del modelo. Por ello es importante que se defina con claridad y exactitud los datos que el modelo va a requerir para producir los resultados deseados.

- Validación: A través de esta etapa es posible detallar definiciones en la formulación del modelo o en los datos alimentados al modelo. Las formas más comunes de validar un modelo son:
  - a) Opinión de expertos.
  - b) La exactitud con la que se predicen los datos
  - c) Exactitud de la predicción del futuro
  - d) Comprobación de la falla del modelo de simulación al utilizar datos que hacen fallar al sistema.
  - e) Aceptación y confianza en el modelo de la persona que lo usara
- Experimentación: La experimentación con el modelo se realizará después de que éste ha sido valido. Ésta consiste en generar los datos deseados y en realizar análisis de sensibilidad de los índices requeridos.
- Interpretación: A que se interpretan los resultados que arroja la simulación y en base a esto se toma una decisión.
- Documentación: Existen dos tipos de documentación que son requeridos para hacer un mejor uso del modelo de simulación.
- Documentación Técnica: Es la documentación que el departamento de procesamiento de datos debe tener del modelo.
- Manual de Usuario: Es la documentación que facilita la interpretación y el uso del modelo desarrollado a través de una terminal de computadora.

### **2.2.2 Simulación por computadora**

La simulación por computadora está relacionada con los simuladores. Por simulador entendemos no solo un programa de simulación y la computadora que lo realiza, sino también un aparato que muestra visualmente y a menudo físicamente las entradas y salidas (resultados) de la simulación, como es el caso de los simuladores profesionales de vuelo.

A partir del avance de las computadoras, la simulación ha sido una de las herramientas más importantes y útiles para analizar el diseño y operación de complejos procesos o sistemas [19].

### 2.2.3 Ventajas y desventajas de la simulación por computadora

La simulación asistida por computadora presenta ciertas **desventajas**:

- Los valores finales reportados en una simulación son solo estimaciones de los valores reales que se están buscando.
- Para obtener estimaciones más exactas y para minimizar la probabilidad de tomar una mala decisión, se debería
  - a) Hacer un gran número de ensayos en cada simulación y/o,
  - b) Repetir toda la simulación un gran número de veces. Para problemas más complejos, un gran número de repeticiones puede requerir cantidades significativas de tiempo de cómputo.
- Cada simulación requiere su propio diseño especial para imitar el argumento real bajo investigación y su propio programa de computadora asociado. Aunque es posible aprender y usar paquetes de software especializados, el esfuerzo de desarrollo en el diseño y programación de simulaciones del mundo real es extremadamente tardado.

Como resultado de estas desventajas, se debería intentar resolver su problema usando técnicas analíticas siempre que sea posible. Hacer esto requiere menos esfuerzo y da como resultado respuestas exactas en vez de estimaciones [19].

No obstante, a pesar de las desventajas, la simulación por computadora es una de las técnicas más comúnmente usadas porque ofrece las siguientes **ventajas**:

- La simulación le permite analizar grandes problemas complejos para los que no están disponibles resultados analíticos. De hecho, la mayoría de los problemas de mundo real encajan en esta categoría. La simulación proporciona una alternativa práctica.
- Como con cualquier forma de simulación, la simulación por computadora permite que el tomador de decisiones experimente con muchas políticas y argumentos diferentes sin cambiar o experimentar realmente con el sistema existente real. Por ejemplo, con una simulación por computadora, usted puede estudiar el impacto de añadir una nueva estación de trabajo a una línea de producción sin tener que organizar la estación de trabajo físicamente.

- La simulación por computadora le permite comprimir tiempo. Por ejemplo, usted puede estudiar el impacto a largo plazo de una política para un banco durante todo un año en una simulación por computadora que dura unos cuantos minutos. La alternativa de implantar realmente la política y observar sus resultados en un año tal vez no sea práctica.
- Algunas técnicas analíticas requieren de experiencia matemática sofisticada, tanto para utilizarlas como para comprenderlas. Una simulación por computadora puede requerir pocas o ningunas matemáticas complejas y por tanto, puede ser intuitivamente más comprensibles. Por esta razón, la simulación por computadora puede usarse aún cuando el problema pueda analizarse usando técnicas matemáticas.

### **2.2.4 Ventajas y desventajas de la simulación por computadora**

Las funciones que cumplen una simulación son las siguientes:

- Descubrir el comportamiento de un sistema.
- Postular teorías o hipótesis que expliquen el comportamiento observado.
- Usar esas teorías para predecir el comportamiento futuro del sistema, es decir, mirar los efectos que se producirían en el sistema mediante los cambios dentro de él o en su método de operación.

### **2.2.5 Algunos usos de la simulación**

Las áreas de aplicación de la simulación son muy amplias, numerosas y diversas, basta mencionar solo algunas de ellas [15] [16]:

- Análisis del impacto ambiental causado por diversas fuentes.
- Análisis y diseño de sistemas de manufactura.
- Análisis y diseño de sistemas de comunicaciones.
- Evaluación del diseño de organismos prestadores de servicios públicos (por ejemplo: hospitales, oficinas de correos, telégrafos, casas de cambio, etc.).
- Análisis de sistemas de transporte terrestre, marítimo o por aire.

- Análisis de grandes equipos de cómputo.
- Análisis de un departamento dentro de una fábrica.
- Adiestramiento de operadores (centrales eléctricas, aviones, etc.).
- Análisis de sistemas de acondicionamiento de aire.
- Planeación para la producción de bienes.
- Análisis financiero de sistemas económicos.
- Evaluación de sistemas tácticos o de defensa militar.
- La simulación se utiliza en la etapa de diseño para auxiliar en el logro o mejoramiento de un proceso o diseño o bien a un sistema ya existente para explorar algunas modificaciones.



## *Capítulo 3*

# **Definición del Proyecto, Análisis y Diseño**

---

En este capítulo se definen los requerimientos del proyecto, se efectuará el análisis de los requisitos y se definirán detalladamente las principales entidades y las relaciones que existen entre ellas.

### **3.1 Descripción de los Requerimientos**

En el transcurso de la historia de un país, generalmente se han hecho esfuerzos para desarrollar un sistema de transporte que sea coherente con sus necesidades. Las autoridades gubernamentales hacen planes para el desarrollo del transporte, que tiene poco impacto en la estructura general del sistema. Se crean comisiones para regular al transporte sin considerar a todos los actores que intervienen en el sistema, estableciendo lineamientos de política imprecisos y hasta contradictorios y sin detenerse a analizar el impacto que tienen las diferentes políticas y acciones que se toman, sobre las diversas modalidades del transporte o respecto a la urbanización, consideraciones que con frecuencia no han ayudado a obtener los resultados deseados.

El objetivo de este proyecto es el de proponer un modelo de simulación de tráfico vehicular en un escenario generado complejo en un ambiente distribuido así como la voluntad y las metas de la población a partir de un modelo ya establecido con el fin de incrementar las características del mismo lo que permita obtener resultados mayor apegados a la realidad.

Para este sistema se realizará una aplicación en donde se puedan construir escenarios complejos a partir del diseño de las calles, avenidas y cruces vehiculares y que estará compuesto de zonas habitacionales, de trabajo y comerciales. Se definirán reglas de tránsito vehicular que gobernarán el comportamiento de las entidades de tráfico en la simulación, se distinguirá entre tres tipos o clases de vehículos, cada uno con diferentes características y se mostrarán resultados de acuerdo al comportamiento que las entidades de tráfico hayan tenido en la simulación. El sistema deberá contar con las siguientes características:

La primera parte del sistema consistirá en la elaboración de un editor de escenario en el que se pueda realizar la construcción de calles y cruces vehiculares y que dará como resultado escenarios que representarán al sistema carretero de una región. En la generación de calles podrá elegirse el sentido del flujo de tránsito, también podrá elegirse el número de carriles y la orientación del mismo. Para cada calle se deberá conocer la longitud de la misma en metros, si ésta es generadora de vehículos o en caso contrario eliminará vehículos cuando estos lleguen al final de la misma, o si se comunica con otra calle en otro escenario. La generación de calles de doble sentido se logrará por medio de un camellón que podrá unir dos calles con diferente sentido. También se podrán generar cruces vehiculares con número de carriles según lo requiera el usuario, una vez que se definan, solo podrán asociarse con calles que tengan el mismo número de carriles sin importar si son de un solo sentido o no. Se podrá especificar el número de semáforos que tendrá el cruce así como los señalamientos.

La segunda etapa consiste en la elaboración de un editor de diseño para poder cambiar las características de circulación en los escenarios. Especificar para cada semáforo el tiempo de sincronización. Para las calles generadoras de vehículos determinar el número de vehículos que entrarán en el escenario dependiendo del tipo de vehículo y estará sujeta a la disponibilidad en cuanto a espacio que tenga la calle así como a los semáforos.

La tercera parte del sistema consiste en la realización de la simulación, que una vez especificado el escenario y las entidades de tráfico vehicular, ésta deberá mostrar visualmente los vehículos en movimiento circular por las calles mostrando el comportamiento del flujo de tráfico, al término de la simulación mostrará en forma de gráficas los resultados obtenidos y se podrá guardar la simulación para verla en un tiempo posterior al que se realizó.

Para cada etapa del sistema éste debe ser capaz de salvar los escenarios para su posterior modificación. Otra de las características con las que contará es la de poder dividir un escenario complejo en varios más pequeños con la finalidad de ejecutar la simulación en diferentes nodos del sistema distribuido y agilizar la ejecución de la misma aliviando la carga de trabajo.

## 3.2 Requerimientos funcionales del sistema

Debido a la complejidad del sistema la primera estrategia es dividir los requerimientos funcionales del sistema en problemas más pequeños, un enfoque tradicional para realizar esto es el análisis y diseño estructurados, donde se trata de descomponer el sistema en funciones y procesos originando una división jerárquica de procesos construidos por sub-procesos.

Se identifica dentro de la especificación de los requerimientos la siguiente división de procesos dentro de los requerimientos fundamentales del sistema:

**Edición de Escenario:** Es posible identificar los siguientes procesos:

- Agregar, eliminar o modificar Calles
- Agregar, eliminar o modificar Cruces Vehiculares
- Especificar la ubicación de semáforos en los Cruces Vehiculares
- Especificar la ubicación de vehículos en las Calles
- Realizar la representación gráfica de las entidades de tráfico
- Configurar el escenario
- Guardar, abrir, cerrar y modificar los escenarios
- Realizar la división de escenarios

**Editor del Diseño:** Es posible identificar los siguientes procesos:

- Inicialización y sincronización de los semáforos
- Representación gráfica de la forma en que se sincronizan los semáforos
- Definición de las condiciones iniciales de los vehículos
- Definir metas para los vehículos que así lo requieran
- Definición de la función de la ubicación de los vehículos (generar, eliminar, comunicar)
- Inicialización de las condiciones iniciales de la calle
- Realizar la representación gráfica de las entidades de tráfico
- Guardar, abrir, cerrar y modificar las condiciones iniciales del escenario

**Edición de Escenario:** Es posible identificar los siguientes procesos:

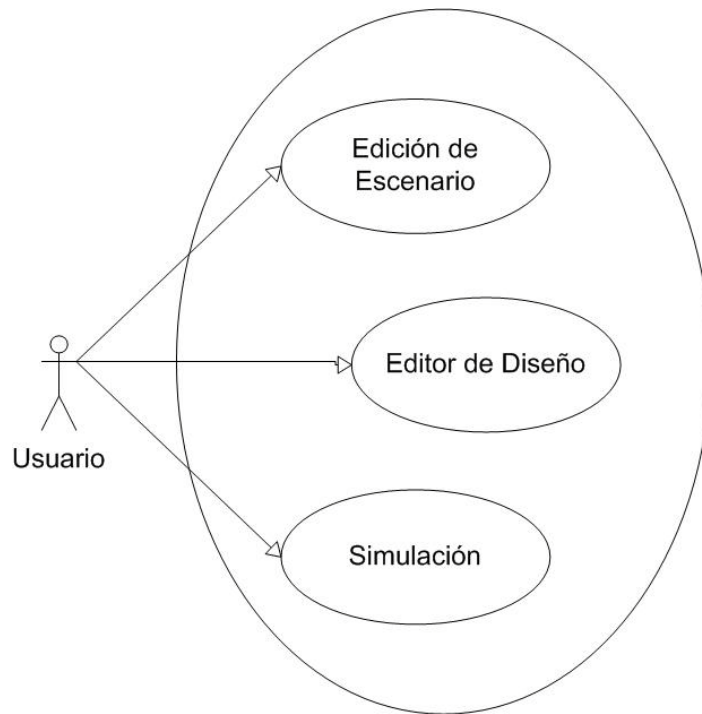
- Realizar la simulación
- Representar de manera gráfica la simulación
- Impresión de los resultados de la simulación
- Guardar, abrir, cerrar los resultados de la simulación

### 3.3 Análisis

El Análisis del Sistema trata básicamente de determinar los objetivos y límites del sistema objeto de análisis, caracterizar su estructura y funcionamiento, marcar las directrices que permitan alcanzar los objetivos propuestos y evaluar sus consecuencias.

#### 3.3.1 Diagramas de Casos de Uso

Los diagramas de casos de uso nos ayudan a identificar la descripción escrita del comportamiento del sistema al afrontar una tarea o requisito y la posición o el contexto del caso de uso entre otros casos de uso, es decir, identifican los servicios principales del sistema, los actores del mismo y la relación que hay entre ellos.



**Figura 3.1 Servicios** Generales del Sistema de Simulación de Tráfico Vehicular.

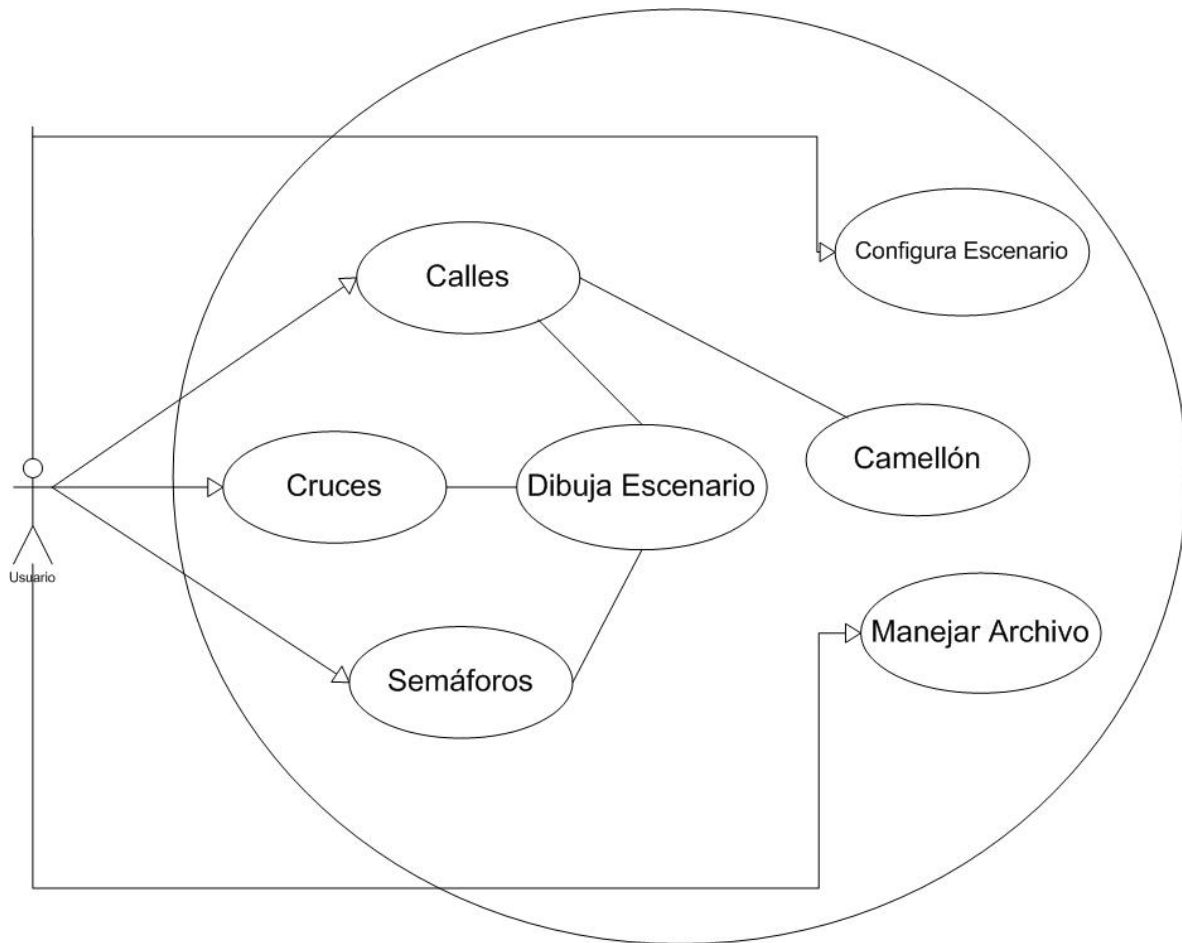
La figura 3.1 muestra los servicios generales del sistema de Simulación de Tráfico Vehicular en donde se distinguen los tres principales:

**Edición de Escenario:** Realiza la creación y edición de escenarios de tránsito vehicular donde se especifican los vehículos, cruces y señalamiento, que interactuarán en la simulación y que conforman una región.

**Editor del Diseño:** En él se especifican las condiciones iniciales con las que arrancará la simulación, además de la meta de algunos de los vehículos, la sincronización de los semáforos y la definición del número de vehículos con sus respectivas características.

**Simulación:** Ejecutará la simulación de acuerdo a las condiciones especificadas anteriormente y mostrará una representación gráfica de la misma mostrando algunas de las calles que componen a la región. Además se encargará de mostrar reportes estadísticos de los resultados obtenidos a lo largo de la misma como es la velocidad de los vehículos que pasan por alguna calle, etc.

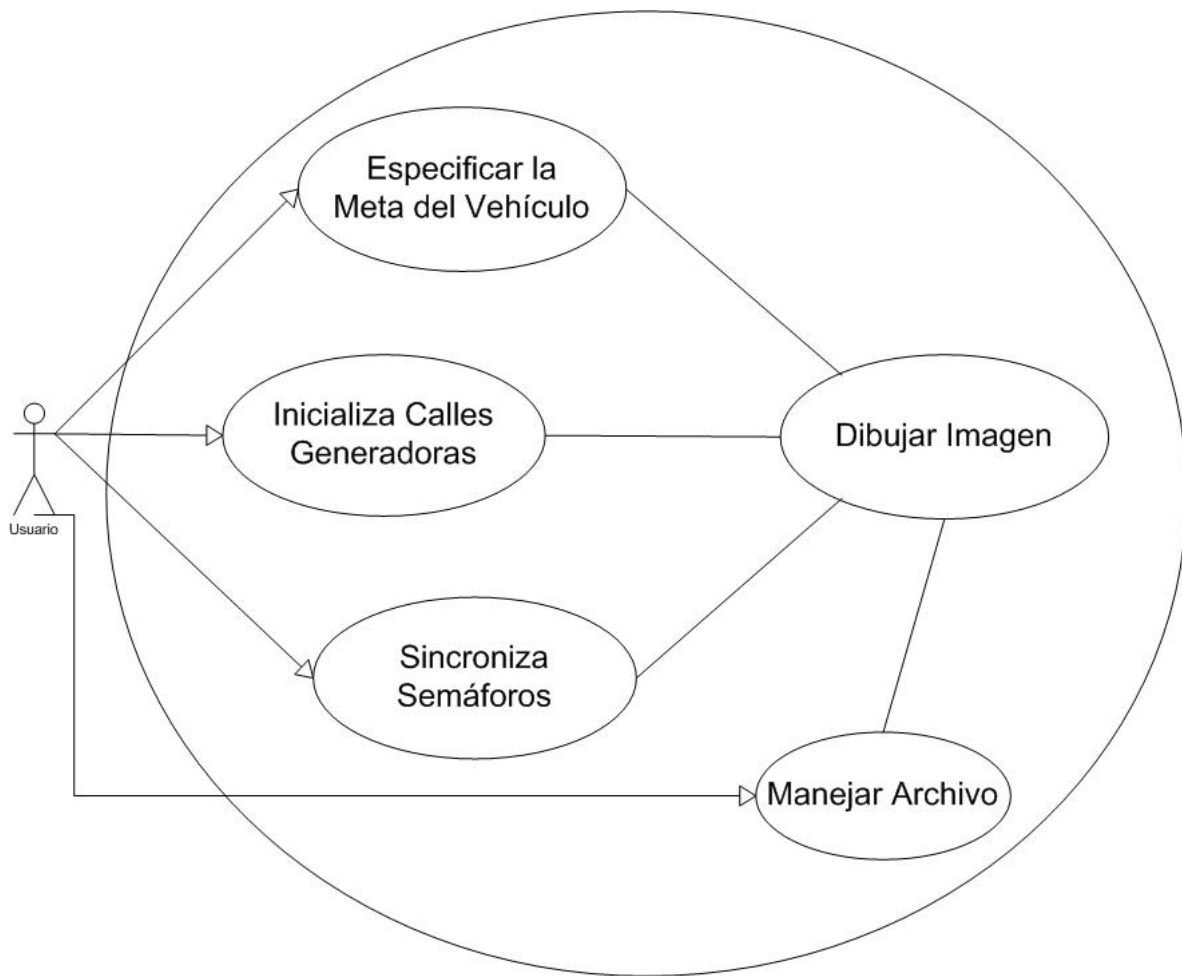
A continuación se analiza de manera independiente cada uno de las partes que conforman el sistema así como sus servicios.



**Figura 3.2** Diagrama de Casos de Usos que muestra los servicios del Editor de Escenarios.

La figura 3.2 muestra los principales servicios con los que cuenta el editor de escenario, la creación de calles y cruces con sus respectivas características, determinar la cantidad de semáforos con los que cuenta cada cruce.

El usuario puede interactuar con la mayoría de los servicios, al ingresar una calle nueva, él elegirá el tamaño de la misma, el sentido y el número de los carriles, además podrá ubicar la calle en la posición del escenario que el deseé, de la misma manera ocurre para los servicios de vehículos, cruces y semáforos, además podrá configurar el escenario a su gusto en cuanto al tamaño del mismo y salvará los escenarios editados para su posterior modificación. El servicio Dibuja Escenario solo es accesible por los demás servicios que lo componen y en este caso el usuario no puede acceder a él.



**Figura 3.3** Diagrama de Casos de Uso que muestra los Servicios del Editor de Diseño.

En la figura 3.3 se muestran los principales servicios del editor de diseño, la principal característica de esta parte del sistema es la de poder inicializar las principales entidades que fueron definidas en la parte de edición de escenario.

Se inicializa el número de vehículo de cada tipo que entrarán al escenario por medio de las calles generadoras, cada tipo de vehículo contará con sus propias características que lo harán único dentro del escenario.

También se inicializarán para su sincronización los semáforos y se podrá elegir una meta para un vehículo en particular, es decir, elegir un origen desde el cual el vehículo va a partir y un destino al cual tiene que llegar, como por ejemplo la meta de una persona que tiene que llegar a su lugar de trabajo y tiene que hacerlo en un determinado tiempo.

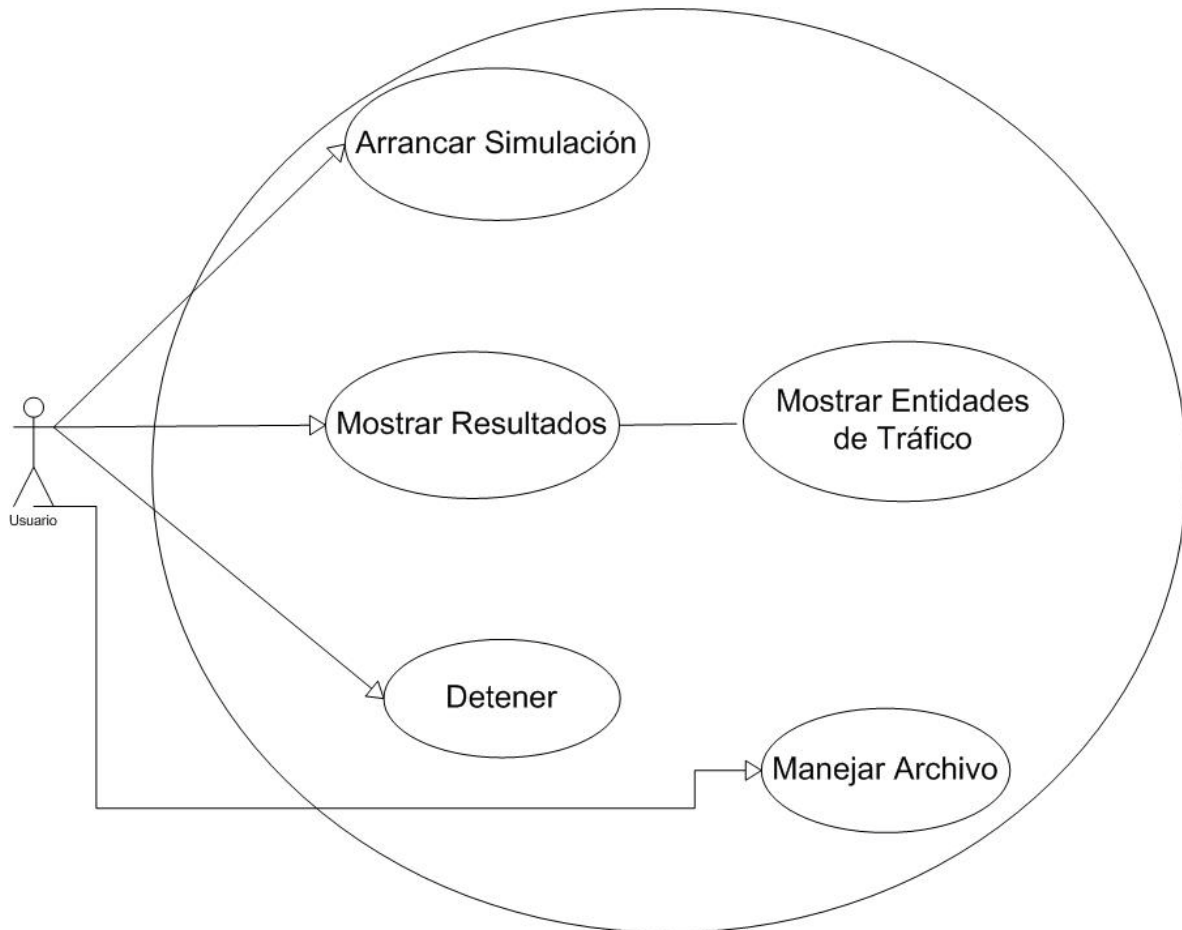


Figura 3.4 Diagrama de Casos de Uso que muestra los Servicios de la Simulación.

En la figura 3.4 se muestran los principales servicios que tiene la parte de Simulación en el sistema.

Para realizar la visualización primero se debió pasar por el modelo, su simulación, y escoger la forma de visualización que se desea realizar la graficación o simplemente la simulación, si se desean imprimir los resultados de la simulación, y que es lo que se va a mostrar en pantalla. En la figura 3.5 se muestran las principales clases del sistema y cómo interactúan entre ellas.

Para que un agente obtenga las metas y los objetivos para lo que fue diseñado, es necesario asociar a ellos tareas. Un agente es funcional en la medida en que tan eficaz es para realizar las tareas asignadas por el usuario ya sea de manera directa o como resultado de la interacción con el medio ambiente. Además, son un indicativo de cómo debe alcanzar el agente una meta. En el sistema se pueden identificar dos tipos diferentes de agentes: el agente vehículo y el agente vehículo con voluntad, la principal diferencia es que al agente vehículo con voluntad se le es asignado un destino en el escenario. En la siguiente tabla se listan los objetivos y tareas de los agentes que componen el sistema.

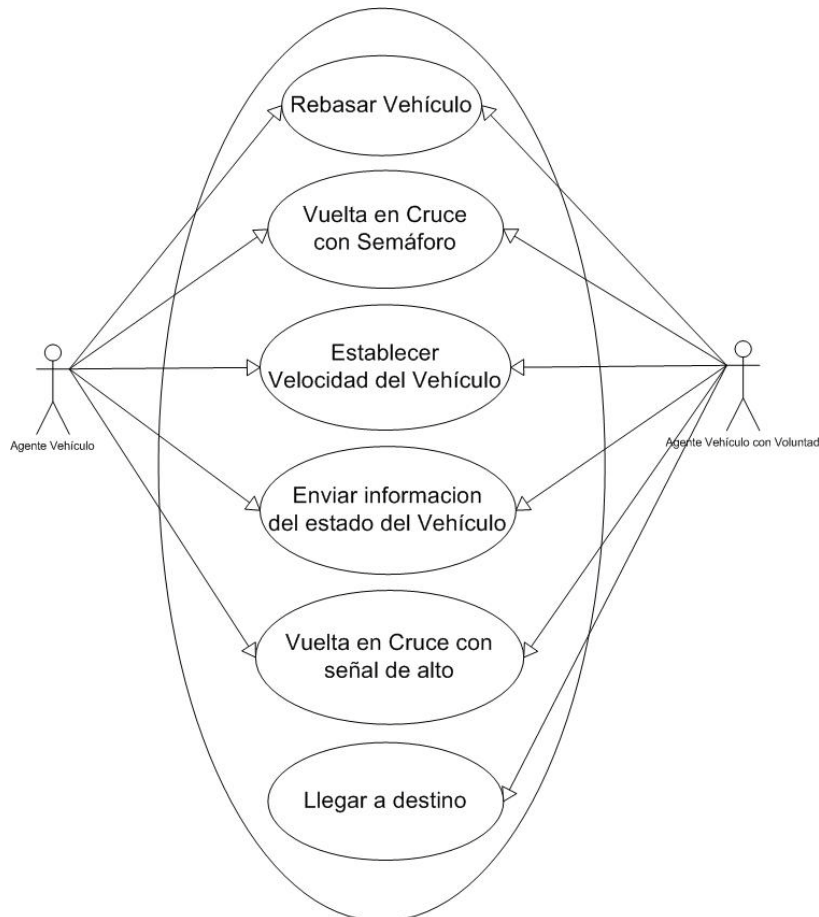
**Tabla 3.1** Objetivos y Metas del agente Vehículo

<b>Metas del Agente</b>	<b>Tareas</b>
<b>1.</b> Establecer Velocidad del Vehículo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recibir Vmax de la Calle en la que se encuentra.</li> <li>• Recibir GAP de los vehículos que se encuentran en la misma calle.</li> <li>• Calcular velocidad del vehículo.</li> <li>• Identificar el estado del cruce al final de la calle en la que se encuentra.</li> </ul>
<b>2.</b> Rebasar a un Vehículo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Decidir realizar rebase.</li> <li>• Recibir GAP de los vehículos del carril contiguo.</li> <li>• Establecer velocidad de rebase.</li> <li>• Realizar cambio de carril.</li> </ul>
<b>3.</b> Vuelta en un Cruce con Semáforo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar el estado del semáforo.</li> <li>• Recibir GAP de las calles vinculadas con el cruce.</li> <li>• Calcular probabilidad de vuelta.</li> <li>• Decidir dirección a tomar.</li> </ul>
<b>4.</b> Vuelta en un Cruce con señal de alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recibir GAP de las calles vinculadas con el cruce.</li> <li>• Identificar señalización en la calle.</li> <li>• Calcular probabilidad de vuelta</li> <li>• Decidir dirección a tomar.</li> </ul>
<b>5.</b> Enviar información del estado del vehículo al usuario.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enviar ubicación a la interfaz para realizar su representación gráfica en pantalla.</li> </ul>

El agente vehículo con voluntad tiene el siguiente objetivo adicional al del agente vehículo.

**Tabla 3.2** Objetivos y Metas del agente Vehículo con Voluntad

Objetivos del Agente	Tareas
<p><b>6.</b> Llegar a un destino específico</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recibir un destino (Lugar específico del escenario).</li> <li>• Identificar destino.</li> <li>• Guardar la ruta de las calles recorridas y tiempo realizado al alcanzar el destino.</li> <li>• Ordenar Rutas dependiendo del tiempo realizado.</li> <li>• Eliminar Rutas después de un cierto periodo de tiempo.</li> </ul>



**Figura 3.5** Diagrama de Casos de Uso de los objetivos del Agente Vehículo y el Agente Vehículo con Voluntad que son representados por los actores del diagrama.

### 3.3.2 Diagramas de Clases

La figura 3.6 muestra el diagrama de clases que describe las principales clases y agentes del editor de escenario.

La interfaz de usuario maneja la representación de la información en forma gráfica, es el encargado de mostrar al usuario la ubicación de los elementos del tráfico, así como permitirle agregar, eliminar o editar elementos al mismo. La clase Archivos se encarga de guardar, abrir, cerrar, archivos en donde se encuentra la información del editor, calles, cruces, automóviles, etc. Además permite el manejo de los archivos. La clase configura escenario dibuja en la interfaz de usuario la representación gráfica de la información de los agentes de tráfico.

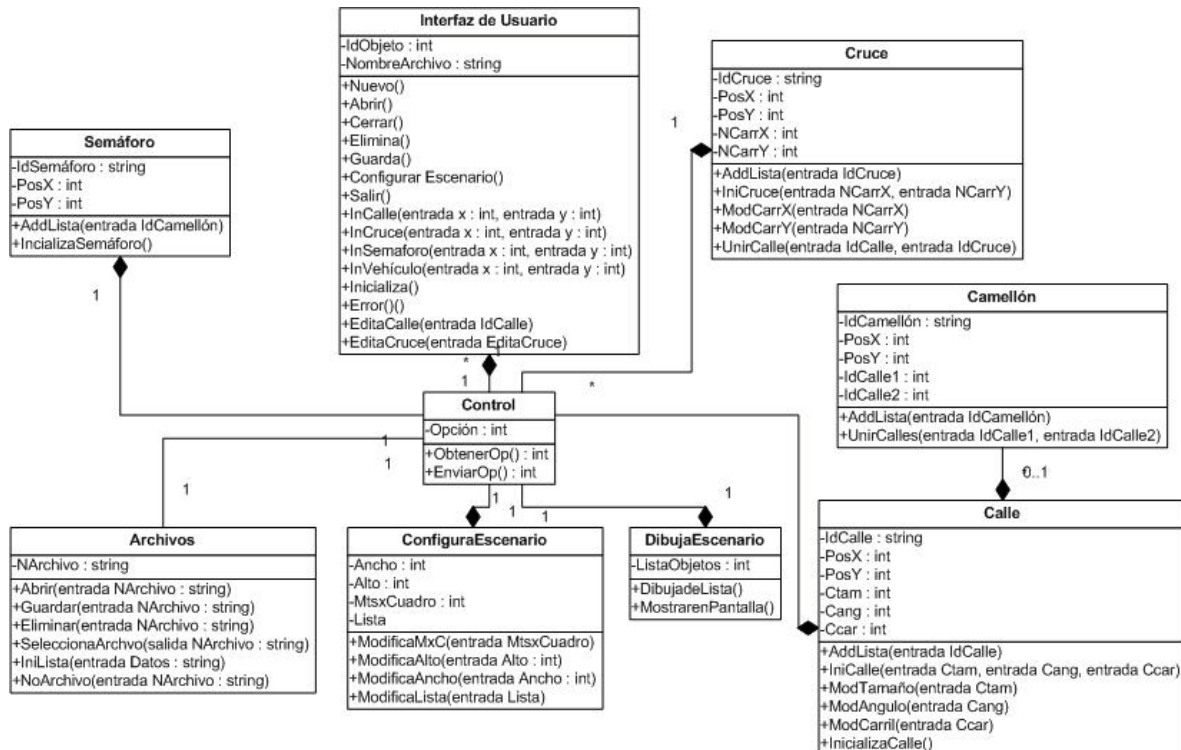


Figura 3.6 Diagrama de Clases del Editor de Escenario.

Las clases principales que manejan las entidades de tráfico son **calle** con las siguientes características:

Atributos:

IdCalle: Identifica a la calle dentro del escenario.

PosX: Posición X en el escenario.  
PosY: Posición Y en el escenario.  
Ctam: Tamaño de la calle, cada bloque de la calle representan 7mts.  
Cang: Ángulo de la calle.  
Ccar: Número de la carriles que tiene la calle.

**Métodos**

AddLista: Agrega un nuevo elemento de tráfico a la lista de objetos.  
IniCalle: Inicializa las principales características de la calle.  
ModTamaño: Modifica el tamaño de la calle en el escenario.  
ModAngulo: Modifica el ángulo de la calle en el escenario.  
ModCarril: Modifica el número de carriles en el escenario.

**Cruce:**

**Atributos:**

IdCruce: Identifica al cruce dentro del escenario.  
PosX: Posición X en el escenario.  
PosY: Posición Y en el escenario.  
NCarrX: Número de carriles en el eje X del cruce.  
NCarrY: Número de carriles en el eje Y del cruce.

**Métodos**

AddLista: Agrega un nuevo elemento de tráfico a la lista de objetos.  
IniCruce: Inicializa las principales características del cruce.  
ModCarrilX: Modifica el número de carriles en el eje X del cruce.  
ModCarrilY: Modifica el número de carriles en el eje Y del cruce.  
UnirCalle: Une una calle a un eje del cruce.

**Camellón:**

**Atributos:**

IdCruce: Identifica al cruce dentro del escenario.  
PosX: Posición X en el escenario.  
PosY: Posición Y en el escenario.  
IdCalle1: Identificador de la calle 1.  
IdCalle2: Identificador de la calle 2.

**Métodos**

AddLista: Agrega un nuevo elemento de tráfico a la lista de objetos.  
UnirCalles: Une dos calles independientes.

Una de las principales características del sistema es la utilización de agentes, que en este caso representa a la entidad de tráfico un automóvil, las tres principales características que tienen en común todos los agentes son:

- **Identificador:** Esta característica única identifica a cada agente en un sistema multi-agente.
- **Rol:** Un rol define el comportamiento de un agente en la sociedad. Los agentes pueden tener roles múltiples en el sistema multiagente ó pueden cambiar de un rol a otro durante la ejecución del sistema multiagente.
- **Organización:** Los agentes envueltos en sistemas multiagentes pertenecen a una o más organizaciones.

La capacidad en los sistemas multiagente describen que puede hacer un agente y bajo qué condiciones:

- **Entrada:** Esta parte de la representación de la capacidad especifica los objetos que un agente puede poseer, esta capacidad es recibida como entrada dentro del agente.
- **Salida:** Esta parte de la representación de la capacidad especifica los objetos que serán las salidas que esta capacidad genera.
- **Condiciones de entrada:** Esta parte de la representación de la capacidad especifica las condiciones con que deben ser recibidas las entradas, dependiendo de las mismas continuará con los valores adquiridos o serán modificados para su procesamiento.
- **Condiciones de salida:** Esta parte de la representación de la capacidad especifica las condiciones con que deben contar las variables de salida.

El diagrama de clases del editor de escenario representado en la figura 3.5, muestra el diagrama de clases AUMML de la representación del agente automóvil, el identificador que es el nombre genérico del agente “Automóvil”, los roles que el agente automóvil puede tomar “coche”, “microbús”, “camión” y la organización que en este caso es una sola “simulación”.

El diagrama de clases del Editor de Diseño que se muestra en la figura 3.6 utiliza algunas clases que se utilizaron en el diagrama anterior, la única diferencia entre los diagramas de las figura 3.7 y 3.8 es la manera en que la interfaz de usuario accede a los métodos de inicialización de las entidades del tráfico vehicular.

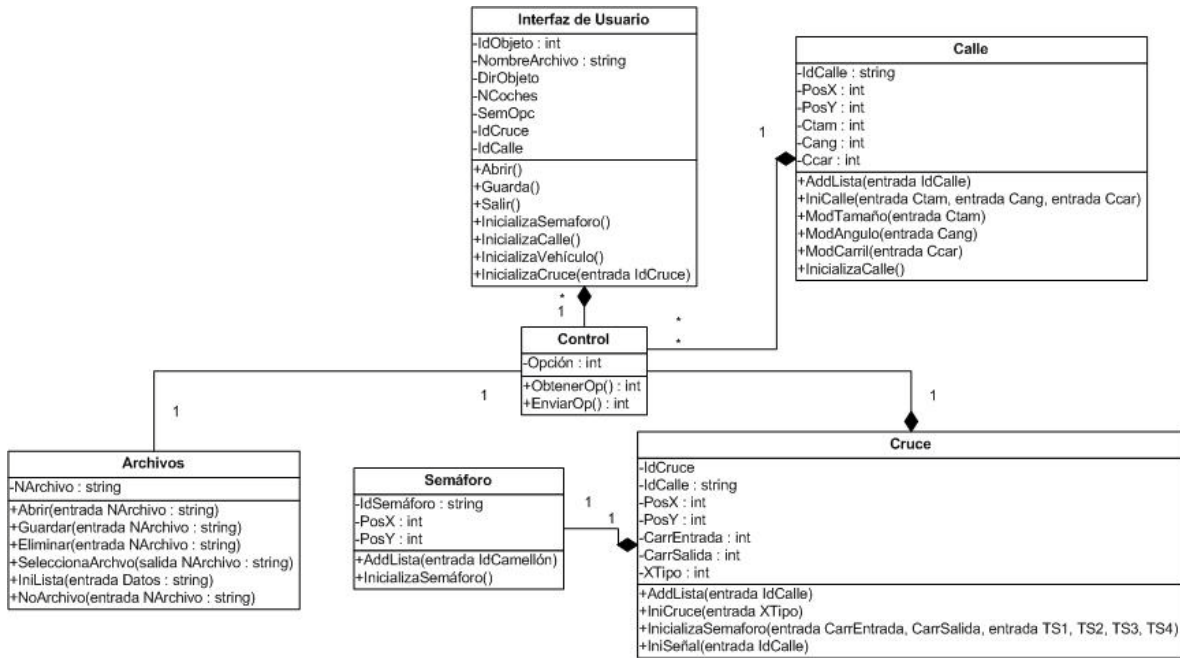


Figura 3.7 Diagrama de Clases del Editor de Diseño.

El diagrama de clases de la simulación representa los principales procesos que tiene que llevar a cabo la Simulación, se realiza la inicialización de los tiempos de los semáforos y la cantidad de coches que saldrán de las calles generadoras. La interfaz nos permite iniciar la simulación a lo largo de un determinado tiempo y nos da la opción de detenerla.

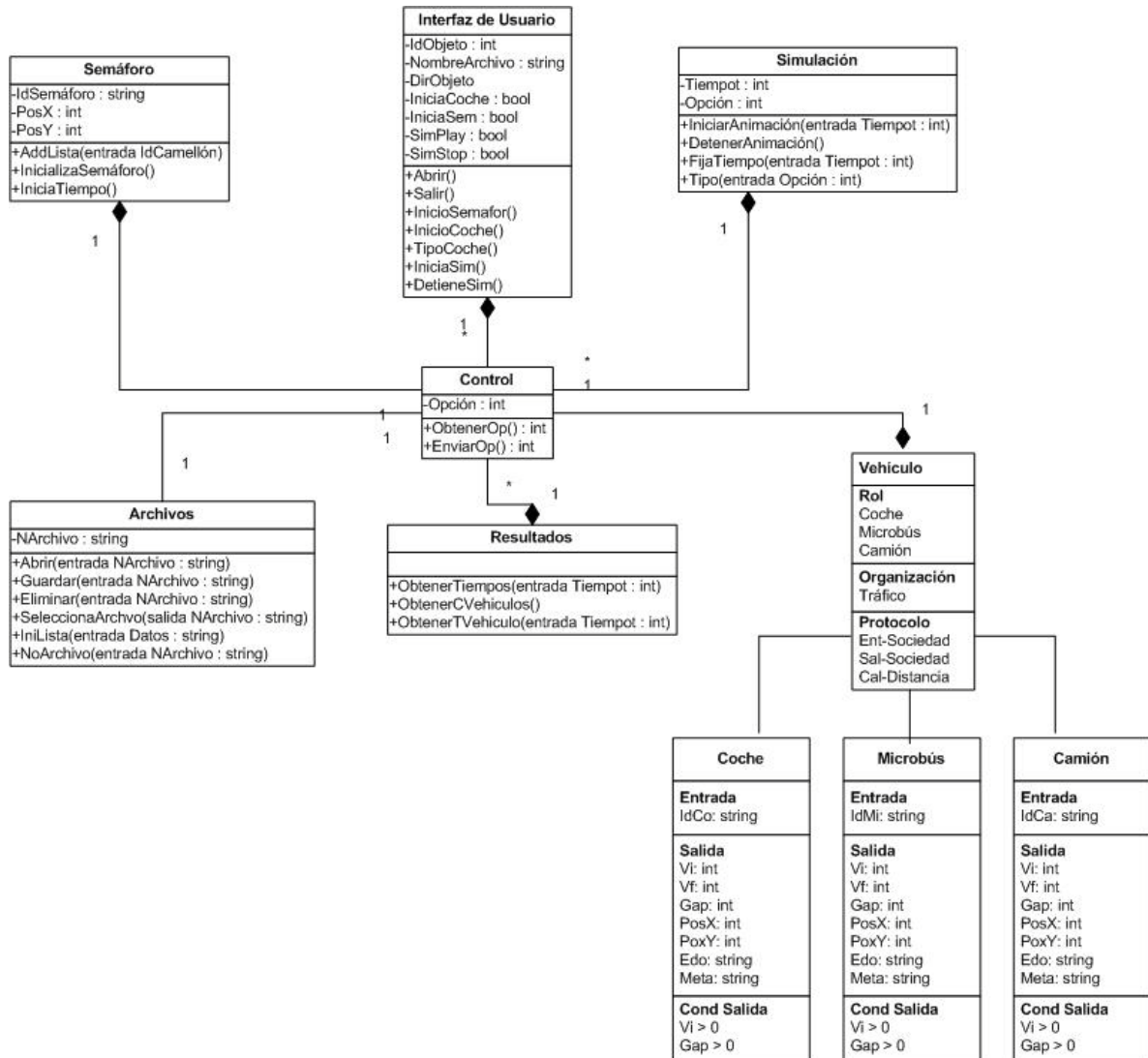


Figura 3.8 Diagrama de Clases de la Simulación.

### 3.3 Diseño

El propósito del diseño es crear una arquitectura para la naciente implementación, el diseño arquitectural sólo puede comenzar una vez que se tenga un entendimiento razonable de los requerimientos del sistema. El diseño, como el análisis, nunca termina realmente hasta que el sistema final es entregado. El diseño se enfoca en la estructura, estática y dinámica, su propósito principal es crear el 'esqueleto' concreto del sistema sobre el cual todo el resto de la implementación se basa.

Estas palabras definen claramente qué es el diseño, la creación de la estructura básica del sistema es la tarea clave, aunque también se buscan otras cosas, en particular patrones que simplifiquen el diseño y posibilidades de rehúso entre otras.

#### 3.3.1 Diagramas de Secuencia

Para mantener una maleabilidad en la construcción de escenarios, se realiza un editor en el cual se tiene la flexibilidad de poder realizar diseños de zonas ya construidas así como, de futuras planeaciones de zonas de la ciudad. Permite también seleccionar zonas específicas del escenario para analizar con más detalle lo que ocurre con las entidades de tráfico.

En la figura 3.9 se muestra un diagrama de secuencia realizado en UML, donde se puede ver la función de este editor y los principales elementos para la construcción de zonas los cuales son:

- Editor de Calles: se genera la generación de una calle con características predefinidas, realizando la edición de la misma se puede modelar los diferentes tipos de calles que existen (Calles principales, Calles Secundarias, Autopistas)
- Editor de Cruces: Sirve para vincular calles previamente definidas, se ajusta al tamaño de las mismas dependiendo de la cantidad de carriles que contengan.
- Editor de Edificios: Define edificios o zonas determinadas de una ciudad.

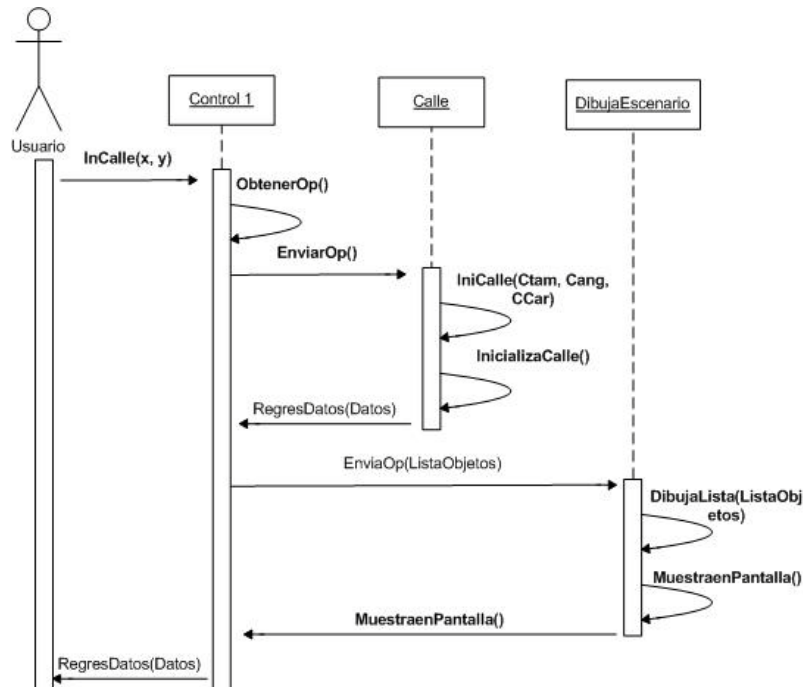


Figura 3.9 Diagrama de Clases Secuencia de la creación de una Calle en el Escenario. Las características principales son inicializadas de manera automática.

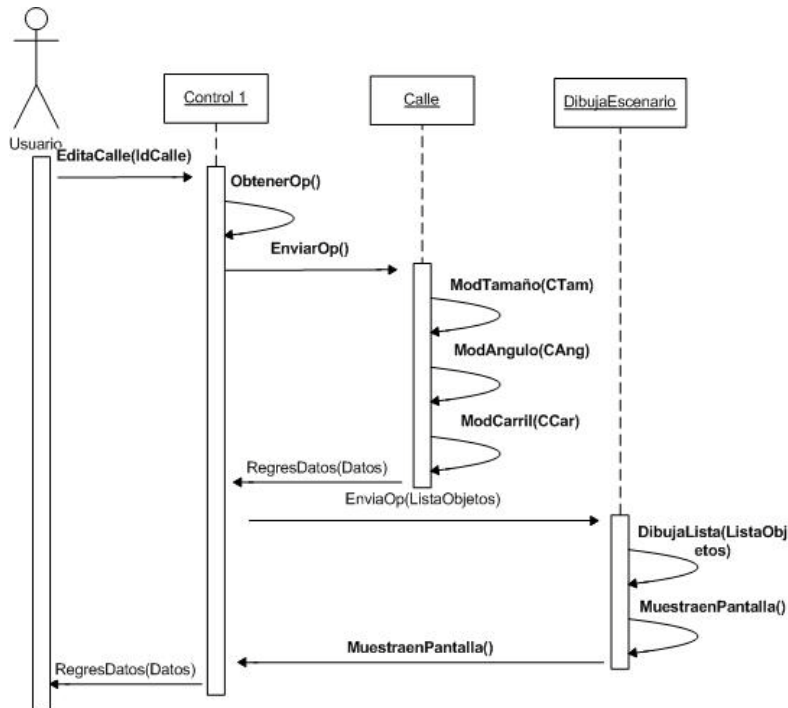
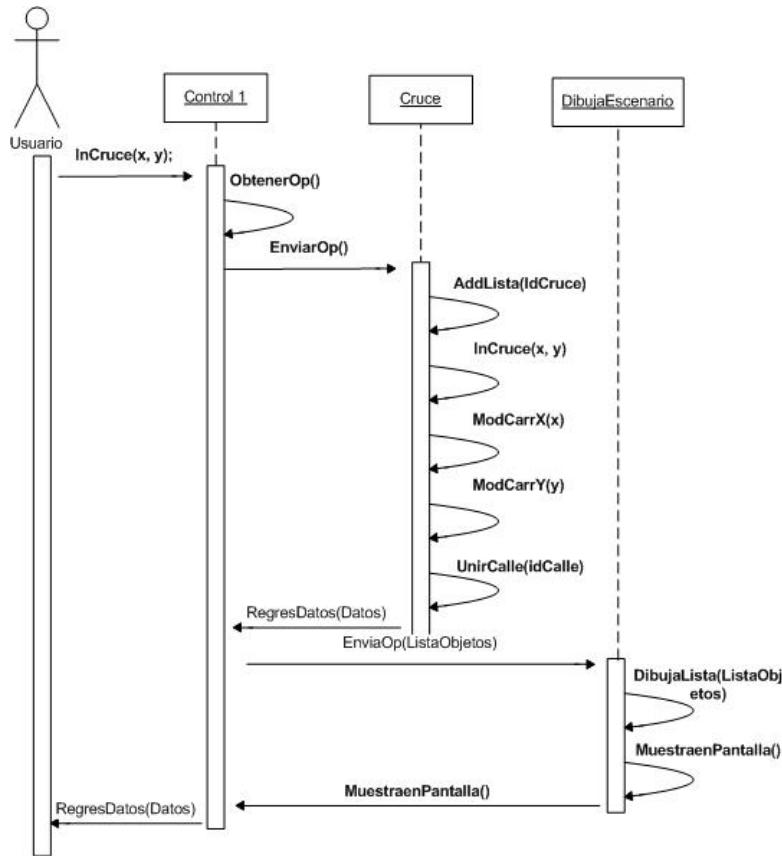


Figura 3.10 Diagrama de Secuencia de la edición de una Calle del Escenario.



**Figura 3.11** Diagrama de Clases Secuencia de la creación de un Cruce Vehicular en el Escenario. Las características principales son inicializadas de manera automática sin embargo es posible editarlas en el momento de la creación así como de asociar calles al cruce.

En el editor de escenario las principales características que el usuario puede considerar son las de inicializar y editar los tiempos de los semáforos en los cruces que componen el escenario. También es posible inicializar el número de vehículos que las calles generadoras pueden introducir al escenario en una determinada cantidad de tiempo. Otras de las características son las siguientes:

- Inicializar el tipo de cruce que contiene el escenario (semáforo ó señal de alto).
- Cantidad de Vehículos por cantidad de tiempo que producirá la calle generadora.
- Inicialización de los tiempos de los semáforos.
- Edición de la probabilidad de vuelta que tiene un vehículo dependiendo del carril en que se encuentre
- Manejo de Archivos (Abrir, Guardar)

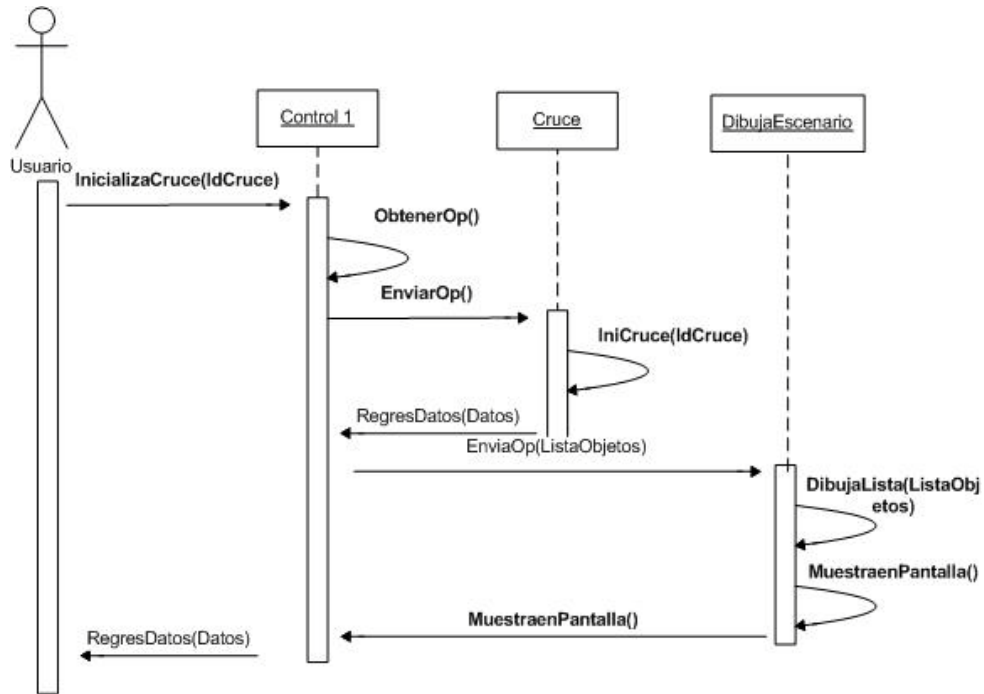


Figura 3.12 Diagrama de Clases Secuencia de la inicialización del tipo de un cruce ya sea con semáforo o sin semáforo.

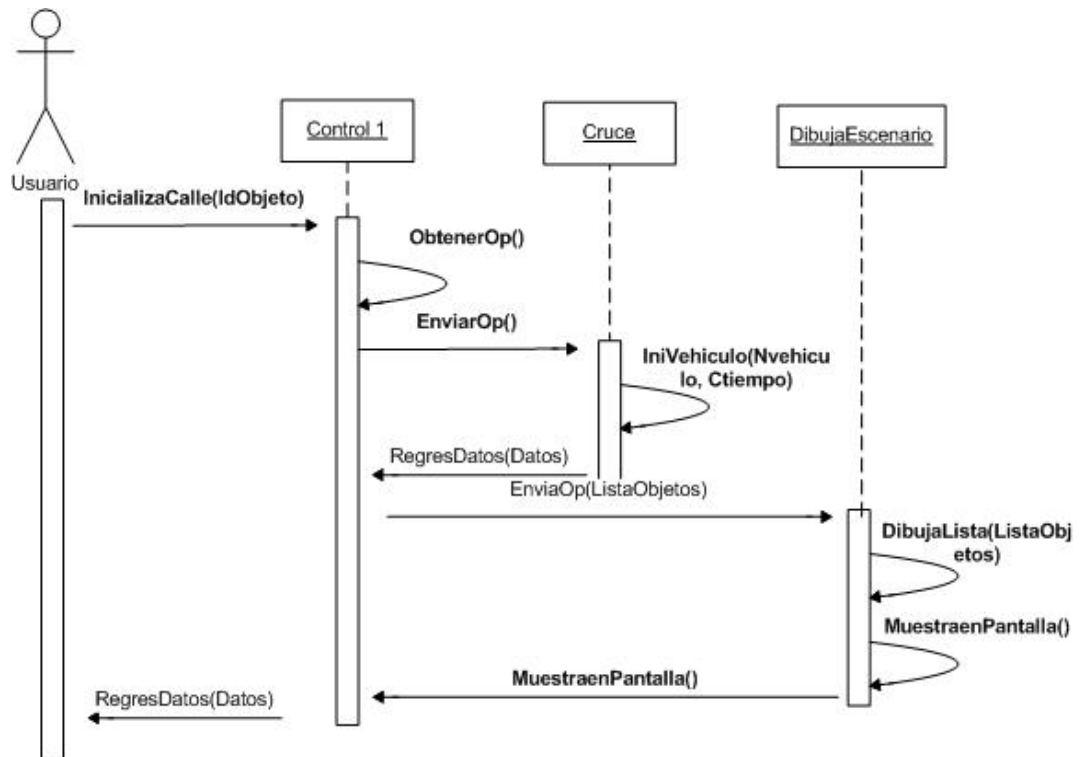


Figura 3.13 Diagrama de Clases Secuencia de la edición del número de vehículos que se producen por cantidad de tiempo.

## *Capítulo 4*

# **Implementación**

---

Como ya se ha mencionado anteriormente, el sistema esta dividido en tres partes dependiendo una de la anterior y puede ser representado en diferentes niveles de construcción, el editor de escenario se encarga de la construcción de la estructura del escenario y define el número y la forma que tienen las calles por las que circularán los vehículos, los cruces o intersecciones vehiculares dan sentido a la forma de las calles y la manera en que se vinculan, y los edificios representan las diferentes zonas poblacionales que se pueden distinguir en las diferentes áreas de una ciudad.

El editor de diseño define la lógica de la funcionalidad de las diferentes entidades de tráfico y se utiliza para definir los parámetros de inicio para la simulación, se lleva a cabo la inicialización de los semáforos así como la cantidad de vehículos con los que iniciará la simulación.

La simulación se lleva a cabo una vez que se han especificado las características propias del escenario en cuanto a forma y diseño, es la encargada de llevar a cabo la simulación de las entidades de tráfico, mostrar su representación en pantalla y de mostrar los resultados obtenidos.

A continuación se describen los pasos que se realizaron para la implementación de cada uno de ellos así como el software y el hardware empleado.

### **4.1 Hardware y Software utilizado para la elaboración del sistema**

Hardware:

Se trabajo en una Laptop Intel (R) core (TM)2 CPU T5200 a 1.6Ghz con 2Gb de memoria

Software:

Se trabajó en Microsoft XP, para la implementación se utilizó Delphi 2007 la elaboración del documento fue en Word 2007 y para los diagramas se empleó Visio 2007

## 4.2 Editor de Escenario.

Un editor de escenario es el módulo que permite la revisión y edición de segmentos de ciudad para poder reproducir las ya existentes o hacer nuevos diseños.

Las partes que contempla el editor son las siguientes:

- I. Manejo de Archivos: El diseño visual de la zona o segmento que se crea se maneja con archivos sobre los cuales se pueden realizar las siguientes operaciones:

*Nuevo:* Crea una nueva hoja en blanco para poder realizar un nuevo diseño.

*Abrir:* Se abre un escenario generado con anterioridad para su edición o visualización.

*Guardar:* Guarda el escenario realizado en el editor de escenario.

*Cerrar:* Cierra el editor de escenario.

- II. Entidades de tráfico del escenario: El área de trabajo está determinada por el usuario, donde se puede generar tres diferentes objetos que representan a entidades del tráfico, además a partir de estos objetos, se pueden combinar de manera aleatoria para generar objetos aún más complejos.

Las entidades de tráfico que maneja el editor de escenario son las siguientes:

*Calle:* Es el espacio físico en el cual un automóvil puede circular, se clasifican en calles locales, calles colectoras, calles principales y vías rápidas o autopistas. Tienen una dimensión, ángulo y número de carriles predefinidos, sin embargo, el usuario puede cambiarlos a su conveniencia.

*Cruce o intersección vehicular:* Es una entidad que se encarga de unir dos o más calles en un solo objeto, está comprendido de cuatro puntos que son los encargados de unir de manera lógica a las calles, inicialmente está diseñado para calles de dos carriles, el usuario puede modificarlo para adaptarse a un calle con diferente cantidad de carriles.

*Edificio:* Es un objeto creado a partir de la generación de una cuadra, puede representar una zona habitacional, comercial, etc. También tiene la propiedad de ser espacio vacío representando de esta manera a un lote baldío, parque, etc. Siendo alguna zona habitable es posible definir el número de personas y automóviles con el que cuenta esa cuadra, así como la calle de salida.

- III. Operaciones que se pueden realizar sobre los objetos del editor de escenario: son acciones que modifican de manera drástica los objetos de un escenario, desde crear una calle compuesta con dos de diferente sentido hasta crear una compleja red de calles, cruces y edificios. Las principales acciones son las siguientes:

*Crear:* Crea un nuevo objeto en la mitad del escenario.

*Mover:* Mueve cualquier objeto simple y compuesto por el escenario, solo se permite mover objetos complejos de menos de cinco objetos simples.

*Modificar:* Modifica las características principales de cada uno de los diferentes objetos. Las características cambian dependiendo del objeto seleccionado.

*Unir:* Vincula a uno o más objetos para crear objetos más complejos dando como resultado escenarios con un número indeterminado de entidades de tráfico.

La figura 4.1 muestra la ventana principal del editor de escenarios, y la tabla 4.1 muestra la descripción de cada una de las acciones que se pueden realizar con el editor.

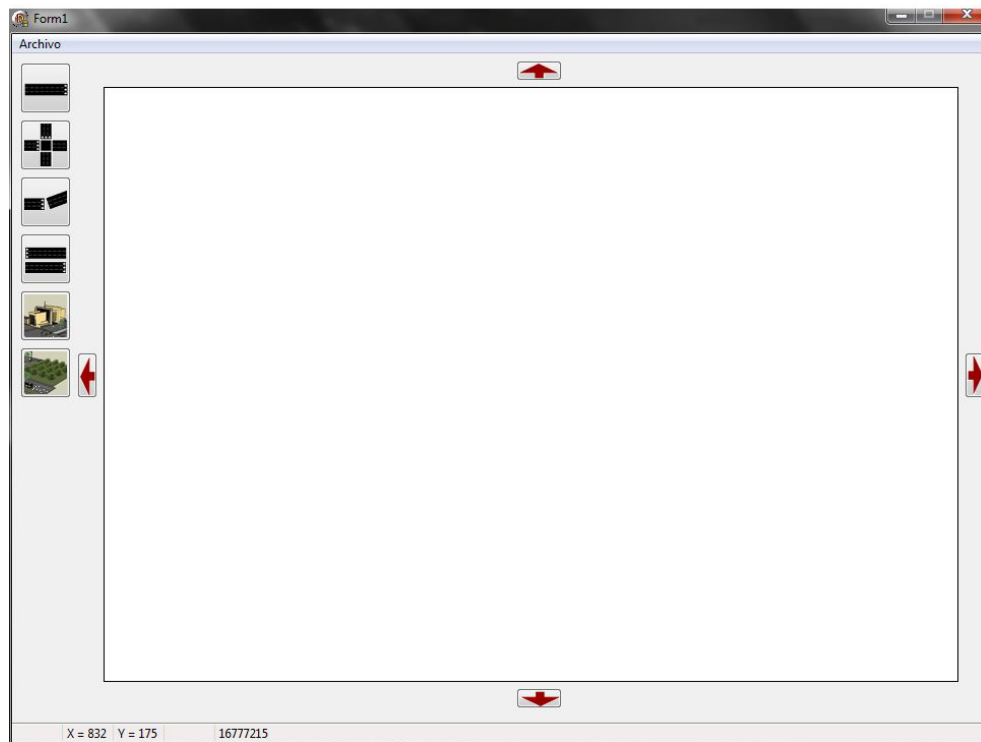









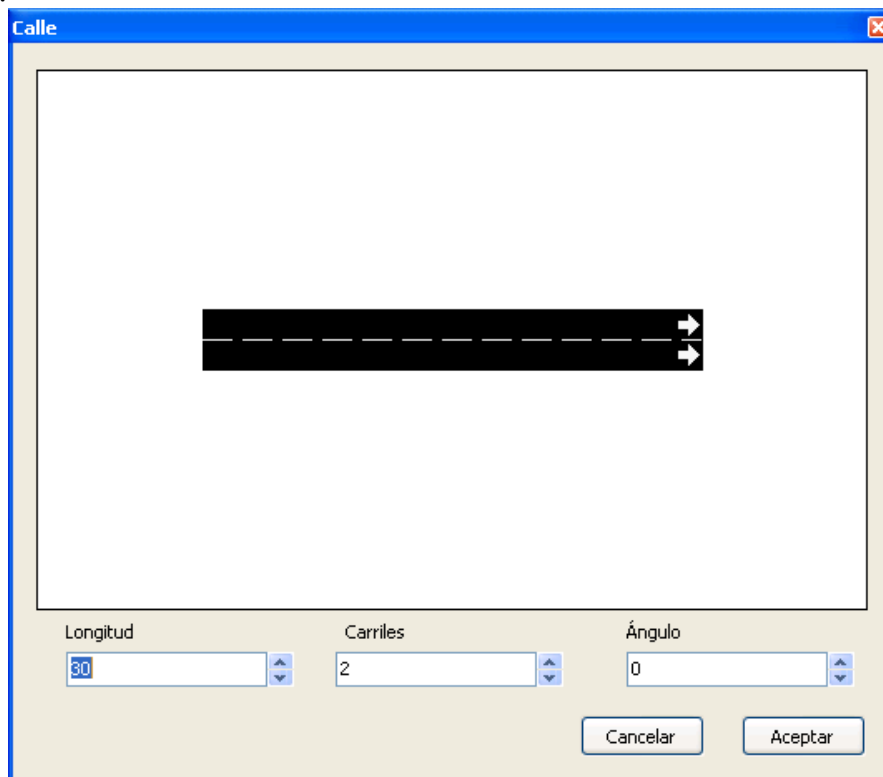
Figura 4.1 Pantalla principal del editor de escenario.

Botón	Acciones
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera un nuevo objeto “calle” en la mitad del escenario con una longitud de treinta metros, ángulo de cero grados y dos carriles.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera un nuevo “cruce” en la mitad del escenario con cuatro entradas vacías de dos carriles cada una.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se encarga de unir dos calles con ángulos iguales ó ángulos con una diferencia entre ellos no mayor a 90°.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se encarga de unir dos calles con ángulos opuestos. Es indispensable para crear calles de doble sentido.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera un edificio.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera un área deshabitada.</li> </ul>
Nuevo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crea una página en blanco.</li> </ul>
Abrir	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abre un escenario previamente guardado.</li> </ul>
Cerrar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cierra el escenario donde se está trabajando, si no se ha guardado el escenario se perderá.</li> </ul>
Guardar	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Guarda el escenario donde se está trabajando.</li> </ul>
Salir	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cierra la aplicación.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conjunto de botones que sirven para recorrer de manera libre el escenario según las necesidades del usuario.</li> </ul>

**Tabla 4.1** Muestra las diferentes acciones que realiza cada botón del editor de escenario.

La edición de los objetos y la unión de ellos no se realiza en la pantalla principal, sino en pantallas auxiliares lo que facilita la edición de los objetos sin afectar a los demás. A continuación se muestran dichas pantallas y las principales acciones que realizan sobre los objetos.



**Figura 4.2** Pantalla de edición de propiedades del objeto calle.

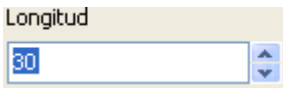
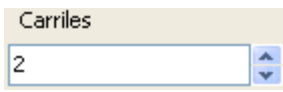

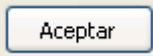
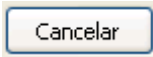
Botón	Acciones
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modifica el tamaño de la calle en unidades de 1 metro.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modifica la cantidad de carriles que tiene una calle.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modifica el ángulo de inclinación de una calle.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Guarda los cambios realizados y regresa a la ventana principal mostrando los cambios realizados.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regresa a la ventana principal sin realizar los cambios.</li> </ul>

Tabla 4.2 Muestra las diferentes acciones que realiza la ventana de edición de calles.

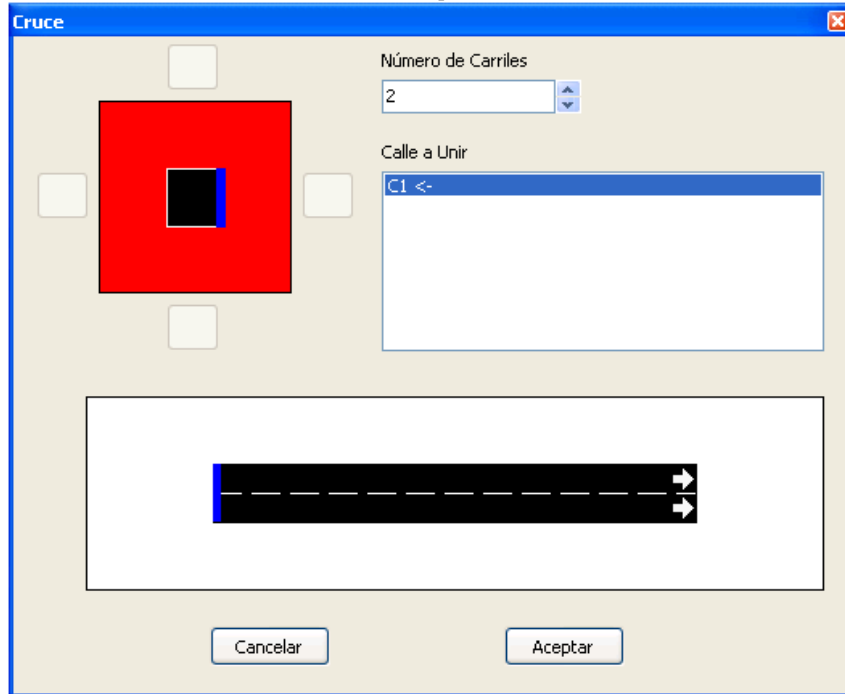


Figura 4.3 Pantalla de edición de propiedades del objeto cruce.

Botón	Acciones
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Define el número de carriles que tiene un extremo de la cuadra. Esto afecta al lado contrario a la misma</li> </ul>




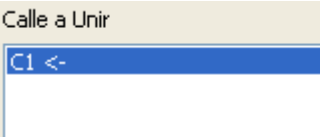

	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conjunto de botones que se encargan de seleccionar un extremo determinado de la cuadra con el fin de realizar cambios a la misma.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Indica de manera gráfica que extremo de la cuadra esta seleccionada para ser editada.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestra un listado de calles a los que se puede asociar dicho extremo de la cuadra y en qué extremo de la calle lo realizará.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Muestra que extremo de la calles es candidato a unirse al extremo de la cuadra.</li> </ul>

Tabla 4.3 Muestra las diferentes acciones que realiza la ventana de edición de cruces.

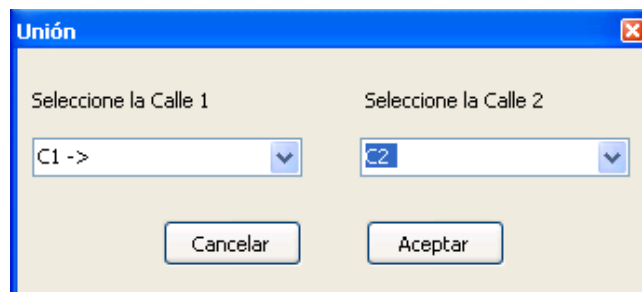
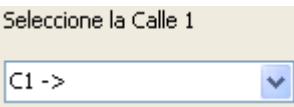
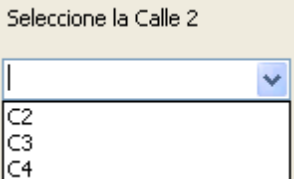


Figura 4.4 Pantalla que realiza la unión de dos calles.

Botón	Acciones
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selección de la primera calle que se va a unir. Se genera una lista de calles y el extremo que está disponible.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selección de la segunda calle que se va a unir. Se genera una lista de calles candidatas tomando en cuenta el extremo de la calle y el ángulo de ambas que no debe tener una diferencia mayor a 90° entre ellas.</li> </ul>


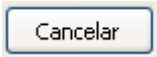
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Guarda los cambios realizados y regresa a la ventana principal mostrando los cambios realizados.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regresa a la ventana principal sin realizar los cambios.</li> </ul>

Tabla 4.4 Muestra las diferentes acciones que realiza la ventana de unión.

### 4.3 Editor de Diseño.

El editor de diseño nos permite dar características iniciales al escenario para poder realizar la simulación. Las funciones principales son las siguientes:

- Archivos: manipulación de archivos que contiene escenarios previamente guardados en el editor de escenarios.
- Cruce o intersección vehicular: Seleccionar tipo de cruce (semáforo ó señal de alto).
- Preferencia: Inicialización de preferencia de paso para calles que están ligadas a un cruce con señal de alto.
- Calles: Cualquier objeto donde circularán los vehículos.
- Carriles: Se dan las opciones de probabilidad para continuar en una determinada trayectoria (probabilidad de vuelta).
- Semáforos: Inicialización de tiempos para los semáforos.

#### 4.3.1 Archivos.

Los archivos que se utilizan en este módulo son escenarios realizados con anterioridad. Las funciones que pueden realizarse son:

*Abrir*: Abre un escenario realizado con anterioridad para editar el diseño, es un archivo con extensión “edt”.

*Guardar:* Guarda el diseño realizado sobre el escenario. Cabe señalar que guarda los cambios realizados en el mismo archivo del escenario, esto no afecta futuras ediciones al archivo en el editor de escenario.

### **4.3.2 Cruce o intersección vehicular y preferencia**

Con el fin de modelar el mayor número de calles en el sistema dada su clasificación, es posible elegir un cruce o intersección vehicular que contenga un semáforo o una señalización dando esta última la posibilidad de modelar “calles locales”, es decir, calles que den acceso a zonas habitacionales, comerciales o industriales, y que están conectadas a las calles principales y vías rápidas.

En las figuras 4.5 y 4.6 es posible ver las diferentes pantallas de selección de cruce o intersección vehicular, la figura 4.5 muestra un cruce formado por dos calles de entrada y dos calles de salida. En la figura 4.6 muestra un cruce formado por dos calles de entrada y dos calles de salida, el número de calles determina el número de fases que forman al ciclo de semáforo y la posibilidad de editar los tiempos del mismo. Cabe señalar que si se desea modificar el tipo de cruce o intersección vehicular, basta con modificar las características ya sea de la señalización o de semáforo, de esta manera se conserva la última modificación realizada.

La preferencia de paso es la prerrogativa de un peatón o conductor de un vehículo de proseguir su marcha, es decir, cuando un vehículo circula por una calle tendrá la preferencia de paso sobre otro vehículo en una intersección vehicular, manteniendo un orden en la circulación, se da para que un vehículo no esté esperando de manera indefinida circular hacia otra calle de la intersección vehicular.

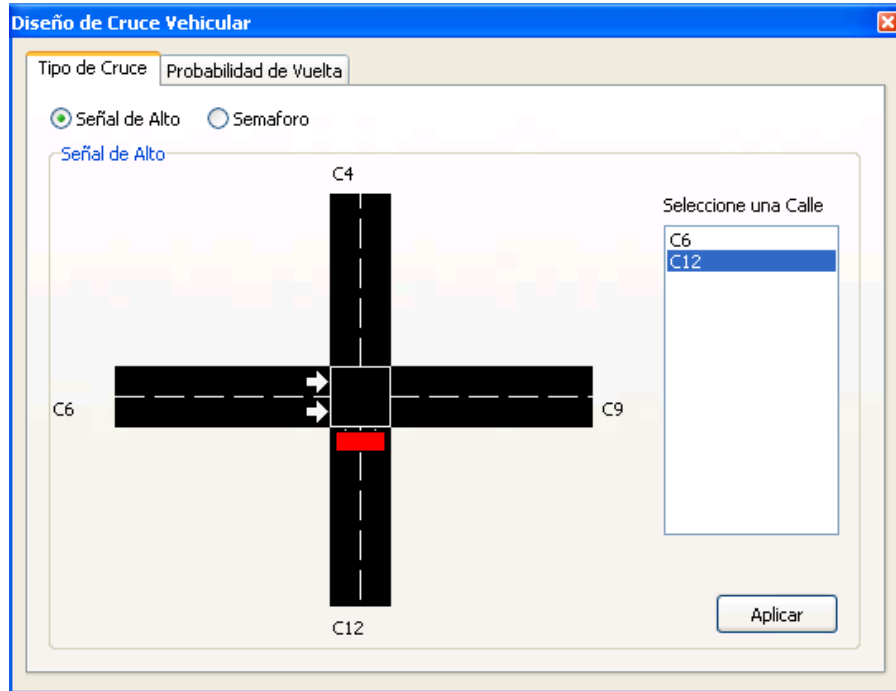


Figura 4.5 Pantalla de selección de cruce o intersección vehicular con señalización de alto.

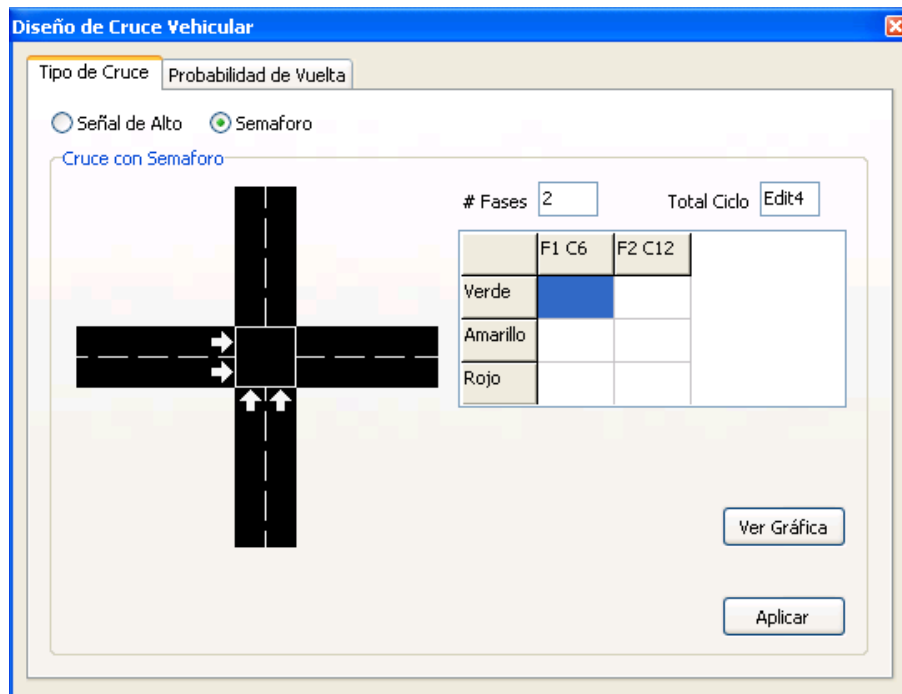


Figura 4.6 Pantalla de selección de cruce o intersección vehicular con semáforo.

La figura 4.5 muestra como el editor de diseño realiza la selección de preferencia de paso sobre un cruce o intersección vehicular, destacando las funciones principales.

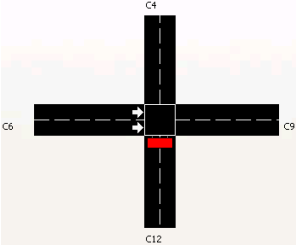
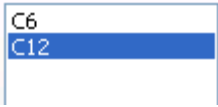

Botón	Acciones
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Muestra un cruce vehicular previamente seleccionado y la ubicación de la señal de alto dando la preferencia al otro carril de entrada.</li> </ul>
<p>Seleccione una Calle</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Muestra la lista de calles de entrada que están vinculadas a la intersección vehicular. Al momento de seleccionar una de estas calles el cambio se ve reflejado en la imagen de la intersección.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Guarda los cambios realizados y regresa a la ventana principal mostrando los cambios realizados.</li> </ul>

Tabla 4.5 Muestra las diferentes acciones que realiza la ventana de selección de tipo de cruces y cruce con señalización.

### 4.3.3 Calles

Es uno de los elementos más importantes del editor ya que es el elemento donde circulan los vehículos. Cuenta con características que definen el comportamiento de los vehículos durante la simulación debido a que de ellas se toma la velocidad tope o velocidad máxima a la que pueden circular los vehículos, además, se encargan de llevar una relación de la cantidad de vehículos que circulan en ese momento por la calle y la distancia que hay entre ellos.

Uno de los aspectos más importantes es la generación de vehículos. Dado que los vehículos no aparecen de forma aleatoria en el escenario es necesario establecer las condiciones necesarias para la generación de ellos. Hay dos formas en las que un vehículo puede aparecer en el escenario, la primera es a través de objetos edificio, los cuales almacenan una cantidad finita de ellos y se incorporan al flujo vehicular a través de un objeto calles que funciona de entrada y salida para los vehículos, la segunda es mediante objetos llamados “calle generadora” que son casos particulares de una calle normal, son aquellas que no tienen ningún otro objeto asociado a estos objetos por la entrada o inicio del objeto calle. En el editor de diseño existen tres casos particulares del objeto calle:

- Calle Generadora. Una calle generadora puede producir una cantidad fija de vehículos en un determinado intervalo de tiempo en la simulación, se identifican en el escenario por medio del color verde que toma al momento de colocar el cursor en ella:

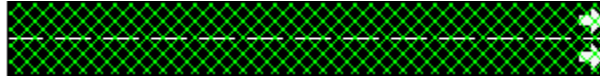


Figura 4.7 Calle Generadora.

- Calle Normal: Tiene las propiedades de cualquier objeto calle. Se identifica en el escenario de la siguiente manera:

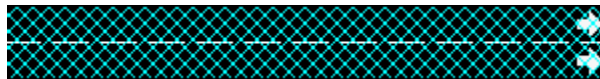


Figura 4.8 Calle Normal.

- Calle Eliminadora: Se encarga de eliminar los vehículos de la simulación, es la terminación del escenario una vez que un vehículo llega a esta calle deja de existir. Este tipo de calle evita que el escenario se sature por el número de vehículos que circulan por ella. Se identifica en el escenario de la siguiente manera:



Figura 4.9 Calle Eliminadora.

- Calle Mixta: Es aquella que es generadora y eliminadora a la vez: Se identifica en el escenario de la siguiente manera:

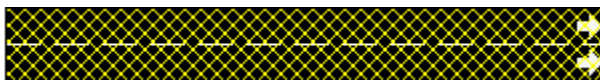


Figura 4.10 Calle Mixta.

En las figuras 4.11 se pueden apreciar pantallas de las propiedades de los diferentes tipos de calles. En la tabla 4.6 se muestran una descripción de los elementos de la ventana de propiedades así como las acciones que se pueden realizar. Los cambios efectuados sobre los campos se guardan de manera automática, sin embargo, los cambios realizados en el editor de diseño se verán reflejados hasta la simulación.

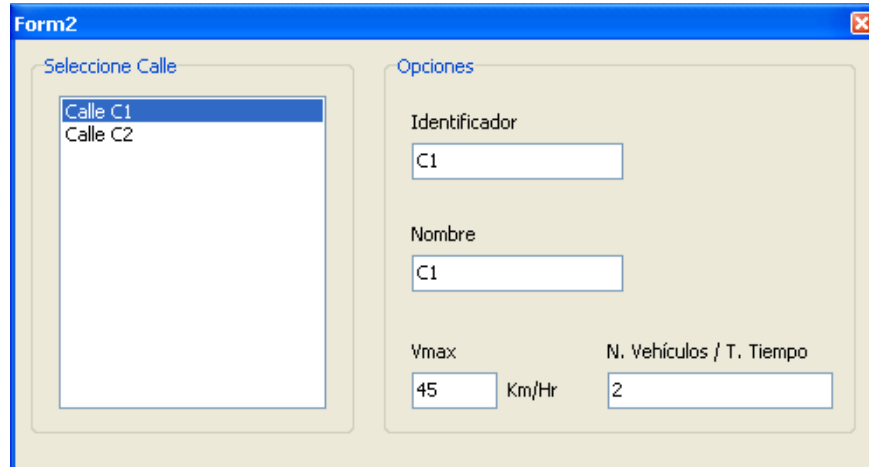


Figura 4.11 Propiedades de los objetos calle en el editor de diseño.


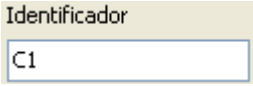
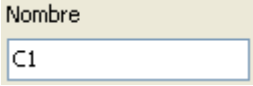
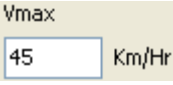
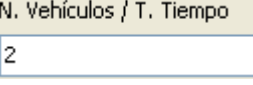
Botón	Acciones
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Muestra un listado de todas las calles que conforman el escenario. Se editan las propiedades de la calle seleccionada en el momento de elegirla de la lista sin la necesidad de hacerlo desde la pantalla principal del editor.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Es el elemento que distingue a cada calle del resto. No es posible modificar este elemento.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Es el nombre asignado a cada calle.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Es la velocidad máxima que puede tomar un vehículo en la simulación dependiendo del número de vehículos y la distancia que exista entre ellos.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Esta propiedad es única de las calles generadoras y se encarga de inicializar el número de vehículos por unidad de tiempo que aparecen en el escenario.</li> </ul>

Tabla 4.6 Muestra las diferentes acciones que realiza la ventana de propiedades de una calle

### 4.3.4 Carriles: Probabilidad de Vuelta.

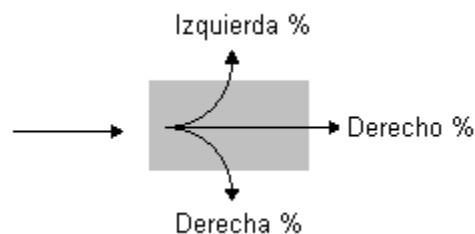
Dado que un vehículo circula sobre el carril de una calle es necesario establecer la probabilidad del vehículo para dar una vuelta, en este caso los carriles tienen las probabilidades del flujo vehicular, se necesita saber si es permitido o no el avance a las siguientes calles dependiendo del sentido y existencia de los carriles siguientes.

Se propone un método para localizar los carriles a los cuales tiene permitido el acceso y la probabilidad de que escoja ese camino.

Tomando en cuenta que ya se hizo la unión de calles pertenecientes a cada esquina desde el editor de escenario de manera implícita, se tiene que realizar un análisis para reordenar los carriles pertenecientes en cada punto cardinal del cruce. Ya que estos pueden no haber sido creados en el orden en que se fueron uniendo al cruce, el reordenamiento está basado en la información almacenada en el cruce de las calles que están vinculadas dependiendo de la esquina en que este asociado. Así se asegura que el orden de posición de los carriles en el cruce es igual al del escenario.

Posteriormente se lleva a cabo un análisis en cada cruce y para cada carril. Dado el carril y su sentido se verificarán las otras tres esquinas del cruce para saber si existe carril que contiene la circulación vehicular, esto dependerá de la existencia y sentido de los otros carriles.

Cualquier carril tiene tres opciones máximas para unirse con las otras cuerdas, seguir la misma dirección, dar vuelta a la izquierda o dar vuelta en la derecha. En la figura 4.12 se muestran las diferentes opciones de vuelta que tiene una calle.



**Figura 4.12** Probabilidad de vuelta de un carril a llegar a un cruce o intersección vehicular.

A continuación se explicará cómo es que se verifica la existencia de carriles para la probabilidad de vuelta. En las figuras 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 se muestra visualmente esta operación sólo se explica la figura 4.12, las demás son similares, la figura contempla dos partes en la parte superior se encuentra el cruce X1 y en sus cuatro esquinas están asociadas

calles cada carril con una probabilidad de vuelta diferente. En esta figura se analizan los carriles que entran al cruce vehicular por la parte de la izquierda y sólo los carriles que entran en este cruce, en los otros extremos del cruce solamente nos interesan los carriles que salen del cruce ya que son los únicos a los cuales se podrá seguir circulando en caso de venir de la izquierda.

Observando los carriles que entran de la izquierda esto solo podrán seguir derecho si existe un carril en la misma posición en la parte derecha con el mismo sentido, en caso de que no sea así no se podrá tomar esta opción.

Para dar vuelta a la derecha si estamos en el carril C1-1 solamente podrá continuar si existe carril C2-1 ya que es su única opción, si estamos en el carril C1-2 la primera opción es el carril C2-2 en caso de que no exista o su sentido sea inverso entonces se tomará la primera opción es decir, el carril C2-1, y por último el carril C1-3 continuará si existe en primera opción el carril C3-3 en caso de no existir será el carril C3-2 en caso de no existir su siguiente opción es el carril C3-1.

Para dar vuelta a la izquierda será de manera similar solo se selecciona de manera correcta el carril dependiendo de la calle, si partimos del carril C1-3 que está a la izquierda y se desea dar vuelta a la izquierda su única opción es el carril C3-3 considerando las condicionantes antes mencionadas, considerando el carril C1-2 su primera opción es C3-2 y su segunda opción C3-3, por último tomando como referencia el carril C1-1, la primera opción es C3-1, su segunda opción C3-2 y su tercer opción C3-3.

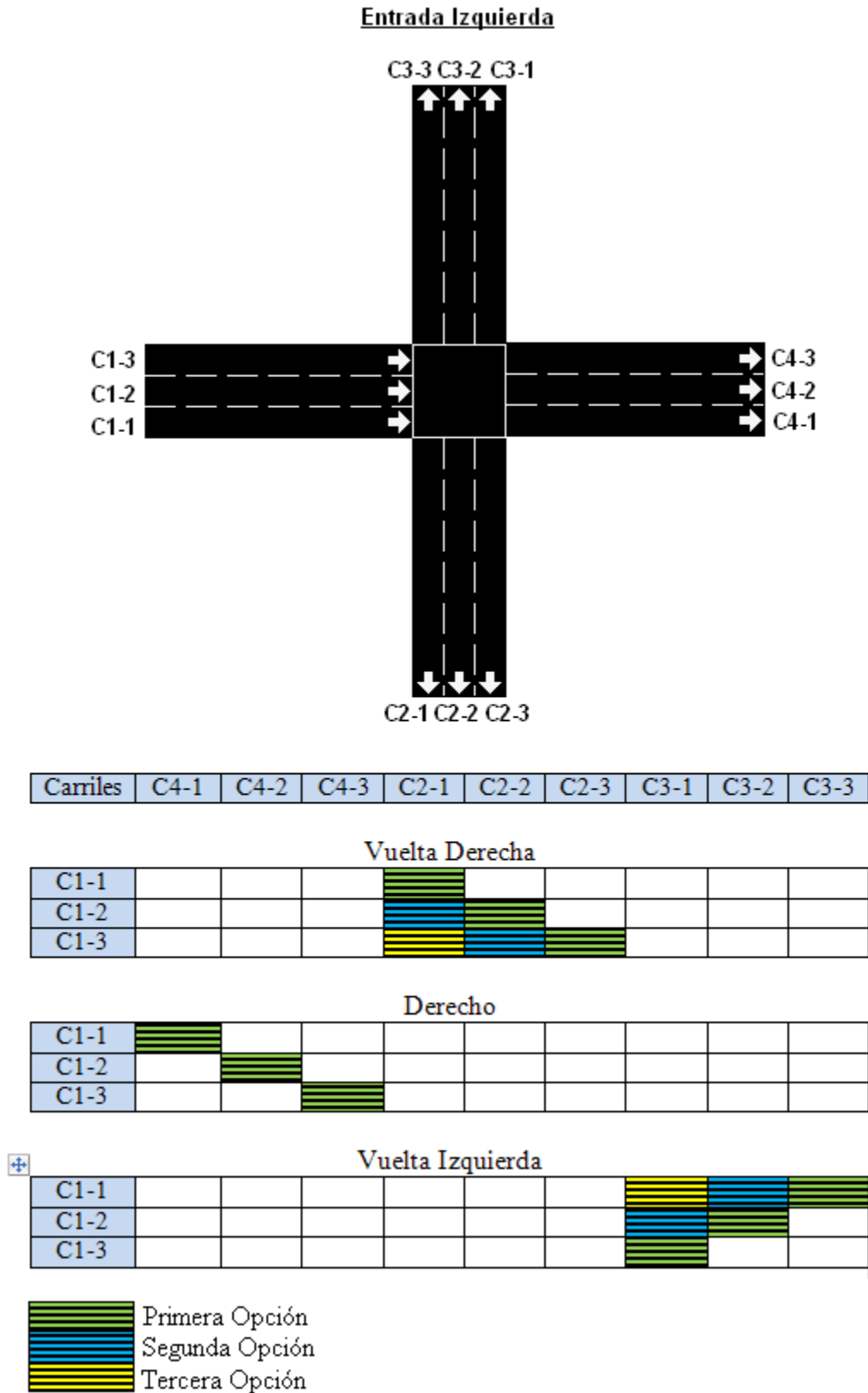
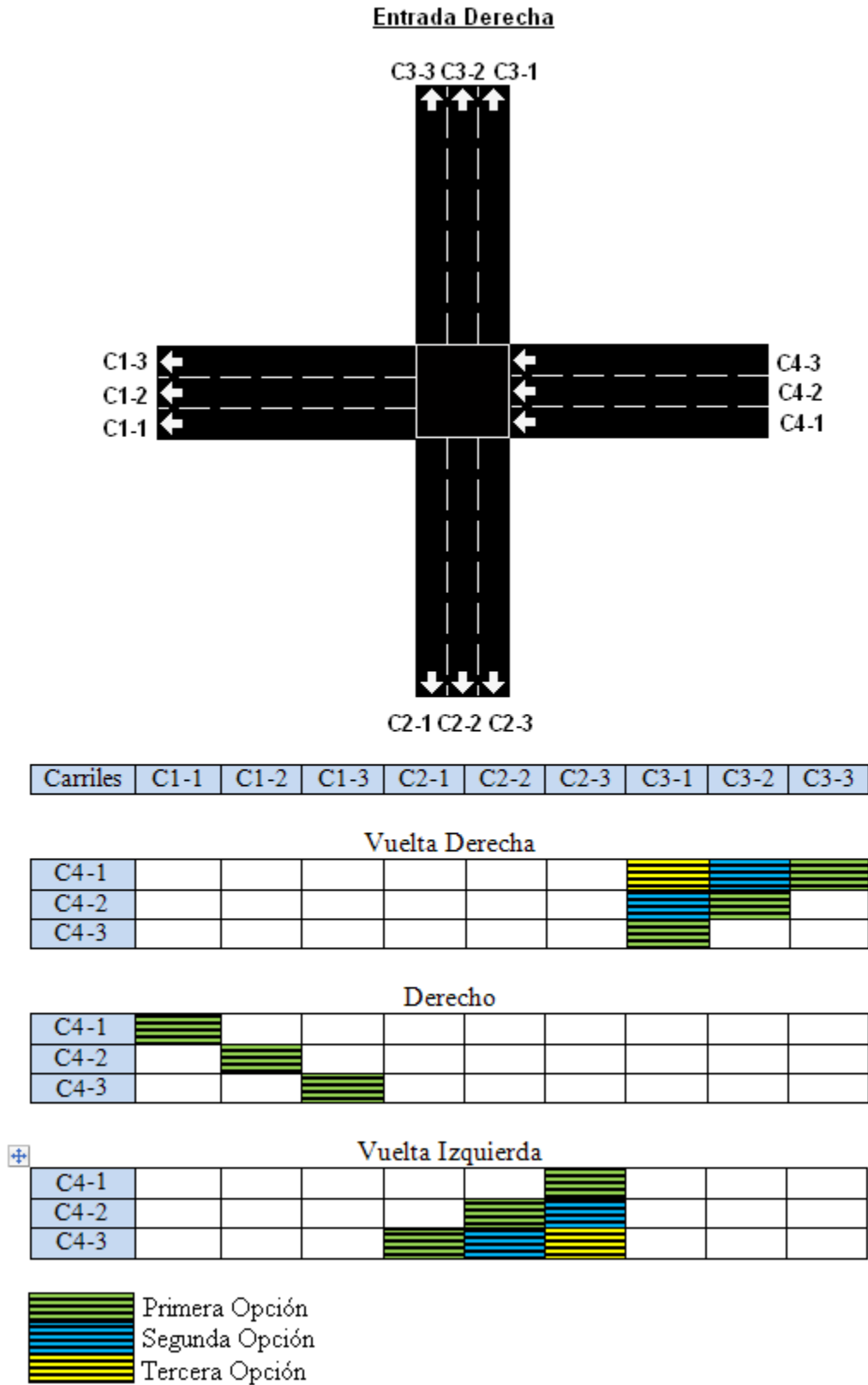


Figura 4.13 Probabilidad de vuelta para los carriles de entrada por la izquierda.



**Figura 4.14** Probabilidad de vuelta para los carriles de entrada por la derecha.

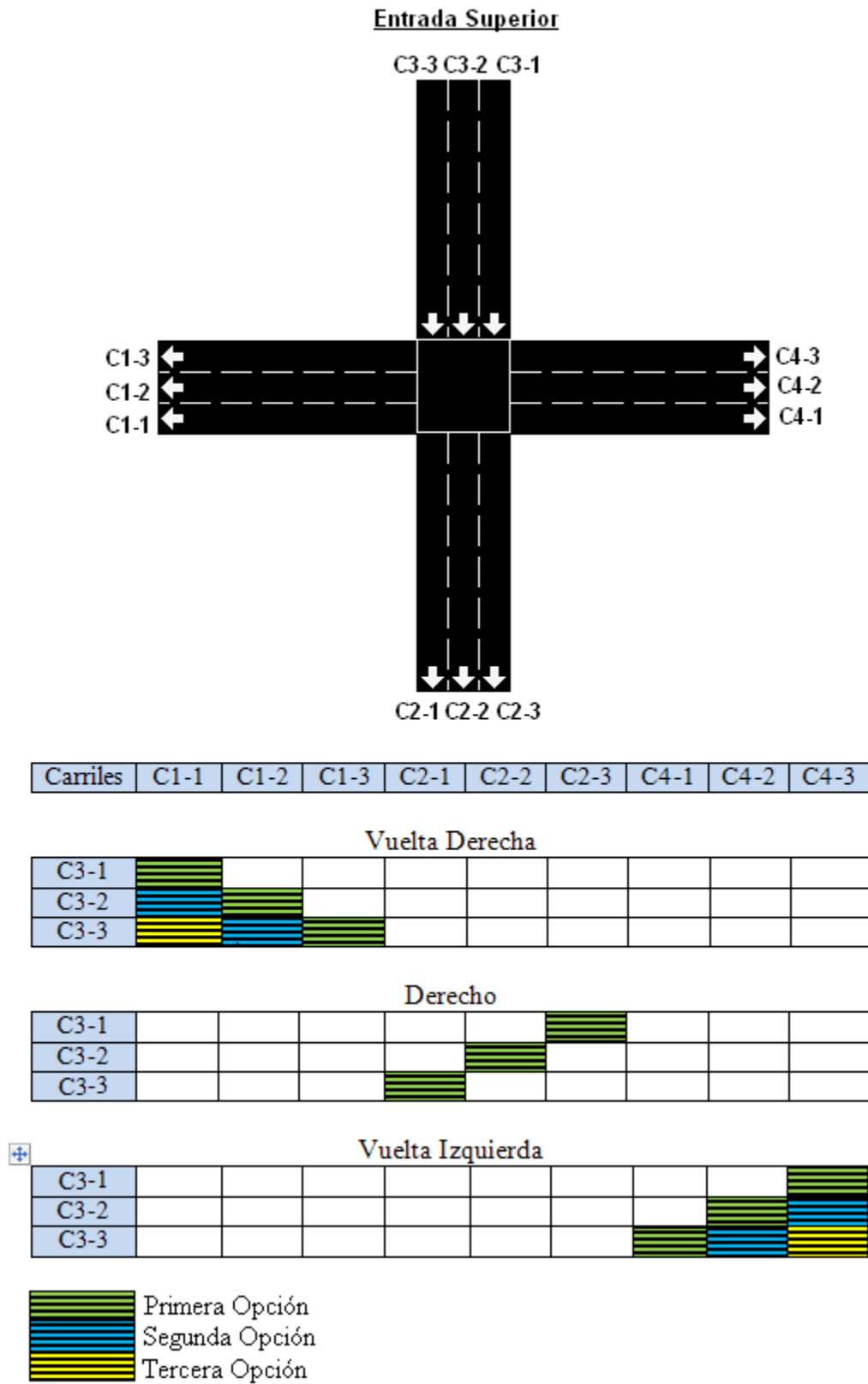


Figura 4.15 Probabilidad de vuelta para los carriles de entrada por la parte superior.

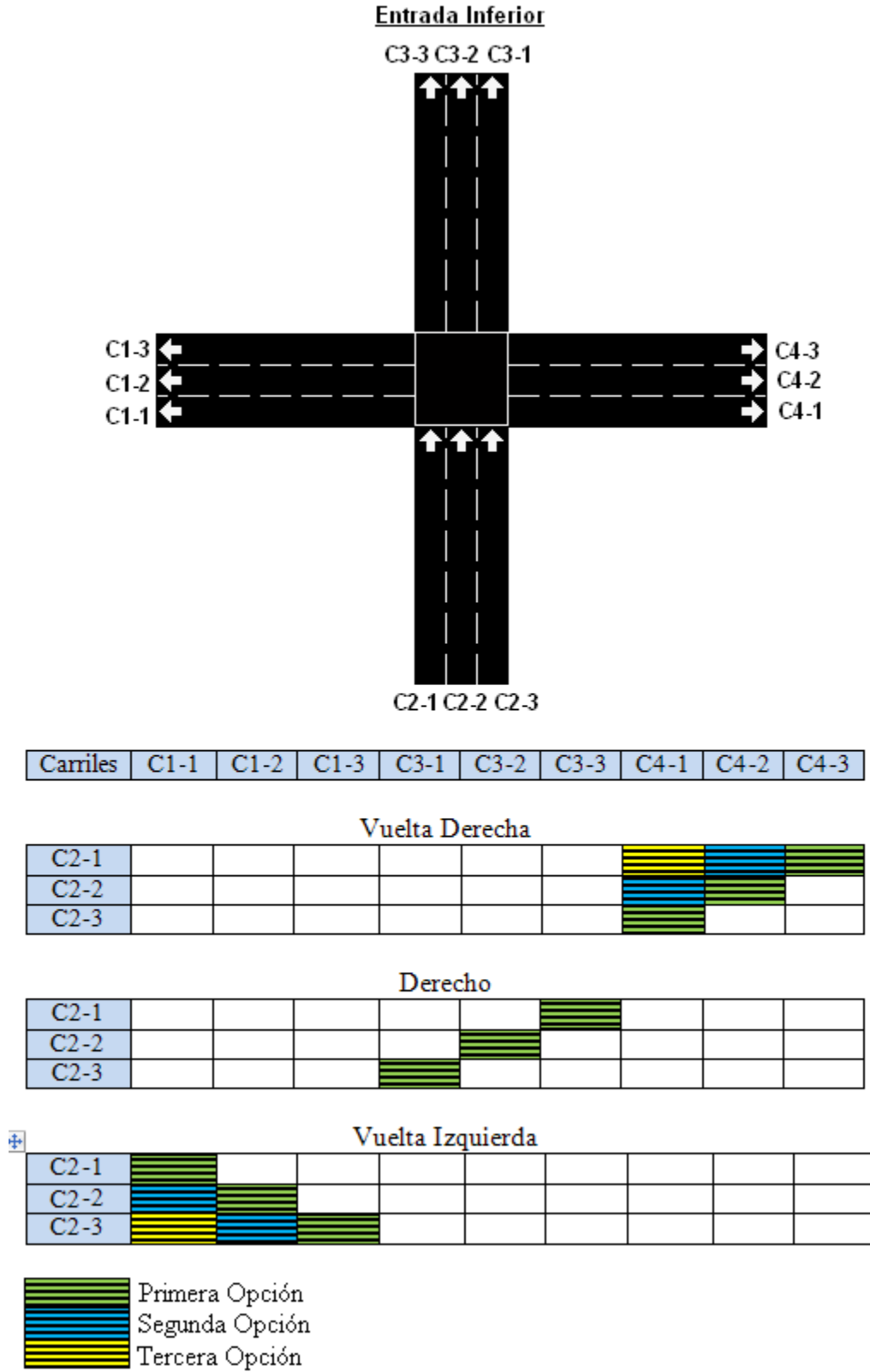


Figura 4.16 Probabilidad de vuelta para los carriles de entrada por la parte inferior.

### 4.3.5 Semáforos.

Debido a que en el editor de escenario se permite poner a cada calle un semáforo independientemente de la posición en donde se encuentre. Es necesario asociar y sincronizar el semáforo con los semáforos de las calles vinculadas al cruce o intersección vehicular. El problema en este caso es saber que semáforos pertenecen al cruce para determinar las secuencias y no provocar tráfico o accidentes.

Los semáforos que se encuentran localizados en la misma esquina tienen que estar sincronizados, para esto el usuario sabe qué grupo de semáforos pertenecen a cada esquina, esto porque los semáforos están asociados a las calles y en el cruce o intersección vehicular conoce las calles que se vinculan a él.

Los semáforos se utilizan donde los patrones de tránsito son relativamente estables, o en las que las variaciones de intensidad de la circulación se pueden adaptar a un programa previsto, sin ocasionar demoras o congestiones excesivas. Sus principales ventajas son:

- Facilitan la coordinación con semáforos adyacentes con mucha precisión.
- No dependen de factores externos, por lo que no se afectan desfavorablemente cuando se impide la circulación normal de vehículos.
- En general, el costo del equipo es muy económico y su conservación es sencilla.

En el análisis del control de intersecciones con semáforos y en los requisitos para la distribución de sus tiempos, es necesario precisar algunos términos básicos o parámetros de tiempo y así evitar posibles confusiones. La figura 4.17 muestra de manera gráfica los conceptos básicos de un semáforo:

**Indicación de Señal.** Es el encendido de una de las luces del semáforo o una combinación de varias luces al mismo tiempo

**Ciclo o longitud de ciclo.** Es el tiempo requerido para una secuencia completa de todas las indicaciones de señal del semáforo.

**Intervalo.** Cualquiera de las divisiones del ciclo, durante la cual no cambian las indicaciones de señal del semáforo.

**Fase.** Parte del ciclo asignada a cualquier combinación de uno o más movimientos que reciben simultáneamente el derecho de paso, durante uno o más intervalos.

**Secuencia de Fase.** Orden predeterminado en que ocurren las fases del ciclo.

Intervalo Verde. Intervalo de derecho de paso durante el cual la indicación de señal es verde.

Intervalo de cambio. Tiempo de exposición de la indicación amarilla del semáforo que sigue al intervalo verde. Es un aviso de precaución para pasar de una fase a la siguiente.

Intervalo de despeje o todo rojo. Tiempo de exposición de una indicación roja para todo el tránsito que se prepara entrar a la intersección.

Intervalo de cambio de fase. Intervalo que puede consistir de solamente un intervalo de cambio amarillo o que puede incluir un intervalo adicional de despeje todo rojo.

Como se mencionó anteriormente las luces de un semáforo en una intersección no son independientes de las luces de los otros semáforos en esa misma intersección por lo que se observa las siguientes formas de tiempo en las luces de semáforos.

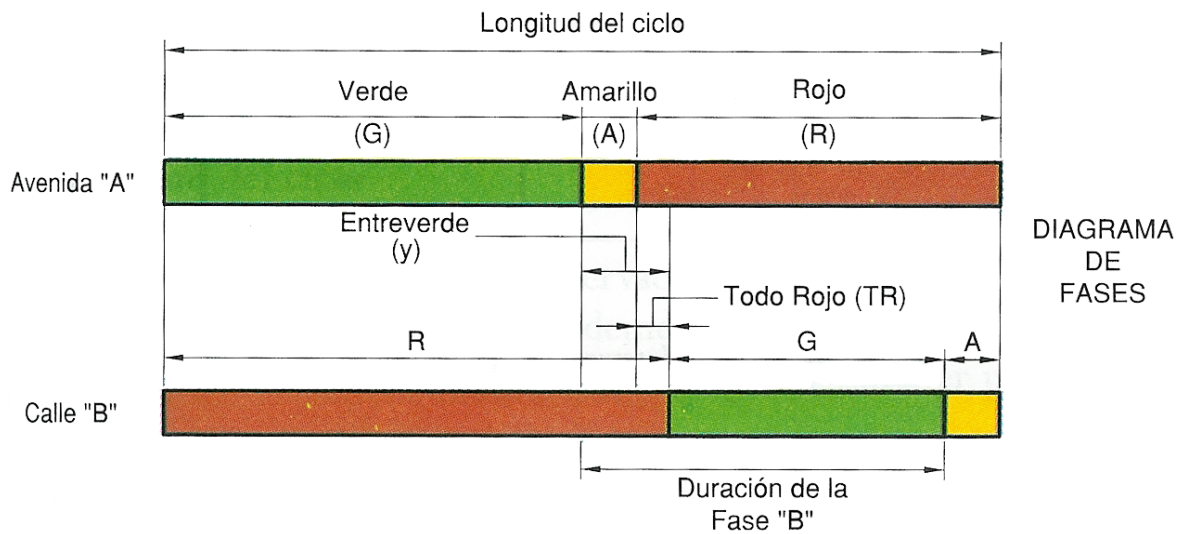


Figura 4.17 Fases y diagrama de fases de una intersección con semáforo.

	Semáforo Avenida A	Semáforo Calle B
Luz Roja	$V_a + A_a + T_{ma}$	$V_b + A_b + T_{mb}$

- $V_a$  = Luz Verde Semáforo A
- $V_b$  = Luz Verde Semáforo B
- $T_{ma}$  = Luz de tiempo muerto Semáforo A
- $T_{mb}$  = Luz de tiempo muerto Semáforo B
- $A_a$  = Luz amarilla de Semáforo A
- $A_b$  = Luz amarilla de Semáforo A

En la figura 4.18 se muestra la pantalla de inicialización de semáforos y en la tabla 4.7 se describen las principales características y la funcionalidad de las mismas.

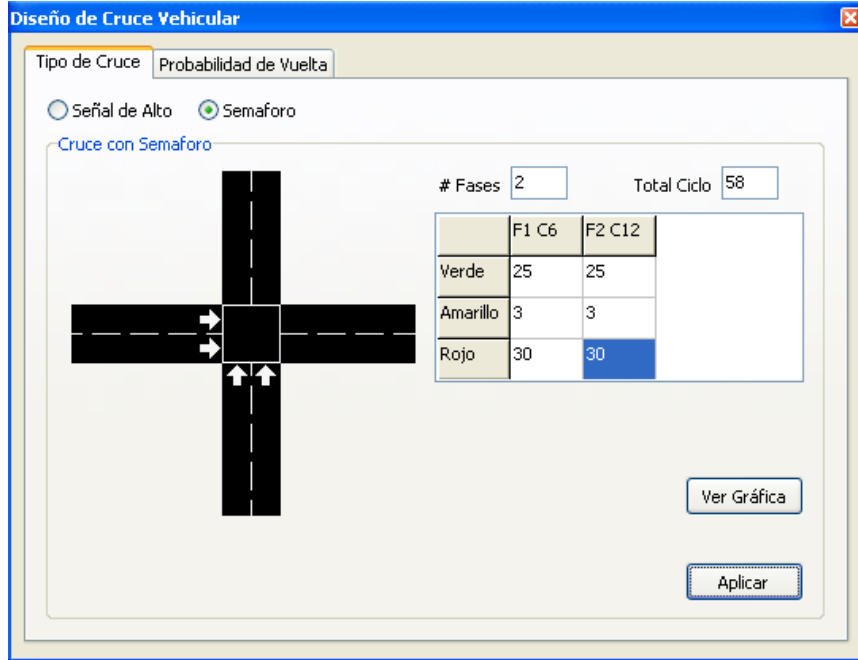


Figura 4.18 Pantalla principal de la inicialización de Semáforos.

Botón	Acciones												
<table border="1" data-bbox="269 1150 602 1308"> <thead> <tr> <th></th> <th>F1 C6</th> <th>F2 C12</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Verde</td> <td>25</td> <td>25</td> </tr> <tr> <td>Amarillo</td> <td>3</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>Rojo</td> <td>30</td> <td>30</td> </tr> </tbody> </table>		F1 C6	F2 C12	Verde	25	25	Amarillo	3	3	Rojo	30	30	<ul style="list-style-type: none"> <li>Muestra un listado de todas las calles que conforman la intersección vehicular. Se editan los tiempos de los semáforos por calle que da acceso a la intersección convirtiéndose en el número de fases que contiene el ciclo total.</li> </ul>
	F1 C6	F2 C12											
Verde	25	25											
Amarillo	3	3											
Rojo	30	30											
<p># Fases <input type="text" value="2"/></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Muestra el número total de fases que contiene el ciclo del semáforo</li> </ul>												
<p>Total Ciclo <input type="text" value="58"/></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Muestra el tiempo total del ciclo del semáforo</li> </ul>												
<p><input type="button" value="Ver Gráfica"/></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Muestra de manera gráfica el total de ciclo de semáforo.</li> </ul>												
<p><input type="button" value="Aplicar"/></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aplica los cambios realizados.</li> </ul>												

Tabla 4.7 Muestra las diferentes acciones que realiza la ventana de propiedades del semáforo.

## 4.4 Simulador.

El simulador es la parte principal de sistema se encarga de aplicar las reglas de comportamiento de los diversos agentes que conforman el sistema así como la visualización del comportamiento de las entidades vehiculares tomando como base el escenario generado por el editor de escenarios y las características previamente inicializadas en el editor de diseño. Como se ha mencionado anteriormente, es posible representar la simulación de manera gráfica y presentar los resultados en general de todo el escenario o seleccionar una ubicación en particular, o simplemente guardar los resultados en un archivo para visualizar paso a paso la simulación en otro momento.

El simulador toma el archivo previamente generado por el editor de escenario y editor de diseño y se encarga de interpretar las características básicas del escenario, sin embargo, es necesario realizar diversas inicializaciones antes de comenzar con la simulación. Es necesario inicializar el número de vehículos de cada tipo que es generado por la calle definiendo un porcentaje para cada tipo. Así como definir elementos que controlen la simulación, avanzar, pausar, detener, etcétera.

El elemento principal de la simulación es el vehículo, este, debe responder a características básicas de movimiento, logrando movimientos complejos dentro del escenario. A continuación se muestran las características de un automóvil, en cuanto a forma y funcionalidad, se describen las reglas de comportamiento que gobiernan a cada uno de ellos y las acciones a realizar cuando interactúan con el resto de entidades de tráfico que contenga el escenario.

### 4.4.1 Escala de Calles y Vehículos.

Se proporciona una escala adecuada al ancho del carril quedando de manera proporcional al tamaño del vehículo así como de las calles donde transite. El tamaño de una calle depende de los lineamientos de la normativa municipal de cada ayuntamiento y del número de carriles con las que cuenta, en el caso de las calles locales y colectoras, por lo regular constan de una calle de dos carriles de sentido indistinto para las calles locales, y de un solo sentido para las calles colectoras.

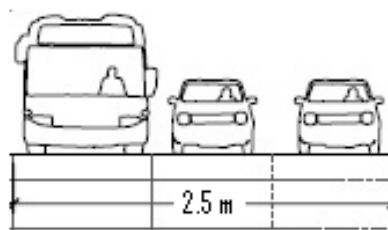


Figura 4.19 Ancho de un carril.

De manera general, el tamaño de un carril de una avenida es de 2.5 metros como se muestra en la figura 4.19, el cual es espacio suficiente para cualquier tipo de vehículo que se considera para realizar la simulación, sin tomar en cuenta el tamaño de las divisiones que existen en carriles. Debido a esto se considera un tamaño fijo de 3 metros por carril, con lo que la representación de una calle en un escenario será de 1 metro por cada 5 píxeles.

El tamaño de cada vehículo dependerá del tipo del mismo, ya que se consideran tres tipos: automóvil, camioneta y camión, por lo que es necesario definir las dimensiones de largo y ancho para cada uno de ellos y aplicar la escala definida para los carriles de una calle, esto se muestra en la tabla 4.8 y en la figura 4.20.

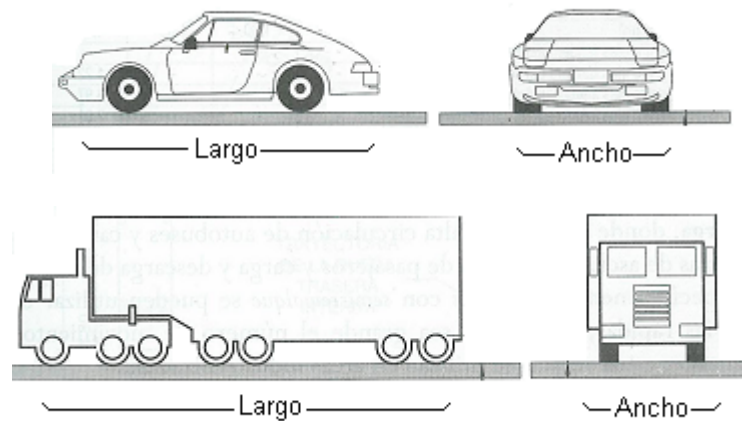


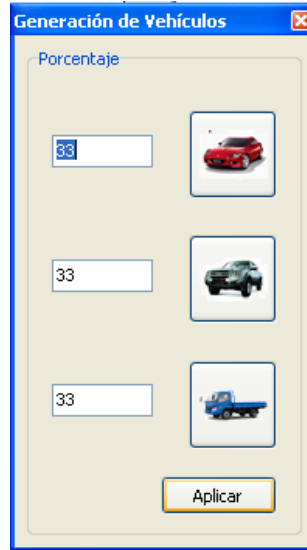
Figura 4.20 Largo y ancho de los vehículos.

Vehículo	Largo Metros	Largo Píxeles	Ancho Metros	Ancho Píxeles
Automóvil	5 metros	25 píxeles	2 metros	10 píxeles
Camioneta	7 metros	35 píxeles	2 metros	10 píxeles
Camión	11 metros	55 píxeles	2 metros	10 píxeles

Tabla 4.8 Representación del tamaño de los tres diferentes tipos de vehículos del simulador.

#### 4.4.2 Generación de Vehículos.

La ubicación de cada vehículo a la hora de su creación se realiza de manera aleatoria para los carriles que conforman la calle al inicio de ésta sin embargo es posible modificar en porcentajes el tipo de vehículo que se generan dentro del escenario. Es posible elegir un porcentaje para un determinado tiempo, es decir, que conforme avanza la simulación, la generación de vehículos cambia.



**Figura 4.21** Porcentaje de generación de vehículos.

Cada vez que se genera un nuevo vehículo, se verifica que exista la distancia suficiente entre el tamaño del vehículo y el siguiente, en caso de no contar con espacio suficiente, el vehículo entra en una cola hasta que es posible ingresarlo al escenario. De esta forma se garantiza que no habrá colisiones dentro a la hora de generar nuevos vehículos. La figura 4.21 muestra las principales características de la selección del porcentaje de vehículos que intervienen en la simulación.

### 4.4.3 Movimiento de un Vehículo

Dependiendo del sentido de la calle, será la dirección en que se mueva el tráfico vehicular, en muchas ciudades las calles del centro operan bajo la base de un sentido con el tráfico opuesto utilizando calles alternas. En muchas otras localizaciones, son parte de calles de un sentido las que sirven de arterias principales del tráfico. Cada vehículo se moverá dentro de cada carril de la calle, dependiendo de la distancia que exista entre éste y el vehículo que antecede. Es fundamental conocer la distancia que existe entre ambos, ya que dependiendo de ésta será la velocidad con que circulará el vehículo dentro de la calle.

Reglas Iniciales:

- 1) La posición inicial de los automóviles corresponde al la posición del inicio de la calle que los genera.
- 2) Su velocidad Inicial es 0
- 3) Su aceleración es 0.

Reglas Básicas de un automóvil:

- 1) Acelerar – Aumenta la velocidad del automóvil, depende de la aceleración del automóvil y de la distancia y velocidad de que existe con el vehículo de enfrente.

$$\text{Aceleración } (a) = \frac{\Delta v}{\Delta t} \rightarrow v_f = v_i + a\Delta t \quad \text{Velocidad } (v) = \frac{\Delta x}{\Delta t} \rightarrow x_f = x_i + v_f\Delta t$$

- 2) Frenar – Reduce la velocidad del automóvil.
- 3) Avanzar – Distancia que recorre en un instante de tiempo, depende de la velocidad del automóvil.

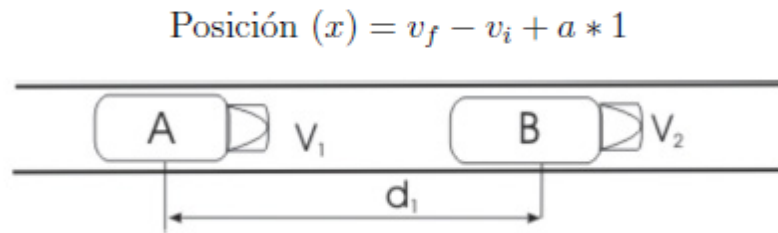


Figura 4.22 Distancia y velocidades entre dos vehículos.

Como se muestra en la figura 4.22 el vehículo que sigue, cuenta con una distancia  $d$  y la velocidad  $v_1$  del vehículo A depende de la distancia  $d$  y de la velocidad  $v_2$  del vehículo B. A continuación se describen las reglas básicas de movimiento de un vehículo:

Información necesaria:

- A – Vehículo A
- B – Vehículo B
- $v_1$  – Velocidad del vehículo A
- $v_2$  – Velocidad del vehículo B
- $d_1$  – Distancia entre el vehículo A y el vehículo B
- $x$  – Distancia suficiente del vehículo A para frenar a cero con su velocidad actual

Reglas:

El automóvil A:

- 1) Avanza siempre y cuando tenga una distancia  $d_1$  en frente de él.
- 2) Aumenta su velocidad si existe una distancia  $d_1 > x$ , y  $v_2 > v_1$
- 3) Disminuye su velocidad si  $d_1 < x$ , o  $v_2 < v_1$

#### 4.4.4 Cambio de Carril y Rebase

Cuando una calle está formada de un solo carril, el vehículo A siempre depende de la velocidad del vehículo B y no siempre cumplirá con su objetivo de alcanzar su velocidad óptima, más aún, si el vehículo B es de baja velocidad, sin embargo, la mayor parte de una ciudad o región cuenta con calles de dos carriles, por lo que el vehículo A tiene la opción de cambiar de carril en caso que se enfrente con un problema como descrito anteriormente.

Las calles de dos carriles de un solo sentido son aquellas en las cuales el tráfico de los vehículos se mueve solamente en una dirección, teniendo dos velocidades máximas y mínimas permitidas, el carril de la derecha es el de menor velocidad y el carril de la izquierda se ocupa para rebasar como se muestra en la figura 4.23. Las reglas de comportamiento se describen a continuación:

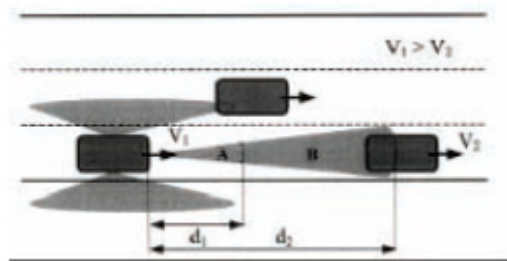


Figura 4.23 Calle de dos carriles.

Información necesaria:

- $v_1$  – Velocidad del vehículo de atrás
- $v_2$  – Velocidad del vehículo de enfrente
- $d_1$  – Distancia entre el vehículo de atrás y el vehículo que se encuentra en el carril de la izquierda
- $d_2$  – Distancia entre el vehículo de atrás y el vehículo de enfrente

Reglas:

- 1) El automóvil avanza siempre que tenga espacio al frente.
- 2) Incremente su velocidad si la velocidad del vehículo de enfrente es mayor a la propia y la distancia entre ambos es grande.
- 3) Disminuye su velocidad si la velocidad del vehículo de enfrente es menor a la propia o la distancia entre ambos es poca.

Para realizar un rebase el vehículo debe tomar en cuenta no solo la distancia y velocidad del vehículo de enfrente. También debe considerar el espacio que forman las distancias de los vehículos del carril al que desea cambiar, es decir, debe tomar en cuenta la información de hasta 3 vehículos para poder realizar el cambio de carril, como se puede observar en la figura 4.24.

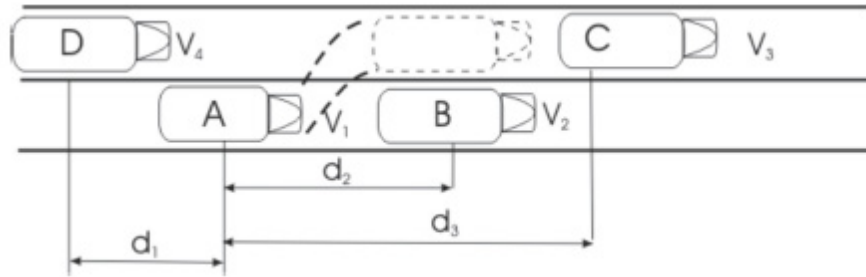


Figura 4.24 Rebase en una calle de dos carriles.

Información necesaria:

- $v_1$  – Velocidad del vehículo A
- $v_2$  – Velocidad del vehículo B
- $v_3$  – Velocidad del vehículo C
- $v_4$  – Velocidad del vehículo D
- $d_1$  – Distancia entre el vehículo D y el vehículo A
- $d_2$  – Distancia entre el vehículo A y el vehículo B
- $d_3$  – Distancia entre el vehículo A y el vehículo C

Condiciones para que el vehículo A cambie de carril:

- 1) La distancia  $d_1$  debe ser mayor de 20 mts.
- 2) La distancia  $d_3$  debe ser mayor de 20 mts.
- 3) Velocidad  $v_1 \leq v_3$
- 4) Velocidad  $v_4 \leq v_1$  y  $v_4$  debe ser constante

El cambio de carril para este caso se utiliza cuando un vehículo desea cambiar el carril a otro de mayor velocidad. De manera similar se realiza el cambio de carril a otro de menor velocidad, no cambian los parámetros en cuanto a la distancia y velocidad, el único cambio es la velocidad de ajuste del vehículo A al ingresar a un carril de menor velocidad, es decir, debe disminuirla en caso de que sea mayor a la velocidad máxima del carril interior.

De manera general se realizan los cambios de carril en una calle con un número mayor de carriles de 2, solo tomando en cuenta los vehículos de carril actual y los vehículos al carril que se desea cambiar, realizando previamente una evaluación de los carriles a los que se tiene acceso para realizar el cambio. De esta manera, un vehículo puede cambiar de carril varias veces dependiendo de las condiciones en que se encuentre.

#### 4.4.5 Parada y evaluación de un cruce vehicular

Un cruce vehicular puede ser de tres diferentes tipos: Semáforo, señal de tránsito, o cruce libre. Cuando un vehículo está por llegar al final de una calle, éste necesita evaluar las condiciones del cruce vehicular con el fin de realizar la opción más óptima para él. La

primera evaluación que realiza es la de qué camino debe seguir al llegar al cruce, si va a dar una vuelta o seguirá derecho, tomando en cuenta el número de vehículos que hay en las calles vinculadas al cruce, tomando como referencia la velocidad del último vehículo que está en la calle a la que quiere acceder. La figura 4.25 muestra la distancia de un vehículo al cruce vehicular.

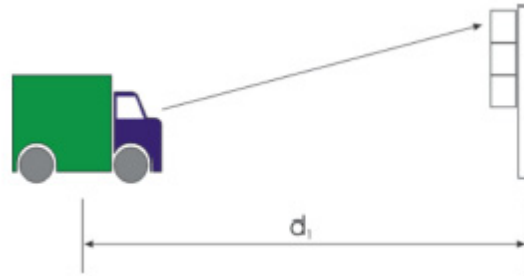


Figura 4.25 Distancia de un vehículo al cruce vehicular.

#### 4.4.6 Cruce Vehicular

Cuando el cruce vehicular es de tipo semáforo, el vehículo debe evaluar el color del semáforo y reaccionar según el color en el cual el semáforo se encuentre.



Figura 4.26 Semáforo en rojo.

La figura 4.26 muestra el comportamiento del vehículo A cuando el color del cruce vehicular es rojo ó cuando se encuentra con una señal de tránsito. Para ambos casos las reglas de comportamiento del vehículo A son las siguientes:

Información necesaria:

- Color del semáforo
- Señal del cruce

Reglas:

- 1) Si el semáforo se encuentra en color rojo la velocidad del vehículo es 0
- 2) Si el cruce vehicular es una señal de tránsito, el vehículo A verifica que exista un distancia de 100mts entre él y los vehículos de las calles asociadas a el cruce vehicular para avanzar.

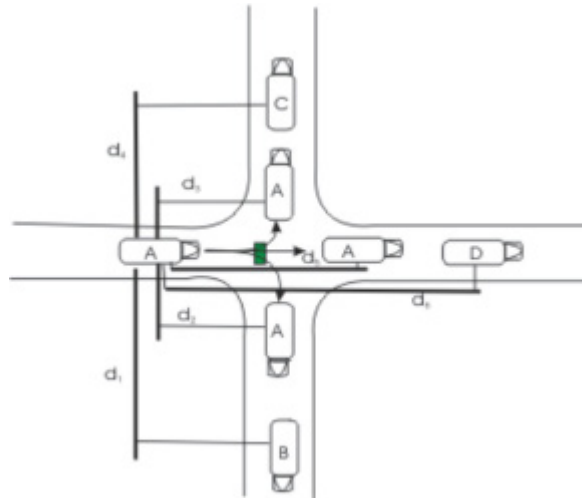


Figura 4.27 Semáforo en verde.

La figura 4.27 muestra el comportamiento del vehículo A cuando el color del cruce vehicular esta en verde, y las condiciones de los vehículos restantes que tiene que evaluar para decidir la dirección por la que debe seguir.

Información necesaria:

- $v_1$  – Velocidad del vehículo A
- $v_2$  – Velocidad del vehículo B
- $v_3$  – Velocidad del vehículo C
- $v_4$  – Velocidad del vehículo D
- $d_1$  – Distancia entre el vehículo A y el vehículo D
- $d_2$  – Distancia entre el vehículo A y el vehículo B
- $d_3$  – Distancia entre el vehículo A y el vehículo C

Condiciones para que el vehículo A decida el camino a seguir para no dar vuelta:

- 1) La distancia  $d_1$  debe ser mayor de 50mts.
- 2) Velocidad  $v_1 \leq v_4$

Condiciones para que el vehículo A decida el camino a seguir para no dar vuelta a la izquierda:

- 1) La distancia  $d_1$  debe ser menor a 50mts
- 2) La distancia  $d_3$  debe ser mayor de 50mts.
- 3) Velocidad  $v_1 \leq v_3$

Condiciones para que el vehículo A decida el camino a seguir para no dar vuelta a la izquierda:

- 1) La distancia  $d_1$  debe ser menor a 50mts
- 2) La distancia  $d_3$  debe ser menor a 50mts
- 3) La distancia  $d_2$  debe mayor de 50mts.
- 4) Velocidad  $v_1 \leq v_2$

#### 4.4.7 Reglas de comportamiento

De manera general se listan las reglas que gobiernan a un vehículo tomando como base los movimientos naturales de un vehículo y cómo puede llegar a realizar movimientos más complejos.

- Avanzar: Verifica si el vehículo puede avanzar.
- Detener: Verifica las condiciones necesarias para detener el vehículo.
- Desacelerar: Verificar condiciones del vehículo o cruce que está enfrente para desacelerar.
- Acelerar: Verifica las condiciones del vehículo o cruce que está enfrente para acelerar.
- Cambio de Carril. Verifica las características de los vehículos que están en los carriles contiguos para realizar un cambio de carril.
- Cruce: Verifica los señalamientos del cruce vehicular.

De manera particular se pueden denotar reglas de comportamiento que están contenidas dentro de las reglas generales de comportamiento y que son ocupadas por una o mas reglas.

- Determinar la distancia entre dos vehículos en la misma calle.
- Determinar la velocidad de un vehículo en la misma calle.
- Determinar la velocidad y distancia de un vehículo en una calle asociadas por el mismo cruce
- Determinar distancia con el cruce vehicular.
- Identificar luces de los semáforos.
- Identificar vehículos en carriles contiguos.
- Identificar ubicación actual.
- Identificar el cambio de ubicación
- Determinar la velocidad máxima en una calle.
- Identificar caminos de una ubicación a otra.



## Capítulo 5

# Pruebas y Resultados

En este capítulo se presentan las pruebas y resultados obtenidos a partir de la edición y simulación de escenarios realizados en el simulador de tráfico vehicular. Una vez implementados los diferentes módulos que componen el sistema, se establecieron dos tipos de pruebas, de escenario y de simulación. Las pruebas de escenario consisten en la elaboración de la representación de complejas zonas poblacionales de una región tomando como base las características generales de la misma. Las pruebas de simulación consisten en la obtención de resultados en base al comportamiento del flujo vehicular en una zona poblacional con características predefinidas que pueden presentar conflictos y que son de gran interés para el mejoramiento de las vialidades.

### 5.1 Pruebas de escenario.

Las pruebas consisten en la representación de una zona habitacional que comprende las cuadras contenidas entre la 14 poniente con la 18 poniente y Avenida San Claudio y Circunvalación y las contenidas entre la 14 sur con Carlos Camacho Espíritu y Circunvalación con Carlos Camacho Espíritu. En la figura 5.1 se muestra las calles comprendidas para la primera prueba y segunda prueba. La representación de las calles se realiza en base a las coordenadas geográficas que la componen. Se toman como referencia los siguientes puntos conformando por la esquina de dos calles con el fin de calcular la distancia en metros que hay entre cada uno y obtener una medida aproximada para cada calle:

#	Esquina	Latitud	Longitud
1	14 Sur y Avenida San Claudio	19.005889	-98.204684
2	14 Sur y Circunvalación	19.007593	-98.204212
3	18 Sur y Avenida San Claudio	19.004429	-98.20168
4	18 Sur y Circunvalación	19.006498	-98.201165
5	Circunvalación y Carlos Camacho Espíritu	19.008892	-98.207603
6	Avenida San Claudio y Carlos Camacho Espíritu	19.006944	-98.206916

**Tabla 5.1.** Listado de calles a tomar en cuenta para realizar la representación de escenario con latitud y longitud.

La distancia en metros se obtiene a partir de la longitud y latitud de cada punto utilizando el método de Haversine que es una ecuación muy importante para la navegación y que consiste en dar la distancia entre dos puntos de una esfera a partir de su longitud y latitud. Quedando las distancias entre los puntos de la siguiente manera:

Esquina	Distancia
De 1 a 2	195.9 metros
De 2 a 4	342.7 metros
De 4 a 3	236.3 metros
De 1 a 6	262.3 metros
De 6 a 5	228.3 metros
De 5 a 2	384.7 metros

**Tabla 5.2.** Distancia en metros de la longitud de las calles a representar.

Una vez obtenida la distancia entre los puntos, es posible realizar el cálculo de longitud de las calles colectoras tomando como referencia la longitud de las calles que están en cada esquina. No se consideran las calles que comunican a las calles colectoras con la arteria mayor ya que no influye en el flujo del tráfico vehicular por la escasa cantidad de vehículos que circulan por dichas calles.



**Figura 5.1.** Zona poblacional a representar.

### 5.1.1 Prueba Escenario 1.

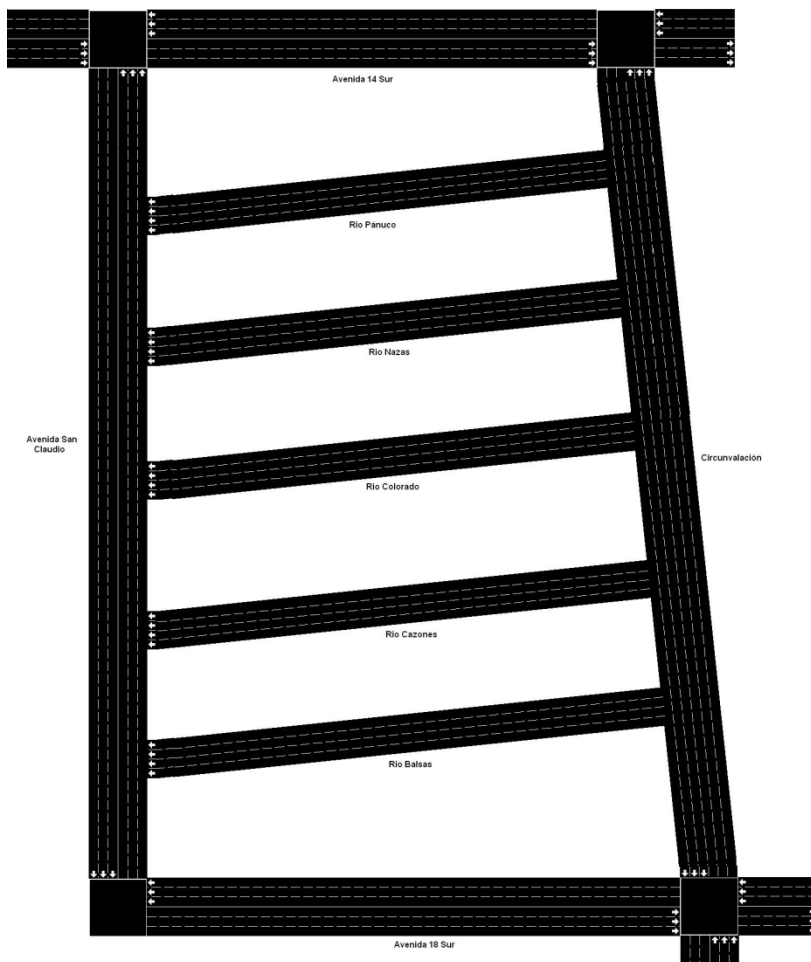
La prueba 1 consiste en la elaboración de la representación que conforma la zona habitacional comprendida por las calles contenidas entre la 14 Sur con 18 Sur y Avenida San Claudio con Circunvalación. La Figura 5.2 muestra el resultado que se obtiene a partir del editor de escenarios de la prueba 1, está comprendido por 4 arterias principales, 5 calles colectoras, 4 cruces con semáforo y 10 cruces con señalización, la lista de calles representadas en el escenario son las siguientes:

#### Arterias Principales

- 14 Sur
- 18 Sur
- Avenida San Claudio
- Circunvalación

#### Calles Colectoras

- Rio Balsas
- Rio Cazonas
- Rio Colorado
- Rio Nazas
- Rio Pánuco



**Figura 5.2.** Representación en el editor de escenarios de un fragmento de la zona poblacional a representar.

### 5.1.2 Prueba de Escenario 2.

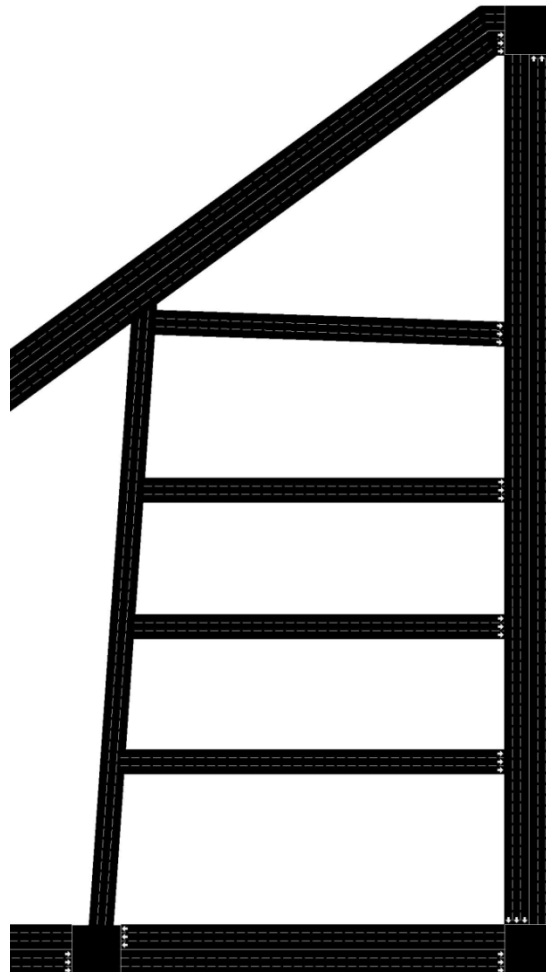
La segunda prueba consiste en la elaboración de la representación que conforma la zona habitacional comprendida entre las calles 14 Sur con Carlos Camacho Espíritu y Avenida San Claudio con Circunvalación. En la figura 5.3 se muestra el resultado obtenido a partir del editor de escenarios. El escenario está comprendido por 4 arterias principales, 4 calles colectoras, 3 cruces con semáforo y 9 cruces con señalización, la lista de calles representadas en el escenario son las siguientes:

**Arterias Principales**

- 14 Sur
- Carlos Camacho Espíritu
- Avenida San Claudio
- Circunvalación

**Calles Colectoras**

- Rio Yaqui
- Rio Mayo
- Rio Atoyac
- Rio Lerma



**Figura 5.3.** Representación en el editor de escenarios de un fragmento de la zona poblacional a representar.

De esta manera es posible representar zonas habitacionales a partir de un escenario muy complejo tomando fracciones del mismo y realizando la representación de cada uno de

ellos en el editor de escenario, permitiendo de esta manera al simulador realizar la comunicación entre escenarios especificando las calles que se comunican entre sí por medio del nombre de la calle, o tomando como referencia la información del cruce vehicular. El editor de escenarios permite obtener representaciones muy detalladas de las zonas urbanas mediante este proceso.

## 5.2 Pruebas de simulación.

Las pruebas de simulación consisten en la representación activa de las entidades del tráfico vehicular en un escenario generado. Las características que definen a cada entidad de tráfico son interpretadas a través del archivo que generan previamente el editor de escenario y el editor de diseño. El objetivo es representar las características de una zona urbana en el escenario y de esta manera obtener un modelo aproximado de lo que sucede en la realidad con el fin de obtener mejoras en la zona urbana en cuanto al flujo de tránsito.

Las primeras dos pruebas se basan en el cálculo de flujo vehicular que existe en diversas autopistas en determinadas horas del día, es decir, se reproducen características en cuanto a la cantidad del flujo vehicular y en cuanto al tipo de vehículos que circulan.

### 5.2.1 Prueba de simulación 1, Autopista de tres carriles.

La primera prueba consiste en la representación de una autopista de un kilómetro de longitud de tres carriles con el fin de determinar el flujo vehicular en diferentes etapas del día, el flujo vehicular se calcula como la cantidad de vehículos que pasan por un punto en una fracción de tiempo independientemente del tipo de vehículo que sea.

Se consideran tres tipos de flujo, abundante, moderado y escaso, para cada caso de flujo se considera de la misma forma utilizar diferentes tipos de vehículo ya que cada uno tiene un límite de velocidad diferente esto influye de manera significativa en la cantidad de vehículos que pasan por un determinado punto. El tiempo en que se llevó a cabo la simulación es el equivalente a 5 horas calculando el flujo cada 20 minutos.

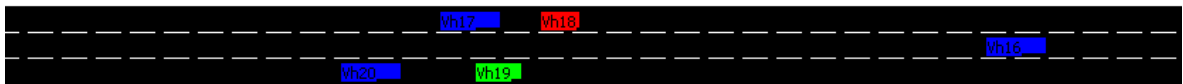


Figura 5.4. Autopista de tres carriles con tres tipos de vehículo.

En la tabla 5.3 se muestran los resultados obtenidos con los tres diferentes tipos de vehículo y con los diferentes tipos de generación. En las figura 5.5, 5.6 y 5.7 se muestran los resultados obtenidos de manera gráfica y se realiza un comparativo entre ellos.

3 Tipos de Vehículos				2 Tipos de Vehículos				1 Tipo de Vehículo			
	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto		
0:20	116	152	245	116	141	275	116	144	277		
0:40	120	145	260	120	149	282	120	148	298		
1:00	125	150	261	120	151	288	120	154	286		
1:20	128	153	256	120	154	284	120	154	288		
1:40	123	150	250	120	153	279	120	152	288		
2:00	120	158	268	120	144	273	120	149	276		
2:20	120	152	271	120	153	280	120	148	283		
2:40	119	152	302	119	150	281	120	152	282		
3:00	120	151	271	120	149	282	120	142	277		
3:20	120	151	268	120	153	282	120	144	278		
3:40	119	150	257	120	145	261	120	149	274		
4:00	117	147	256	120	145	276	120	156	271		
4:20	116	153	269	119	149	264	120	144	275		
4:40	116	143	272	120	146	262	120	148	270		
5:00	120	149	267	120	150	275	120	141	268		

Tabla 5.3. Tabla de resultados de la prueba 1.

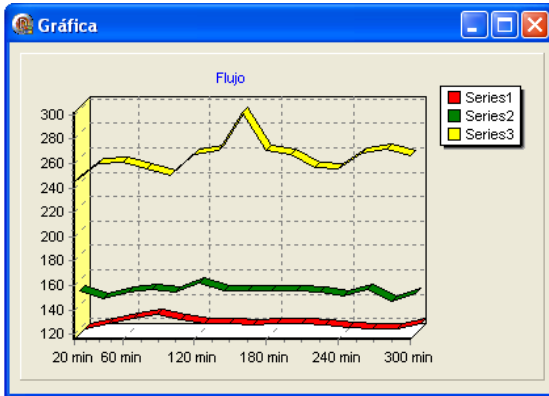


Figura 5.5. Gráfica de resultados de la prueba 1

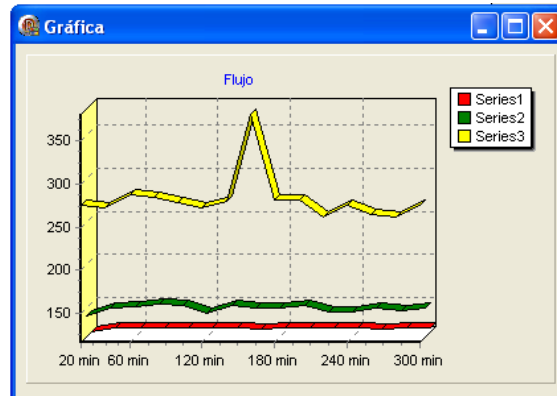


Figura 5.6. Gráfica de resultados de la prueba 1

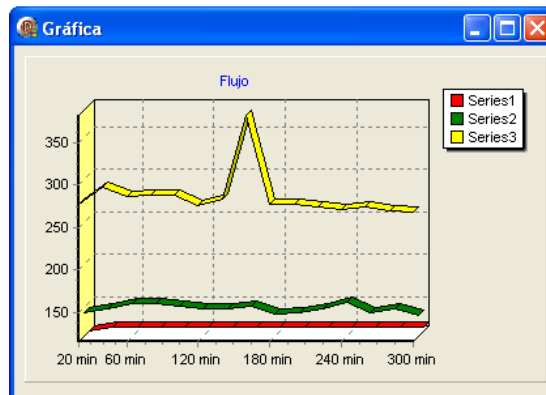


Figura 5.7. Gráfica de resultados de la prueba 3

Se representa cada uno de los tipos de generación con una serie distinta, el color rojo corresponde a la generación baja de vehículos en la autopista, el color verde a la generación media, y el color amarillo corresponde a la generación alta. Se analizan de manera conjunta para comparar el flujo en determinadas horas de tiempo.

Es posible darse cuenta como existe una tendencia de los vehículos conforme pasa el tiempo y dependiendo del número de tipos que conforman la simulación. Cuando la generación de vehículos es baja, el flujo se mantiene constante debido a que no se genera tráfico por la velocidad de los vehículos. De igual forma, cuando la generación de vehículos es media existe posibilidad que se genere algún tráfico, sin embargo, este se estabiliza rápidamente. En el caso de la generación alta de vehículos es posible observar cómo el número de vehículos aumenta de manera repentina para después estabilizar su curva de crecimiento a la baja por el número de vehículos que se generan a partir de una hora en tiempo de simulación.

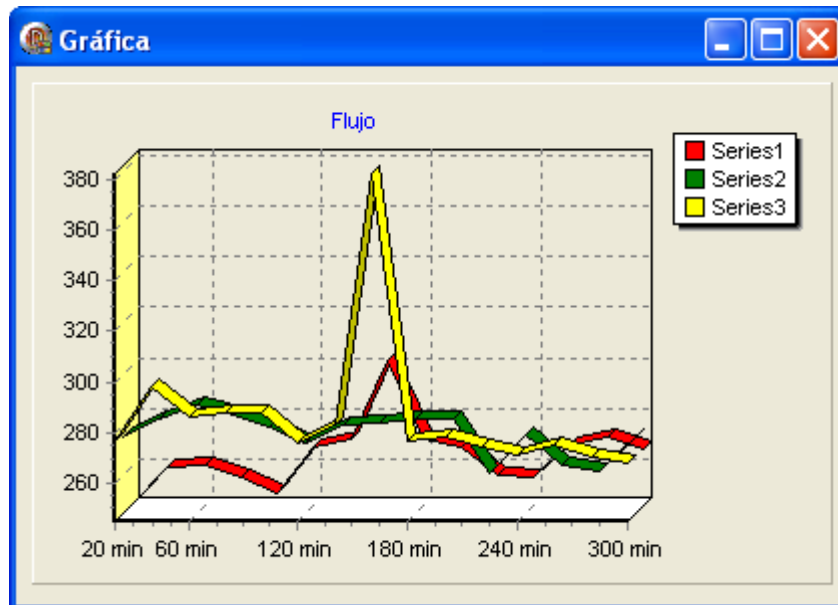


Figura 5.8. Comparación entre los resultados de la prueba 1, con máxima generación y diferentes tipos de vehículo

La figura 5.8 muestra las series correspondientes a la selección de mayor flujo vehicular de cada prueba que corresponde al número de tipos de vehículos que se consideraron para cada una de ellas. La serie 1 corresponde a la prueba que involucra a los tres tipos diferentes de vehículos, la serie 2 corresponde a dos tipos diferentes de vehículos y la serie 3 corresponde a un solo tipo de vehículo.

La tendencia del flujo para cada prueba es consistente con el resto de las pruebas, sin embargo la cantidad de vehículos que pasan por un punto es mayor en la tercera prueba debido a que la velocidad máxima de los vehículos es la misma, mientras que en la prueba 1, los vehículos de menor velocidad limitan a los de mayor velocidad generando mayor saturación de la vía provocando que el promedio de la velocidad de la autopista sea menor.

### 5.2.2 Prueba de simulación 2, Autopista de cinco carriles.

La segunda prueba consiste en la representación de una autopista de un kilómetro de longitud de cinco carriles con el fin de determinar el flujo vehicular en diferentes etapas del día, además de realizar la comparación con el flujo de la prueba anterior.

Se consideran tres tipos de flujo, abundante, moderado y escaso, para cada caso de flujo se considera de la misma forma utilizar diferentes tipos de vehículo ya que cada uno tiene un límite de velocidad diferente esto influye de manera significativa en la cantidad de vehículos que pasan por un determinado punto. El tiempo en que se llevó a cabo la simulación es el equivalente a 5 horas calculando el flujo cada 20 minutos.

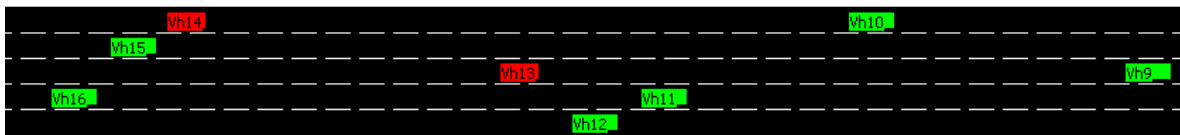


Figura 5.9. Autopista de cinco carriles con dos tipos de vehículo.

En la tabla 5.4 se muestran los resultados obtenidos con los tres diferentes tipos de vehículo y con los diferentes tipos de generación. En las figura 5.10, 5.11 y 5.12 se muestran los resultados obtenidos de manera gráfica y se realiza un comparativo entre ellos.

	3 Tipos de Vehículos			2 Tipos de Vehículos			1 Tipo de Vehículo		
	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
0:20	116	162	265	115	164	292	115	164	302
0:40	120	160	277	120	177	297	120	162	327
1:00	118	164	272	120	164	300	120	178	311
1:20	120	175	283	120	167	294	120	163	317
1:40	120	176	274	120	166	284	120	169	305
2:00	119	167	276	120	160	281	120	163	294
2:20	120	164	270	120	166	275	120	159	300
2:40	119	169	264	120	164	281	120	159	291
3:00	120	178	267	120	170	275	120	169	280
3:20	120	166	264	120	168	274	120	163	279
3:40	121	168	259	120	169	268	120	169	279
4:00	120	167	262	120	168	267	120	166	275
4:20	120	178	258	120	165	268	120	158	270
4:40	120	160	258	120	165	270	120	163	280
5:00	120	180	247	120	171	255	120	166	266

Tabla 5.4. Tabla de resultados de la prueba 2.

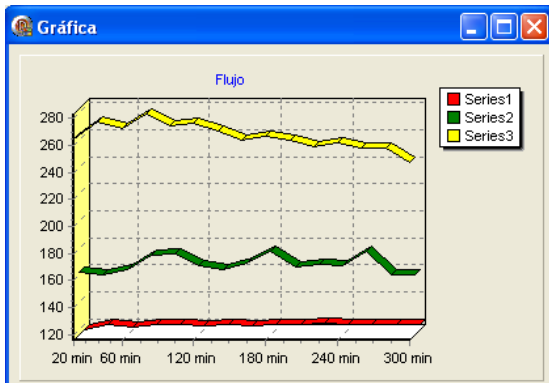


Figura 5.10. Gráfica de resultados de la prueba 2

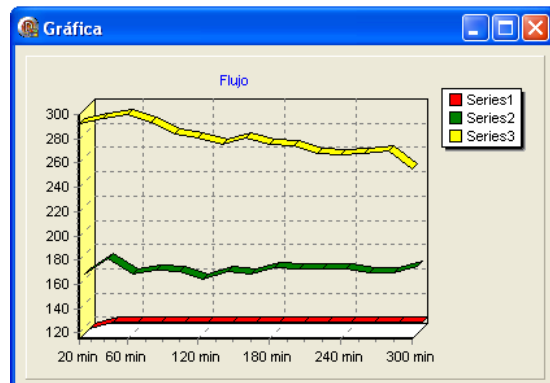


Figura 5.11. Gráfica de resultados de la prueba 2

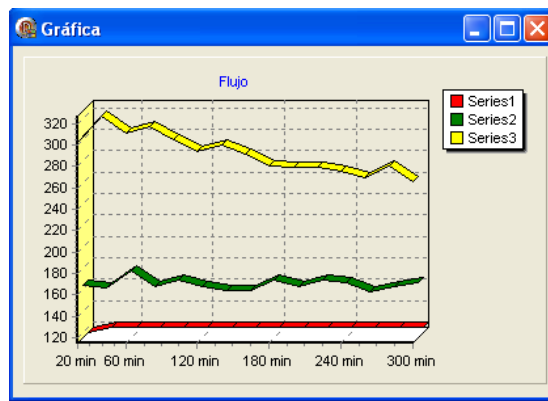


Figura 5.12. Gráfica de resultados de la prueba 2

Se representa cada una de los tipos de generación con una serie distinta, el color rojo corresponde a la generación baja de vehículos en la autopista, el color verde a la generación media, y el color amarillo corresponde a la generación alta. Se analizan de manera conjunta para comparar el flujo en determinadas horas de tiempo.

En esta prueba se observa como para la generación media y baja el flujo de los vehículos es similar debido a que no llega a generar una cantidad suficiente de vehículos que causen tráfico vehicular, y solo se depende de la velocidad de los vehículos, sin embargo, en la generación mayor se observa que el flujo de vehículos es mayor al de la prueba anterior, es decir, pasan más vehículos en la autopista por la cantidad de carriles de la misma. Y como sucede en la prueba anterior a medida que pasa el tiempo la cantidad de vehículos disminuye debido al congestionamiento vehicular que se genera principalmente por la cantidad de vehículos de baja velocidad que va aumentando según transcurre la prueba.

### 5.2.3 Prueba de simulación 3, Análisis de un cruce con semáforo.

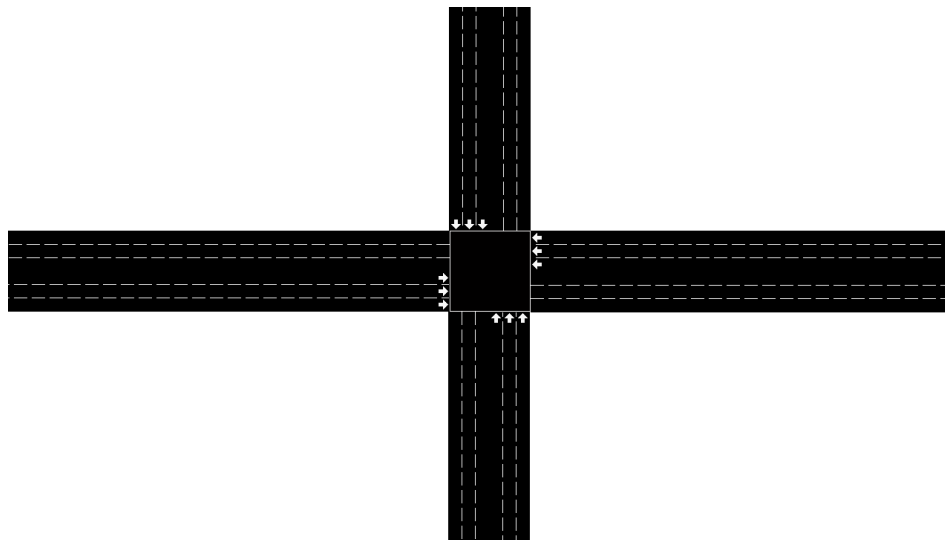
En la prueba se pretende representar las características principales de una esquina con semáforo, tomando como base el cruce correspondiente a la 14 Sur con Avenida Circunvalación, tomando como referencia la distancia que hay entre este cruce y el cruce anterior para dichas avenidas. Se considera el promedio del flujo de vehículos que pasan por la avenida en un determinado lapso de tiempo, en dos instantes del día, cuando existe un tráfico intenso y cuando la circulación es normal. De igual manera se considera el porcentaje de los diferentes tipos de vehículos que afectan al flujo vehicular. Los tiempos de los semáforos corresponden a los del cruce vehicular, en ambos casos es el mismo. En la tabla 5.5 se enuncian las características principales del cruce.

Calle	Longitud
14 Sur dirección Norte	195.9 metros
14 Sur dirección Sur	265.4 metros
Circunvalación dirección este	342.7 metros
Circunvalación dirección oeste	384.7 metros

Vehículo	% Flujo Normal	% Flujo Alto
Tipo 1 – Automóvil	73%	60%
Tipo 2 – Microbús	17%	18%
Tipo 3 – Camión	10%	12%

Semáforo	T. Verde	T. Amarillo	T. Rojo
14 Sur dirección norte	31 seg	2 seg	86 seg
14 Sur dirección sur	24 seg	3 seg	83 seg
Circunvalación dirección este	27 seg	2 seg	80 seg
Circunvalación dirección oeste	25 seg	2 seg	92 seg

**Tabla 5.5.** Lista de características propias del cruce a simular, se considera la longitud de la calle, el porcentaje de generación de vehículos y los tiempos de los semáforos.



**Figura 5.13.** Modelo del cruce vehicular a simular realizado en el editor de escenario.

El objetivo de la prueba es determinar la velocidad media de los vehículos y la densidad media en los dos periodos de tiempo para determinar qué calle se satura mas y realizar cambios a los tiempos de los semáforos con el fin de optimizar el tráfico vehicular. La prueba se realizó para 5 ciclos de semáforo para cada periodo de tiempo, la generación de vehículos concuerda con el promedio de vehículos que transitan por cada calle. En la figura 5.13 se muestra el cruce en cuestión con la distancia real calculada mediante el método antes mencionado en la prueba 1. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.6 para los dos periodos de tiempo.



---

## Conclusiones

---

- Se realizó un estudio de los diferentes modelos de tráfico vehicular con el fin de seleccionar el que representara el mayor número de características de las entidades de tráfico con el fin de realizar una simulación apegada a la realidad.
- Se realizó un editor de escenarios complejos para la representación de zonas urbanas o segmentos poblacionales con la posibilidad de realizar cambios según sea conveniente al usuario.
- Se realizó un editor de diseño con el fin de agregar características propias de las zonas urbanas, permitiendo al usuario realizar modificaciones con el fin de encontrar mejoras en las características del escenario para mejorar el flujo vehicular y definir las reglas de comportamiento de las entidades de tránsito.
- Se realizó la distinción entre dos entidades de tráfico, vehículos con voluntad y vehículos con meta, permitiendo a los vehículos con voluntad moverse por el escenario sin una meta en particular y a los vehículos con meta definir un origen, un objetivo y un conjunto de rutas a seguir con el fin de analizar cuál es la ruta más óptima.
- Se realizó la simulación de las entidades de tráfico vehicular implementadas con reglas básicas de comportamiento y se agregaron nuevas reglas con el fin de enriquecer las ya existentes y obtener resultados más apegados a la realidad.

- 
- Se realizó un visualizador para representar gráficamente a las entidades de tráfico durante la simulación y un visualizador de secciones con el fin de que el usuario analice de forma detallada un conjunto de calles o secciones de manera independiente al escenario.
  - Se realizaron pruebas de escenario con el fin de realizar representaciones detalladas de zonas urbanas o poblacionales complejas en específico y se logró la representación en segmentos de un conjunto de calles de gran interés para el análisis del flujo vehicular.
  - Se realizó un análisis con el fin de determinar las características del flujo vehicular en una autopista con atributos particulares, y se determinó que a medida que avanza el tiempo el flujo se vuelve más saturado por la velocidad de los vehículos que transitan.
  - Se realizó el análisis de un cruce vehicular con el fin de estudiar las características del flujo en dicha cruce y realizar un mejoramiento en los tiempos de los semáforos para agilizar el flujo resolver el problema del congestionamiento en horas pico.
  - Se logró realizar una herramienta útil para los ingenieros de tráfico para una mejor planeación en la construcción y reestructuración de segmentos poblacionales.

---

# Trabajo a Futuro

---

- Incrementar el número de reglas de comportamiento de las entidades de tráfico, como accidentes, calles cerradas, ambulancias.
- Realizar la generación de zonas urbanas o poblacionales a partir de una imagen de un mapa.
- Incrementar el número de características del editor de escenario con el fin de lograr escenarios aún más complejos.
- Realizar la simulación en el cluster dividiendo al escenario en fracciones y comunicando entre los nodos a las calles que conforman el escenario.
- Desarrollar un sistema más detallado y un sistema de predicción de datos estadísticos en base a criterios tomados a partir de los datos de campo.
- Permitir modelar los tiempos de las luces de los semáforos en dependencia del día en el que se transcurra la simulación (día laboral, fin de semana ó día feriado).
- Incluir nuevos eventos, eventos y reglas que influyan en el comportamiento de las entidades de tráfico durante el transcurso de la simulación como son eventos políticos y sociales, cambio de carril de una calle dependiendo de las necesidades de la población, etc.
- Incluir en el modelo una red de semáforos inteligentes basado en contenedores de flujo.
- Incluir en el editor puentes, distribuidores y pasos a desnivel con el fin de desarrollar un escenario mucho más complejo y versátil.

---

---

# Aportaciones

---

- Se desarrolló un sistema versátil y dinámico que sirve de ayuda a los ingenieros de tráfico vehicular a diseñar de manera más eficiente las calles que conforman a una región o zona poblacional.
- Se desarrolló un sistema de edición de carreteras que representan zonas o regiones urbanas con el fin de facilitar la visualización de modelos de simulación ya establecidos o tomarlo como base para desarrollar nuevos modelos.
- Se desarrolló un sistema de diseño de la lógica de la estructura carretera.
- Se incremento el número de reglas que el vehículo tiene en la simulación con el fin de representar de manera más real el comportamiento del tráfico vehicular.
- Se implementaron objetivos y metas para los vehículos dentro de la simulación y se estableció un sistema para optimizar los tiempos de llegada de un lugar a otro.
- Se analiza de manera activa el flujo del tráfico, la densidad del tráfico y velocidad de los vehículos dentro de la simulación dentro de una determinada calle.
- Se implementó un sistema de sincronización de semáforos con el fin de coordinarlos dentro de una avenida.
- Se implementó un modelo de simulación basado en el modelo de Kai-Nagel y se modificó con el fin de obtener resultados más apegados a la realidad.

---

---

# Bibliografía

---

- [1]. N. J. Garber, L. A. Hoel, “Ingeniería de Tránsito y Carretera”, Universidad de Virginia, 3ª. Edición, Editorial Thomson, 2005.
- [2]. M. Pursula, “Simulation of Traffic Systems– - An Overview, Journal of Geographic Information and Decision Analysis”, Vol.3, No.1, 1999.
- [3]. Y. Qi, “A Simulation Laboratory for Evaluation of Dynamic Traffic Management System”, PhD Dissertation, MIT, 1997
- [5]. S. P. Hoogendoorn, H. L. Bovy “State-of-the-art of Vehicular Traffic Flow Modelling”, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Transportation and Traffic Engineering Section, Volume 215, Number 4, 19 August 2001, pp. 283-303(21).
- [6]. R. W. Rothery “Car Following Models”, Senior Lecturer, Civil Engineering Department, The University of Texas, ECJ Building 6.204, Austin, TX, 2002.
- [8]. S.P Hoogendoorn, S. Luding, P.H.L. Bovy, M. Schreckenberg, D. E. Wolf “Traffic and Granular Flow”, Springer, 2003.
- [9]. D. Helbing, “Gas-kinetic Derivation of Navier-STokes-Like Traffic Equations”, *Phys. Rev. E*, 1996, vol. 53, pp. 2366-2381.
- [10]. S. P. Hoogendoorn, P. H. L. Bovy “Gas-kinetic model for multilane heterogeneous traffic flow”, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Transportation and Traffic Engineering Section, Delft University of Technology Annual Meeting of the Transportation Research Board N°78, ETATS-UNIS (01/1999) 1999, n° 1678 (293 p.) (14 ref.), pp. 150-159.
- [11]. S. P. Hoogendoorn, P. H. L. Bovy “Generic gas-kinetic traffic systems modeling with applications to vehicular traffic flow”, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Stevinweg 1, NL - 2600 GA Delft, The Netherlands

- 
- [12]. S. J. Russell, P. Norving, “Inteligencia Artificial, un enfoque moderno”, 2ª Edición, editorial Printicel Hall, 1999.
- [13]. S. J. Russell, P. Norving, “Inteligencia Artificial, un enfoque moderno”, 2ª Edición, editorial Printicel Hall, 2004.
- [14]. D. M. Himmelblau, K. B. Bischoff (1968). “Process analysis and simulation: Deterministic systems”, John Wiley & Sons, Inc., New York, London, Sydney.
- [15]. W. D. Kelton (1998). “Simulation with Arena. McGraw-Hill”, New York.
- [16]. C. Aguilar , H. Cortés y R. Allende. “Los modelos de simulación. Una herramienta de apoyo a la gestión pecuaria”, Arch. Latinoam. Prod. Anim. ALPA., 2002.
- [17]. Thomas H. Naylor y R. Bustamante.
- [18]. Shannon, Robert; Johannes, James D. (1976). “*Systems simulation: the art and science*” IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Vol. 6(10). pp. 723-724.
- [19]. A. Cresus. “Simulación y Control de Procesos por Ordenadores”. Editorial Marcombo. Barcelona, 1987.