

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES
CARRERA DE INFORMÁTICA**



TESIS DE GRADO

**“MODELO DE SIMULACION DE LA DINAMICA DEL TRANSITO VEHICULAR BAJO
EL ENFOQUE MICROSCOPICO”**

**PARA OPTAR AL TITULO DE LICENCIATURA EN INFORMATICA
MENCION: INGENIERIA DE SISTEMAS INFORMATICOS**

**POSTULANTE: VERONICA TARQUI VALLEJO
TUTOR METODOLOGICO: LIC. JAVIER HUGO REYES PACHECO
ASESOR: M.SC. ALDO RAMIRO VALDEZ ALVARADO**

**LA PAZ- BOLIVIA
2015**



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES
CARRERA DE INFORMÁTICA**



LA CARRERA DE INFORMÁTICA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES PERTENECIENTE A LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la referencia correspondiente respetando normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADOS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

DEDICATORIA

A mi madre, por brindarme su apoyo
Incondicional y confiar siempre en mí.

AGRADECIMIENTOS

Al Licenciado Javier Reyes Pacheco, por el seguimiento, observaciones y sugerencias hechas durante la elaboración de la tesis.

Al M,Sc. Aldo Ramiro Valdez Alvarado, por su tiempo, sus sugerencias y conocimiento entregados en el desarrollo de esta tesis.

A mi familia, mis padres Mericia y René. A mis hermanos Reyna, Ana María, Abraham y Sandra.

A mis amigos, quienes siempre me apoyaron, por su amistad y palabras de aliento.

Y a quienes no puedo dejar de agradecer Wilson y Rosmery, por enseñarme que todo se puede lograr, por sus palabras de aliento y apoyo incondicional.

INDICE

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
INDICE DE FIGURAS.....	vii
INDICE DE TABLAS.....	viii
RESUMEN.....	ix
ABSTRACT	x
CAPITULO I.....	1
MARCO REFERENCIAL	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	2
1.3 Problema	4
1.4 Formulación del Problema.....	5
1.5 Objetivos.....	5
1.5.1 Objetivo General	5
1.5.2 Objetivos Especificos.....	5
1.6 Hipótesis.....	6
1.7 Justificaciones	6
1.7.1 Económica	6
1.7.2 Social	6
1.7.3 Científica.....	6
1.8 Alcances y Limites.....	6
1.8.1 Alcances	7
1.8.2 Límites	7
CAPITULO II.....	8
2 MARCO TEORICO	8
2.1 Sistema.....	8
2.2 Simulación.....	8
2.3 Simulación de Sistemas Continuos y Sistemas Discretos.....	9
2.4 Modelos.....	10
2.5 Tipos de Modelos	11

2.5.1	Modelos Mentales	11
2.5.2	Modelos Verbales	11
2.5.3	Modelos Físicos	11
2.5.4	Modelos Matemáticos	11
2.6	Clasificación de los Modelos Matemáticos	12
2.6.1	Determinista o Estocástico.....	12
2.6.2	Estático o Dinámico	12
2.6.3	Tiempo Continuo o Discreto.....	12
2.7	Modelado y Simulación de Tiempo Discreto.....	13
2.8	Modelo de Simulación	13
2.9	Proceso de Simulación.....	14
2.10	Autómatas Celulares	15
2.10.1	Definición de Autómata Celular.....	16
2.10.2	Definición Formal de un Autómata Celular.....	17
2.11	Modelo de NaSch.....	22
2.11.1	Diagrama Fundamental Densidad- Flujo.....	23
2.11.2	Flujo	24
2.11.3	Densidad.....	24
2.12	Fases del Transito.....	24
2.12.1	Flujo de Transito Libre	24
2.12.2	Flujo de Transito Congestionado	24
2.13	Tránsito Vehicular	25
2.14	Enfoques para Modelar el Flujo Vehicular.....	26
2.14.1	Enfoque Macroscópico.....	26
2.14.2	Enfoque Cinético.....	27
2.14.3	Enfoque microscópico.....	27
2.15	Tránsito Vehicular y Autómatas Celulares	28
CAPITULO III.....		30
3	MARCO APLICATIVO.....	30
3.1	Marco Experimental.....	30
3.2	Descripción Informal del Modelo	30
3.2.1	Componentes.....	32
3.2.2	Variables descriptivas	32
3.2.3	Reglas de interacción.....	33

3.3	Descripción Formal del Modelo	34
3.4	Recolección de Datos.....	39
3.5	Construcción y Verificación del Programa en Computador	41
CAPITULO IV		46
4	PRUEBAS Y RESULTADOS	46
4.1	Ejecución de Pruebas del Modelo	46
4.2	Análisis de Resultados	50
CAPITULO V		52
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
5.1	Conclusiones	52
5.2	Recomendaciones.....	53
5.3	Trabajos Futuros	53
6	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	55
ANEXOS.....		57

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Representación de un AC unidimensional.....	18
Figura 2.2. Representación de un AC unidimensional.....	18
Figura 2.3. AC unidimensional con condiciones de frontera periódic	19
Figura 2.4 a) AC 2-dimensional, b) con condiciones de frontera periódica.....	19
Figura 2.5. Fronteras obtenidas por extender la vecindad de célula principal. Las células en gris representan las células virtuales agregadas de la lattice.	20
Figura 2.6. Vecindad radio r.	21
Figura 2.8. Carril en un modelo de tránsito vehicular con un autómata celular Fuente (Fernandez, 2009)	23
Figura 2.9 Diagrama fundamental típico para el modelo NaSch	23
Figura 2.10. Tránsito Vehicular en el Prado Paceño	25
Figura 3.1. Arreglo de 10 celdas.....	31
Figura 3.2. Carriles adyacentes de tamaño L.	35
Figura 3.3. Cambio de carril de forma transversal	36
Figura 3.4. Dinámica del Cambio de Carril con $g_s=1$ y $g_p=3$	38
Figura 3.5. Diagrama de Flujo para la condición de activación	41
Figura 3.6. Diagrama de Flujo de Ecuaciones de Avance	41
Figura 3.7. Diagrama de Flujo del Método Rutina NaSch.....	42
Figura 3.8. Diagrama de Flujo Desaceleración por Causa de otros Vehículos.....	42
Figura 3.9. Diagrama de Flujo Aleatoriedad	43
Figura 3.10. Diagrama de Cambio de Carril	43
Figura 3.11. Ventana del Prototipo de Simulación.....	44
Figura 3.12. a) Diagrama flujo-densidad, b) Diagrama espacio-tiempo.....	45
Figura 3.14 Modelo Propuesto carril Izquierdo	46
Figura 3.13. Comparación del modelo NaSch y el modelo de 2 carriles	49
Figura 3.15. $D = 0.2$ Resulta el Flujo máximo 0.63.....	50
Figura 3.16. Modelo propuesto, aplicado en un solo carril.	50

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Regla de transición de un AC unidimensional binario.....	21
Tabla 3.1. Muestra número de vehículos por hora	39
Tabla 3.2. Densidad Flujo	40
Tabla 3.3. Flujo máximo calculado en una hora	40

RESUMEN

En este trabajo de tesis se propone un modelo bajo el enfoque microscópico que utiliza autómatas celulares para el flujo de tránsito vehicular de una vía con dos carriles que se desplazan de izquierda a derecha.

El modelo propuesto es un modelo que contempla reglas de cambio de carril, en una lattice para el modelado de la vía con condición de frontera periódica, se usa vehículos del mismo tipo, se consideran su velocidad máxima y mínima.

Los resultados de las simulaciones nos permiten obtener comportamiento apegados a la realidad del flujo en una vía con dos carriles, los resultados obtenidos son comparados con datos reales, por vía los parámetros del diagrama fundamental.

Palabras Clave: Modelo de flujo de tránsito vehicular, Autómata celular, Diagrama fundamental.

ABSTRACT

In this thesis a model under the microscopic approach using cellular automata for the flow of vehicular traffic a road with two lanes moving from left to right is proposed.

The proposed model is a model that provides lane-change rules in a lattice to model the way with periodic boundary condition, vehicles of the same type is used, consider the maximum and minimum speed.

The results of the simulations allow us to obtain behavior attached to reality flow on a road with two lanes, the results are compared with real data, via the parameters of the fundamental diagram.

Keywords: Model vehicular traffic flow, cellular automata, basic diagram.

CAPITULO I

MARCO REFERENCIAL

1.1 Introducción

Durante las últimas décadas se ha visto un notable crecimiento en las investigaciones dedicadas a solucionar distintos problemas de transporte. Dentro de estos problemas, el desarrollo de sistemas de control vehicular se ha convertido en uno de los más estudiados. Este aumento de interés en los problemas de tránsito se debe al creciente aumento de vehículos, lo cual produce serios problemas de congestión en centros urbanos, además de efectos nocivos cada vez más notorios.

En las últimas décadas se ha experimentado un crecimiento en el número de vehículos que circulan por las regiones del Estado Plurinacional de Bolivia. De acuerdo con los datos obtenidos a través del Registro Único para la Administración Tributaria Municipal (RUAT), el parque automotor tuvo un incremento del 14% hasta el mes de octubre de la presente gestión, el mismo contribuye con el congestionamiento que se presenta frecuentemente en las principales ciudades del país, lo que significa un problema al cual las autoridades no han propuesto una solución definitiva.

En el departamento de La Paz el municipio paceño ha tratado de emplear medidas temporales, como ser el “Plan de Tráfico y Vialidad” el mismo restringe el ingreso vehicular al casco urbano central, mediante el “sistema de día - placa” aplicada en el horario comprendido entre las 08:00 a 20:00 horas.

La ciudad de La Paz ha experimentado en los últimos años múltiples y descontrolados procesos de deterioro de la calidad de vida de sus habitantes con congestionamiento vehicular, colas de tráfico, bajas velocidades de movilidad, intersecciones bloqueadas, dificultades de acceso al centro de la ciudad, además del elevado índice de contaminación acústica.

Por otra parte, el incremento del parque automotor a través de los últimos años se ha visto influenciado por el pensamiento norteamericano adquirido por América Latina, en el cual, el desarrollo personal se consigue con la adquisición de un vehículo, que significa un incremento simbólico de las características socio-económicas desplazando a un segundo plano la concepción clásica de un automóvil como medio de transporte.

Se han propuesto varios modelos para entender, explicar y reproducir la gran variedad de fenómenos que el flujo de tráfico exhibe.

Una de las metodologías que se utilizan actualmente para el estudio de sistemas complejos como lo es el flujo de tránsito vehicular es el modelado y simulación; bajo los siguientes enfoques:

- ◆ Macroscópicos, se basan en ecuaciones de la dinámica de fluidos y su principal característica es el flujo global.
- ◆ Microscópicos, analizan el flujo tratando de manera individual a los vehículos, entrando en esta clasificación los modelos con autómatas celulares.
- ◆ Cinéticos, son un paso intermedio entre los modelos macroscópicos y microscópicos.

En esta tesis se propone un modelo de simulación para mostrar la dinámica del tránsito vehicular bajo el enfoque microscópico, para representar la circulación e interacción de los vehículos, en una vía con dos carriles.

1.2 Antecedentes

El interés en el tema de la dinámica del tráfico vehicular tiene tiempo siendo estudiado, en 1935 Greenshields ya había realizado estudios sobre el tema, en la década de los cincuenta se publicó del tema en revistas de investigación de operaciones e ingeniería, destacando el diagrama fundamental mostrando la relación entre el flujo de tránsito y la densidad vehicular.

Más de 50 años después, la situación se ha deteriorado, muchas ciudades sufren de congestión de tránsito vehicular. Sin duda alguna, un sistema de transporte eficiente es esencial para el funcionamiento y éxito de las sociedades modernas.

Investigadores Físicos de manera conjunta con Matemáticos y Químicos estuvieron motivados en pensar acerca de cómo podrían contribuir al campo de la dinámica del tránsito vehicular.

En 1992, Nagel y Schreckenberg (NaSch) propusieron un modelo con Autómatas Celulares probabilísticos para la modelación del tráfico vehicular en una vía rápida de un solo carril. Este modelo usando reglas simples es capaz de reproducir los fenómenos básicos hallados en el tráfico real.

En el 2000 Knospe, Sarten, Schadschneider & Schreckenberg (K.S.S.S) propusieron un modelo para el flujo de tránsito vehicular análogo al modelo de NaSch se basa en la suposición de que los conductores tendrán una estrategia para conducir sus vehículos que abarca cuatro aspectos que se basa en las brechas existentes entre los vehículos consecutivos.

Después de realizar la investigación se presenta algunas Tesis que se relacionan con el tema de investigación.

La Tesis “Modelo de Simulación para el Tráfico Vehicular”, aborda el desarrollo de un modelo el cual está diseñado para realizar pruebas de simulación de acuerdo a las características que presenta el tráfico vehicular en la ciudad de La Paz. (Henry, 2009).

La Tesis “Simulación de Tráfico Vehicular con Autómatas Celulares Unidimensionales” presenta un modelo computacional basado en autómatas celulares en el que se permita variar la densidad de vehículos, variar las velocidades máximas y mínimas de los vehículos. (Hoyo, 2006).

La Tesis “Modelo Predictivo para el análisis del tráfico vehicular en carreteras con redes neuronales artificiales” plantea la construcción de un modelo predictivo apoyado en redes neuronales artificiales que pueda ser utilizado para el análisis de la composición de tráfico promedio diario anual en las carreteras bolivianas. (Maldonado, 2013)

La Tesis “Modelación y Simulación de una vía rápida con rampas Usando Automatas Celulares”, propone un modelo para una vía rápida de tres carriles con rampas de entrada y salida, con el objetivo de hacer el modelo más realista a partir de un modelo car-following. (Castillo, 2009).

1.3 Problema

El incremento en el número de vehículos dentro de las ciudades, hace que las vías e infraestructura que se tiene sean insuficientes, produciendo problemas de tráfico vehicular, entre los que podemos mencionar:

- ◆ Accidentes automovilísticos.
- ◆ Pérdida de tiempo en los recorridos.
- ◆ Cantidad de automóviles generan un deterioro en las vías, lo cual aunque hace que también se deterioren los vehículos, contribuyen con la congestión al disminuir los espacios disponibles para la fluidez al transporte.
- ◆ La adquisición de vehículos de uso privado, engrosan el número de coches en las vías que generan congestión vehicular.
- ◆ Los vehículos deteriorados tienen mayor probabilidad de generar accidentes.

Varios son los esfuerzos por encontrar soluciones a estos problemas. Ejemplo, incrementar el número de vialidades y la infraestructura, pero es una opción de alto costo económico, la optimización de la infraestructura vial requiere reproducir situaciones de tráfico vehicular adecuadas que permitan realizar pruebas de investigación, lo cual es complicado, pues produciría escenarios difíciles como accidentes viales, congestiones, etc.

Ante la ausencia de herramientas que favorezcan a reproducir estas situaciones de tránsito. Viene a darse el presente trabajo, con la finalidad de apoyar al estudio de la dinámica del tránsito vehicular.

1.4 Formulación del Problema

La dificultad de organizar el tráfico vehicular en una ciudad demanda altos costo y para mitigar esa dificultad se debe entender cómo actúa el tránsito vehicular por esta razón se plantea opciones en simulación para comprender ese comportamiento.

¿Cómo reproducir los fenómenos básicos encontrados en la dinámica del tránsito vehicular?¹

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Formular un modelo de simulación para reproducir los fenómenos básicos¹ de la dinámica del tránsito vehicular.

1.5.2 Objetivos Específicos

- ◆ Revisar el modelo de flujo de tráfico vehicular en un solo carril propuesto por K.Nagel y M.Schreckenberg.
- ◆ Obtener información del enfoque microscópico.
- ◆ Examinar la teoría sobre los Autómatas Celulares usada para el fenómeno del tránsito vehicular.
- ◆ Desarrollar el prototipo del programa de simulación.
- ◆ Analizar resultados.

¹ Se refiere al comportamiento en una vía con dos carriles donde se puede cambiar de carril, acelerar, disminuir la velocidad, el desplazamiento del vehículo con cierta velocidad y los fenómenos que este puede provocar en el sistema.

1.6 Hipótesis

Mediante el enfoque microscópico se puede simular los fenómenos básicos de la dinámica del tránsito vehicular.

1.7 Justificaciones

1.7.1 Económica

El costo que implica el diseño de este proyecto, tiene un costo alto en indagación, pero el beneficio que traerá será mayor ya que la simulación podrá entender la dinámica del flujo de tránsito vehicular, conocer las causas y consecuencias que este genera, además que con este se podrá reproducir este comportamiento. Evitando hacer experimentos con los vehículos del tráfico real.

1.7.2 Social

La presente investigación beneficiará a los usuarios del transporte, a los propietarios de un vehículo y a los peatones ya que los experimentos se harán en el simulador sin causar inconvenientes en la población y sin generar contaminación en comparación con hacer los experimentos en el tráfico real.

1.7.3 Científica

Con la aplicación del enfoque microscópico en el diseño del modelo de simulación se contribuye a la comprensión de la dinámica del tráfico vehicular, permitiendo observar el comportamiento de cada individuo en una vía.

Contribuyendo así al avance de la informática en el estudio de los fenómenos de tráfico vehicular.

1.8 Alcances y Limites

Los límites y alcances de la tesis, se especifican a continuación:

1.8.1 Alcances

El modelo de simulación de la dinámica del tránsito vehicular tendrá los siguientes alcances:

- ◆ Velocidad mínima y máxima al que puede llegar cada vehículo.
- ◆ Desplazamiento de los vehículos.
- ◆ Aceleración de cada vehículo.
- ◆ Distancia existente entre vehículos.
- ◆ Cambio de carril

1.8.2 Límites

En el desarrollo del modelo no se considerara:

- ◆ No considera colisiones entre los vehículos
- ◆ En la vía no se toma en cuenta los semáforos
- ◆ No se consideran los desvíos en la vía
- ◆ No se considera las luces de frenado.
- ◆ No se considera vehículos estacionados.
- ◆ No se considera ni ningún tipo de obstáculo en la vía que puedan obstruir el desplazamiento de los vehículos.

CAPITULO II

2 MARCO TEORICO

2.1 Sistema

Un sistema es un conjunto de elementos relacionados entre sí, de forma tal que un cambio en un elemento afecta al conjunto de todos ellos. Los elementos relacionados directa o indirectamente con el problema, y solo estos, forman el sistema que se quiere estudiar. (Dinamica de Sistemas, 2013)

2.2 Simulación

Hasta el latín hay que caminar para encontrar el origen etimológico del término simulación, que emana de la unión de dos componentes léxicos latinos: la palabra “similis”, que puede traducirse como “parecido”, y el sufijo “-ion”, que es equivalente a “acción y efecto”. Simulación es la acción de simular. Este verbo refiere a representar algo, imitando o fingiendo lo que no es. (Definición.DE, 2015)

Definiciones más aceptadas y difundidas según: (Coss, 1995)

“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”. Thomas H. Naylor

Esta definición en un sentido muy amplio, puede incluir desde una maqueta, hasta un sofisticado programa de computadora, *y en sentido más estricto tenemos:*

“Simulación es una técnica numérica para realizar experimentos en una computadora digital. Estos experimentos involucran ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos que describen el comportamiento de sistemas de negocios, económicos, sociales,

biológicos, físicos o químicos a través de largos periodos de tiempo”. H. Maisel y G. Gnugnoli.

Una definición más formal es la de Robert E. Shannon: “La simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema”.

Entonces se puede definir a la simulación como la experimentación con un modelo que imita ciertos aspectos de la realidad. Esto permite trabajar en condiciones similares a las reales, pero con variables controladas y en un entorno que se asemeja al real pero que está creado o acondicionado artificialmente.

La idea es que la simulación permita comprobar el comportamiento de una persona, de un objeto o de un sistema en ciertos contextos que, si bien no son idénticos a los reales, ofrecen el mayor parecido posible. Así, es posible corregir fallos antes de que la experiencia, efectivamente, se concrete en el plano de lo real.

2.3 Simulación de Sistemas Continuos y Sistemas Discretos

La manera de efectuar el seguimiento temporal de los cambios en el modelo, que en correspondencia con los cambios en el sistema es representado por el modelo, nos lleva a la aparición de dos importantes categorías dentro de la Simulación de Sistemas según que los cambios sean continuos o discretos. En el primer caso se supone que la naturaleza del sistema permite cambios de estado continuos, determinados por cambios continuos en los valores de las variables que representan el estado del sistema, mientras que en el segundo los cambios solo pueden tener lugar en instantes discretos en el tiempo.

Para los sistemas con cambios continuos, dado que nuestro principal interés a la hora de simular su comportamiento será reproducirlos, los sistemas de ecuaciones

diferenciales serán la forma más adecuada de representarlos. Denominaremos simulación continua a la simulación basada en este tipo de modelos.

Para los sistemas discretos, el seguimiento de los cambios de estado requiere la identificación de qué es lo que causa el cambio y cuando lo causa, lo que denominaremos un suceso, las ecuaciones del modelo se convierten entonces en las ecuaciones y relaciones lógicas que determinan las condiciones en que tiene lugar la ocurrencia de un suceso. Este tipo de simulación, conocida con el nombre de Simulación Discreta, consiste en el seguimiento de los cambios de estado del sistema que tienen lugar como consecuencia de la ocurrencia de una secuencia de sucesos.

2.4 Modelos

Un modelo es una representación de un objeto, sistema o idea, de forma diferente al de la entidad misma. El propósito de los modelos es ayudarnos a explicar, entender o mejorar un sistema. Un modelo de un objeto puede ser una réplica exacta de éste o una abstracción de las propiedades dominantes del objeto. (Universidad Nacional de Colombia)

"un modelo es un objeto, concepto o conjunto de relaciones que se utiliza para representar y estudiar de forma simple y comprensible una porción de la realidad empírica"

Mediante el modelado se busca mejorar el conocimiento y la comprensión de un fenómeno o proceso y ello involucra el estudio de la interacción entre las partes de un sistema y el sistema como un todo. Desde esta perspectiva es apropiado afirmar que las teorías están integradas por dos grandes elementos conceptuales no del todo separables: a) Un formalismo, es decir, un aparato matemático con unas reglas operativas para calcular y b) una interpretación, es decir, una ontología que cuenta, en correspondencia con el formalismo, cuál es la imagen de los fenómenos, de los procesos y del mundo que la teoría pretende describir o explicar. (UTADEO).

2.5 Tipos de Modelos

Pueden distinguirse cuatro tipos de modelo: mental, verbal, físico y matemático.

2.5.1 Modelos Mentales

En la vida diaria empleamos modelos mentales para comprender y predecir el comportamiento de los sistemas. Por ejemplo, considerar que alguien es “amable” constituye un modelo del comportamiento de esa persona.

Este modelo nos ayuda a responder, por ejemplo, a la pregunta de cómo reaccionara si le pedimos un favor.

También disponemos de modelos de los sistemas técnicos, que están basados en la intuición y en la experiencia.

2.5.2 Modelos Verbales

Son Modelos en los cuales el comportamiento del sistema es descrito mediante palabras: Los sistemas expertos son ejemplos de modelos verbales formalizados.

Es importante diferenciar entre los modelos mentales y los verbales.

2.5.3 Modelos Físicos

Tratan de imitar al sistema real. Son los modelos físicos, tales como las maquetas a escala que construyen los arquitectos, diseñadores de barcos o aeronaves, para comprobar las propiedades estéticas, aerodinámicas.

2.5.4 Modelos Matemáticos

En el modelo matemático, las relaciones entre las magnitudes del sistema que pueden ser observadas son descritas mediante relaciones matemáticas.

La mayoría de las teorías sobre las leyes de la naturaleza son descritas empleando modelos matemáticos.

En algunos casos, las relaciones matemáticas que constituyen los modelos son sencillas y pueden resolverse analíticamente. Sin embargo, en la mayoría de los casos los modelos no pueden resolverse analíticamente y deben estudiarse con ayuda del ordenador aplicando métodos numéricos. Este experimento numérico realizado sobre el modelo matemático recibe el nombre de simulación.

2.6 Clasificación de los Modelos Matemáticos

Existen diferentes clasificaciones de los modelos matemáticos, atendiendo a diferentes criterios. A continuación, se describen algunas de las clasificaciones más Comúnmente usadas. Clasificación según (Urquía, 2014)

2.6.1 Determinista o Estocástico

Un modelo matemático es determinista cuando todas sus variables de entrada son deterministas. Es decir, el valor de cada una de ellas es conocido en cada instante.

2.6.2 Estático o Dinámico

Un modelo de simulación estático es una representación de un sistema en un instante de tiempo particular, o bien un modelo que sirve para representar un sistema en el cual el tiempo no juega ningún papel. Por otra parte, un modelo de simulación dinámico representa un sistema que evoluciona con el tiempo. Tiempo Continuo o Discreto.

2.6.3 Tiempo Continuo o Discreto

Un modelo de tiempo continuo está caracterizado por el hecho de que el valor de sus variables de estado puede cambiar infinitas veces, es decir, de manera continua en un intervalo finito de tiempo.

Mientras tanto en un modelo de tiempo discreto los cambios pueden ocurrir únicamente en instantes separados en el tiempo. Sus variables de estado pueden cambiar de valor sólo un número finito de veces por unidad de tiempo.

2.7 Modelado y Simulación de Tiempo Discreto

Los modelos de tiempo discreto son normalmente el tipo de modelo más fácil de entender de manera intuitiva. En este formalismo, el modelo va ejecutándose en sucesivos instantes de tiempo, equiespaciados entre sí. El intervalo de tiempo entre dos instantes sucesivos se denomina periodo de muestreo.

En cada instante, el modelo se encuentra en un estado, recibe unas entradas y genera unas salidas. El modelo permite predecir, a partir de su estado y de sus entradas actuales, cuáles son sus salidas actuales y cual será su estado en el siguiente instante de tiempo. El estado en el siguiente instante normalmente depende del estado actual y de las entradas actuales al modelo. (Urquía, 2014).

2.8 Modelo de Simulación

Un modelo de simulación es un instrumento que permite imitar el comportamiento de un sistema real mediante un artificio físico o matemático. La simulación de sistemas implica la construcción de modelos. El objetivo es averiguar qué pasaría en el sistema si acontecieran determinadas hipótesis. Desde muy antiguo la humanidad ha intentado adivinar el futuro. Ha querido conocer qué va a pasar cuando suceda un determinado hecho histórico. La simulación ofrece, sobre bases ciertas, esa predicción del futuro, condicionada a supuestos previos. para ello se construyen los modelos, normalmente una simplificación de la realidad. surgen de un análisis de todas las variables intervinientes en el sistema y de las relaciones que se descubren existen entre ellas. A medida que avanza el estudio del sistema se incrementa el entendimiento que el analista tiene del modelo y ayuda a crear modelos más cercanos a la realidad. en el modelo se estudia los hechos salientes del sistema o proyecto. Se hace una abstracción de la realidad, representándose el sistema/proyecto, en un modelo. el modelo que se construye debe tener en cuenta todos los detalles que interesan en el estudio para que realmente represente al

sistema real (modelo válido). Por razones de simplicidad deben eliminarse aquellos detalles que no interesan y que lo complicarían innecesariamente. se requiere pues, que el modelo sea una fiel representación del sistema real. No obstante, el modelo no tiene porqué ser una réplica de aquél. Consiste en una descripción del sistema, junto con un conjunto de reglas que lo gobiernan. la descripción del sistema puede ser abstracta, física o simplemente verbal. Las reglas definen el aspecto dinámico del modelo. Se utilizan para estudiar el comportamiento del sistema real. [Bligo.com, 1012]

2.9 Proceso de Simulación

Como proceso que es, la simulación se desarrolla a través de una serie de pasos que estructuran coherentemente el modelo y su funcionamiento en el sistema, lo desarrollan, validan, operan y analizan los resultados obtenidos.

1. Descripción Informal del Modelo: es una descripción verbal lo suficientemente completa para evitar posibles errores y deficiencias en la modelación y simulación, esto influirá en la especificación del modelo y la construcción del programa de simulación. Incluye las siguientes tres partes.
 - Componentes: son las partes para el cual está construido el modelo.
 - Variables Descriptivas: sirven como herramienta para describir la condición de los componentes en un punto en el tiempo.
 - Interacción entre Componentes: Son las relaciones por las que los componentes tienen influencia, alterando sus condiciones y determinando la evolución de los modelos, actúan en el tiempo, sus conceptos son gráficamente ilustrados.
2. Descripción Formal del Modelo: Se debe especificar los espacios a los que pertenecen todas las variables descriptivas y dar una descripción exacta de la función de transición de estados, que dice cómo cambia el estado del sistema con el tiempo. (Zeigler, 1984)

3. **Recolección de datos:** En esta etapa se recogen los datos en terreno de todas aquellas variables que definen las condiciones de entrada del modelo. Es decir, se debe disponer de los datos que describen el sistema, que representen su comportamiento y su eficiencia actual, como también recoger los datos que describan las alternativas que se van a evaluar. Los datos que describen el sistema son aquellos que están vinculados con la estructura del sistema, con los componentes individuales del sistema, con la interacción entre ellos, y con las operaciones que se realizan en el sistema. Con esta información se genera la descripción de los estados del sistema.
4. **Construcción y verificación del programa en computador:** es la obtención del programa de computadora que representa el modelo. Se debe elegir un lenguaje de programación con el que se construirá el modelo.
5. **Ejecución de pruebas del modelo:** Ver que el modelo de simulación este bien construido respecto a las situaciones simuladas.
6. **Análisis de Resultados:** Verificar que los resultados obtenidos para tomar una correcta decisión. (Raczynski, 1993)

2.10 Autómatas Celulares

Según (Matínez, 2014) , Históricamente la teoría de autómatas celulares puede clasificarse en tres etapas con un alto grado de estudio.

Primera etapa: El precursor de la teoría de Autómata Celular (AC) John von Neumann. A principios de los años 50's desarrolla el análisis para describir un sistema con la capacidad de soportar dos principales características: sistemas complejos y sistemas con la capacidad de auto-reproducción. El desarrollo de esta nueva teoría además es influenciada por Stanislaw Ullam, proponiendo a von Neumann implementar su nueva teoría en un espacio celular discreto.

Segunda etapa: A finales de los 60's cuando Martin Gardner divulga en su columna científica Mathematical Games del Scientific American en 1969, el autómata celular propuesto por John Horton Conway, mejor conocido como "El Juego de la Vida." Este

autómata celular sería presentado como un juego ecológico durante una serie de resultados establecidos a principios de los años 70's.

Varios de los resultados más interesantes serían obtenidos en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del MIT con las facilidades gráficas de una computadora PDP-6, sobresaliendo los resultados obtenidos por William Gosper y sus estudiantes. El autómata celular de Conway había logrado captar la atención de varios investigadores, principalmente por su sistema de estructuras complejas.

Estas estructuras complejas fueron conocidas como objetos Life, donde destacan los gliders y los generadores de gliders (también referidos como partículas o localidades móviles).

Tercera etapa: A mediados de los años 80's con Stephen Wolfram precursor del estudio de autómata celular en una dimensión. Wolfram inicia sus investigaciones aplicando varios conceptos de dinámica no-lineal y mecánica estadística, explotando muchas de las facilidades gráficas que en ese tiempo ya se tenían, por lo que se podían realizar muchos estudios experimentales. Un dato importante, es que a diferencia de los modelos propuestos por von Neumann y Conway, donde las funciones representaban números muy grandes y cada autómata tiene un propósito específico para resolver un problema. Wolfram realiza un estudio sistemático tomando un conjunto de reglas y estudia sus evoluciones. Esta idea lo lleva a una búsqueda por establecer una clasificación dentro de las evoluciones de todos los autómatas de cierto grado. Dicha clasificación es conocida como las "clases de Wolfram".

2.10.1 Definición de Autómata Celular

Un Autómata Celular (AC) es un sistema matemático discreto en tiempos y espacio, caracterizado por la interacción local y forma de evolución inherentemente paralela. (Hachinski, 2001)

Los modelos de Autómatas Celulares (AC) son interesantes por la velocidad en la

que muestran resultados y el comportamiento que se genera de una dinámica compleja mientras el autómata está en ejecución, en donde se pueden ver fenómenos interesantes.

La velocidad de respuesta y eficiencia con la cual se calcula un fenómeno de estudio es consecuencia de las propiedades siguientes, las cuales a su vez son consideradas precondiciones ideales para el cómputo en paralelo:

- a) Discretización del espacio en células idénticas j (espacios en la Lattice) de tamaño Δx .
- b) Número finito de posibles estados $g(x)$.
- c) Actualización síncrona en pasos de tiempo discreto $t = i \Delta t$.
- d) Las reglas de actualización son aplicadas de manera global, las cuales se basan en interacciones en un rango pequeño (llamado vecindario) y un número finito de células vecinas.

Es por ello que tienen una amplia gama de aplicaciones, que van desde simulaciones realistas de los medios granulares, modelado de fluidos, modelado de mercado de valores, modelado de cáncer, modelado de avalanchas así como de fenómenos magnéticos. Su aplicación en la dinámica del tránsito vehicular ha estimulado una enorme cantidad de investigaciones sobre este tópico, dirigidas al entendimiento de las inestabilidades del tránsito vehicular, las cuales son responsables del surgimiento de los congestionamientos.

2.10.2 Definición Formal de un Autómata Celular

2.10.2.1 Definición de Lattice

Una "lattice" o "retícula" es un arreglo uniforme, formado por objetos idénticos llamados "células". Este arreglo puede ser n-dimensional, pero para efectos de simulación de sistemas naturales se implementa de 1, 2 ó 3 dimensiones, de tamaño finito.

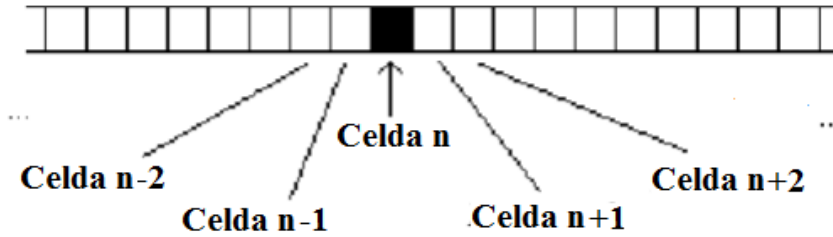


Figura 2.1. Representación de un AC unidimensional

Fuente (Elaboración Propia)

La definición de lattice por si misma nos permite considerar lattices de tamaño infinito, pero en la práctica esta implementación resulta imposible, es por eso que los AC son representados como sistemas en espacios finitos, a estas condiciones que nos permiten limitar el espacio de operación del AC las llamamos condiciones de frontera.

2.10.2.2 Condiciones de Frontera

- a) **Frontera Periódica** Esta condición de frontera nos permite tomar el espacio que utilizamos para representar el AC de manera continua (Figura 2.4-a), uniendo los extremos del espacio de acción, en el caso de un AC 1-dimensional (Figura 2.2) el espacio de acción queda representado como un anillo (Figura 2.3) y para un AC2-dimensional (Figura 2.4-a) el espacio se curva para formar un toroide (Figura 2.4-b).



Figura 2.2. Representación de un AC unidimensional

Fuente (Hoyo, 2006)

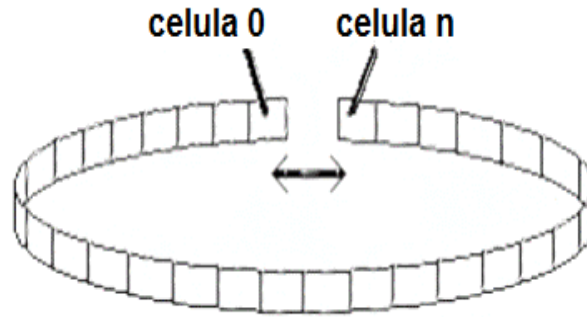


Figura 2.3. AC unidimensional con condiciones de frontera periódica

Fuente (Hoyo, 2006)

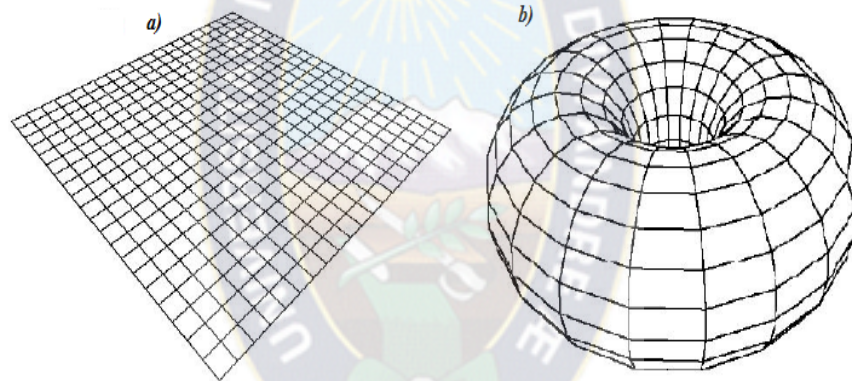


Figura 2.4 a) AC 2-dimensional, b) con condiciones de frontera periódica

Fuente (Trujillo, 2009)

- b) **Frontera Fija o Abierta:** Esta condición de frontera completa la vecindad con células virtuales con un valor preasignado ver Figura 2.4-a.
- c) **Frontera Adiabática:** Condición de frontera obtenida por la duplicación del valor de la célula cercana a la célula virtual ver Figura 2.4-b.
- d) **Frontera Reflectante:** obtenida de copiar el valor de otros vecinos en la célula virtual Figura 2.4-c.

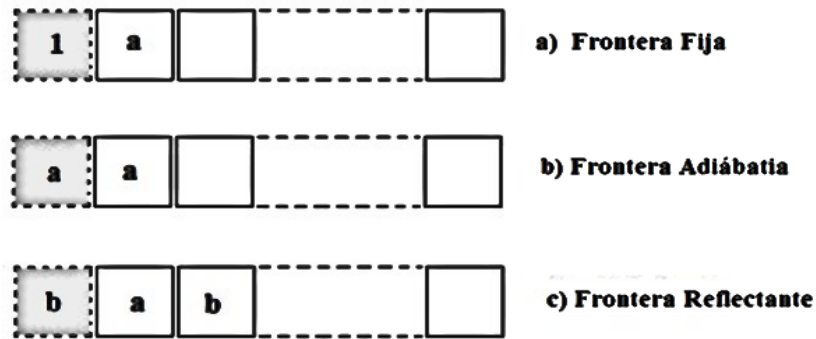


Figura 2.5. Fronteras obtenidas por extender la vecindad de célula principal. Las células en gris representan las células virtuales agregadas de la lattice.

Fuente (Hachinski, 2001)

2.10.2.3 Definición de la tupla AC

Un AC es una 4-tupla $AC = (L, S, V, F)$ donde:

L : Es una retícula regular y $L = \{c \in C\}$ para una lattice d -dimensional.

S : Es el conjunto finito de todos los posibles estados de las células, $c \in L$.

V : Es el conjunto finito de células que definen la vecindad para una célula.

$F: F \rightarrow f$. Es una función de transición aplicada simultáneamente a las células que conforman la lattice.

La actualización en el estado de las células requiere que se conozca el estado de las células vecinas.

2.10.2.4 Definición de Vecindad

Una vecindad para una célula $c \in L$ es $V(c) = \{r_1, r_2, \dots, r_n | r_i \in L, i = 0, 1, 2, \dots, n\}$ es decir, una vecindad es un conjunto de células para las cuales la célula c es el punto de referencia para el área de influencia.

En el caso de AC 1-dimensionales, la vecindad para la i -ésima célula puede estar compuesta por las células adyacentes a ésta en el lado derecho e izquierdo por lo que se dice que esta vecindad es de radio r . Ve Figura 2.6.

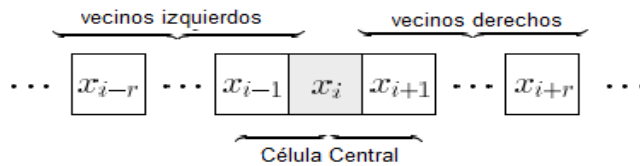


Figura 2.6. Vecindad radio r .

Fuente (Matínez, 2014)

Las reglas de transición de un AC binario unidimensional indican el estado siguiente de un nodo, dada una configuración, para el caso de utilizar un radio de vecindad $r=1$, solo se requieren 8 reglas ya que como se trabaja con un alfabeto binario 0 o 1, la vecindad está constituida por tres nodos, el central y los vecinos que tiene a cada lado. En la (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) se muestra un ejemplo de las reglas de transición para un AC binario unidimensional. En este ejemplo se representa la vecindad como un arreglo binario de dimensión 3, donde cada valor binario representa el estado de cada nodo que forma la vecindad y el estado siguiente representa el estado siguiente del nodo central a un tiempo discreto posterior, estas reglas son aplicadas de forma sincrónica en todos los nodos.

<i>Vecindad</i>	<i>Estado Siguiente</i>
000	0
001	0
010	0
011	1
100	1
101	1
110	0
111	1

Tabla 2.1. Regla de transición de un AC unidimensional binario

Fuente (Hoyo, 2006)

La función o regla de transición toma valores discretos sobre un conjunto finito (en el caso de un AC binario el conjunto es $\{0,1\}$), esto restringe los estados de las celdas a un conjunto por lo general pequeño, lo que los diferencia de otros sistemas dinámicos con las ecuaciones diferenciales parciales. (Hoyo, 2006).

2.11 Modelo de NaSch

Un Autómata Celular básico para el modelado del flujo de tránsito vehicular es el modelo Nash, este modelo consiste de un Autómata Celular de flujo de tránsito vehicular de un sólo carril. Contiene N vehículos moviéndose en una Lattice L unidimensional de células con condiciones de frontera periódicas, es decir, el número de vehículos se conserva o abiertas en donde el número de vehículos es realimentado en un extremo y perdido en el otro.

Para un tiempo t , cada célula puede estar ocupada o vacía por un vehículo, y se denota por $x(i, t)$ a la posición del vehículo $a(i, t)$ sobre L en el tiempo t ; cada vehículo tendrá en un tiempo t , un desplazamiento $v(i, t) \in \{0,1,2,\dots,v_{max}\}$, $i \in \{1,\dots,N\}$ la cual está dada en células por unidad de tiempo (el espacio y el tiempo son discretos). Con estos conceptos, la definición de brecha entre un vehículo y su predecesor puede ser reescrita como sigue:

Sea $AC = (L, S, V, F)$ un Autómata Celular que modela el flujo del tránsito vehicular y $a(i, t)$ es un vehículo en el tiempo t , tal que $a(i, t)$ tiene predecesor. La posición del vehículo $a(i, t)$ es $x(i, t)$ y la célula que lo representa es $r_a(i, t) = r_j$, es decir; $x(i, t) = j$; la posición de $a(i + 1, t)$ es $x(i + 1, t)$ y la célula que lo representa es $r_a(i + 1, t) = r_k$, es decir, $x(i + 1, t) = k$. La brecha entre $a(i, t)$ y $a(i + 1, t)$ es la distancia entre ambos vehículos, que se calcula como el número de células vacías entre $a(i, t)$ y $a(i + 1, t)$.

Es decir, si $d(i, t)$ representa la brecha entre ambos vehículos en el tiempo t se tiene que definir como:

$$d(i, t) = \begin{cases} x(i + 1, t) - x(i, t) - 1 & \text{Si } x(i + 1, t) > x(i, t) \\ x(i + 1, t) - x(i, t) + (l - 1) & \text{Si } x(i + 1, t) < x(i, t) \end{cases}$$

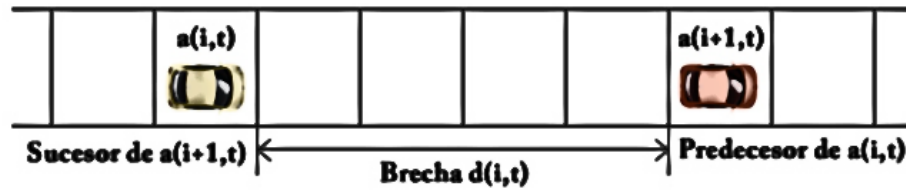


Figura 2.7. Carril en un modelo de tránsito vehicular con un autómata celular
Fuente (Fernandez, 2009)

2.11.1 Diagrama Fundamental Densidad- Flujo

Es una curva en el plano Flujo-Densidad (ver Figura 2.8) resultado de las simulaciones del tráfico vehicular en el modelo Nash.

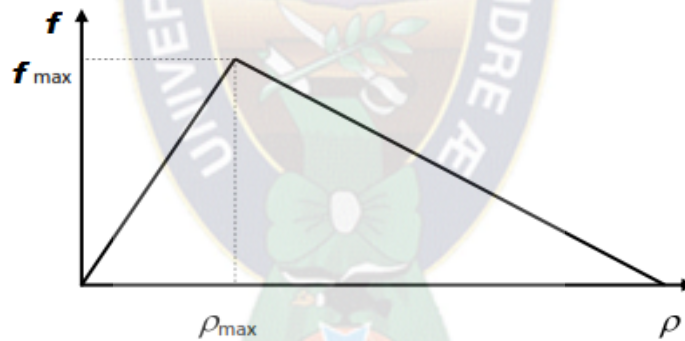


Figura 2.8 Diagrama fundamental típico para el modelo NaSch
Fuente (Fernandez, 2009)

En el Modelo de NaSch que está definido sobre un lattice L unidimensional finita de células con condición de frontera periódica, el número total de vehículos N del sistema no cambia durante la dinámica del sistema. Por lo que la densidad vehicular del modelo se define como:

$$\rho = \frac{N \text{ número total de vehiculos}}{L \text{ lattice}}$$

Sin embargo, se debe aclarar que en el flujo real el número de vehículos aumenta o disminuye con el tiempo en una vía.

2.11.2 Flujo

Se llama Flujo al número de vehículos que pasan a través de una sección fija de carretera por unidad de tiempo. Las unidades más usadas son vehículos/hora (intensidad horaria). Es la característica más importante de la circulación, ya que las demás están relacionadas con ella.

2.11.3 Densidad

Se llama densidad al número de vehículos que hay por unidad de longitud. Se puede obtener a través de una fotografía y contando los vehículos, pero raramente esta magnitud se mide directamente.

2.12 Fases del Transito

Se ha logrado observar que existen dos fases del tránsito vehicular: el flujo libre y el flujo congestionado.

2.12.1 Flujo de Transito Libre

Hace referencia al flujo de vehículos que se mueven en una vía de tal manera que casi no existe interacción de los vehículos entre sí, permitiendo que los conductores circulen libremente y a velocidad máxima permitida.

2.12.2 Flujo de Transito Congestionado

Distingue 2 Fases diferentes:

- **Amplios Congestionamientos:** son una estructura de tráfico localizada, limitada por dos extremos donde la velocidad de los vehículos cambia

drásticamente. La velocidad y el flujo es casi nulo, así mismo la velocidad en los diferentes carriles es la misma.

- **Transito Sincronizado:** La velocidad de los vehículos entre los diferentes carriles de una autopista tienden a sincronizarse con ondas de paro- avance. Los vehículos tienden a cambiarse al carril con mayor velocidad, lo cual incrementa la densidad en ese carril y en consecuencia disminuye la velocidad, ocasionando una sincronización.

2.13 Tránsito Vehicular

El tránsito es el concepto que utilizamos en nuestra lengua para denominar a aquel movimiento y flujo de vehículos que circulan por una calle, una ruta, una autopista o cualquier otro tipo de camino, así como también del peatón, quien es el más vulnerable.

Sin lugar a dudas, el tránsito es una cuestión que experimentamos y está íntimamente vinculada a las movilizaciones que realizamos por la ciudad cuando las personas vamos a trabajar, a estudiar o a realizar cualquier otro tipo de actividad que implica transitar por las calles y vías de una ciudad. (DEFINICION ABC, 2007)



Figura 2.9. Tránsito Vehicular en el Prado Paceño

Fuente: (Elaboración propia)

El tránsito vehicular o automovilístico (también llamado tráfico vehicular, o

simplemente tráfico) es el fenómeno causado por el flujo de vehículos en una vía, calle o autopista. Se presenta también con muchas similitudes en otros fenómenos como el flujo de partículas (líquidos, gases o sólidos) y el de peatones.

La diferenciación que se hace en inglés entre las palabras "tránsito" y "tráfico" corresponde la primera ("transit") a lo que en español puede llamarse "transportarse", mientras que la segunda ("traffic") es aproximadamente igual a "tránsito vehicular". En español suele utilizarse "tránsito" para describir el flujo de elementos con movilidad (pasar de un lugar a otro por una vía) y "tráfico" a los elementos transportados por otro medio (también se refiere a comerciar, negociar con el dinero y las mercancías, o a hacer negocios no lícitos). (Transito, 1978)

2.14 Enfoques para Modelar el Flujo Vehicular

El movimiento de vehículos en carreteras o en una red urbana, se puede estudiar en escalas diferentes y dependiendo de la escala escogida tendremos descripciones distintas. Por ejemplo, si vemos el movimiento de los vehículos a gran escala, tendremos una situación en la que se observa el movimiento global y no podemos distinguir cada vehículo individual. Asimismo, cuando observamos el movimiento de cada vehículo, perdemos la vista global de los fenómenos. De manera somera podemos mencionar tres enfoques para el estudio de la dinámica del flujo vehicular. (Metropolitana, 2011)

2.14.1 Enfoque Macroscópico.

En este caso el flujo de vehículos en la carretera se concibe como el flujo compresible de un fluido descrito por variables macroscópicas asociadas al comportamiento colectivo del sistema. Para ello necesitamos un número grande de vehículos circulando en la carretera, de manera que hablar de variables como la densidad, la velocidad promedio y, algunas otras nos proporcione una medida significativa del comportamiento en el flujo. Para trabajar a lo largo de este enfoque se recurre a modelos fenomenológicos que recogen cualitativamente el comportamiento colectivo del flujo y los parámetros que intervienen en la modelación

se determinan al comparar con los datos empíricos. Existen diferentes tipos de modelos dependiendo del número de variables que se usan para la descripción. Cabe notar que algunos modelos macroscópicos pueden extraerse a partir de los modelos cinéticos que detallan un tanto la interacción entre los vehículos. (Metropolitana, 2011)

2.14.2 Enfoque Cinético.

En el enfoque cinético se habla de una función de distribución que nos dice el número de vehículos que tienen velocidad instantánea entre v y $v + dv$ y que se encuentran en un tramo de la carretera entre x y $x + dx$ al tiempo t . La función de distribución obedece una ecuación de evolución que contiene los elementos principales del cambio temporal. Uno de los términos refleja el comportamiento usual de los conductores que desean avanzar a una cierta velocidad predeterminada y tratan de alcanzarla o bien si van a una velocidad mayor deben reducirla a fin de satisfacer los requisitos propios de la carretera, esto lo hacen con un tiempo de relajamiento T . También se considera la interacción entre los vehículos a través de un término que contiene a la probabilidad de que un carro sea rebasado. Con dicha ecuación cinética es posible construir ecuaciones para las variables promediadas, que vienen a ser las variables macroscópicas que se miden a través de los detectores puestos expresamente para ello.

2.14.3 Enfoque microscópico.

Desde el punto de vista microscópico, cada vehículo puede seguirse en su trayectoria a lo largo de una carretera y estudiar la dinámica de un conjunto de carros, siguiendo reglas particulares para su movimiento. Este enfoque se conoce como enfoque microscópico y existen una gran cantidad de modelos donde, al especificar las reglas de movimiento individual se tiene una dinámica para el tránsito. (Metropolitana, 2011)

Por otra parte los modelos microscópicos se clasifican principalmente en tres: los modelos de seguimiento del vehículo (Car-following), los modelos de velocidad óptima y los modelos basados en Autómatas Celulares (AC). Los modelos de

seguimiento del vehículo son aproximaciones microscópicas que usan ideas de la mecánica newtoniana para describir el tráfico vehicular. Mientras que en los modelos de velocidad óptima, los vehículos no tratan de adoptar la velocidad de su predecesor, sino una velocidad óptima la cual depende del espaciamiento existente. Por su parte, los modelos basados en autómatas celulares (AC) son modelos microscópicos, en los cuales la dinámica vehicular depende de un conjunto de reglas de evolución local y simple, fáciles de entender, computacionalmente eficientes y suficientes para emular el desempeño que se observa en el tránsito vehicular. (Genaro J. Martínez, 2011)

2.15 Tránsito Vehicular y Autómatas Celulares

Con el rápido desarrollo de las capacidades de las computadoras, los modelos de simulación basados en autómatas celulares (AC) para el flujo de tráfico han cobrado considerable importancia. La ventaja de los modelos con AC es que son mucho más simples y capaces de realizar varios millones de actualizaciones en un segundo, y pueden modelar complejidades de carácter no lineal en los problemas de tránsito. Por tanto, pueden ser usados para simular grandes volúmenes de tráfico en redes grandes.

En general, los autómatas celulares son una idealización de sistemas físicos en los cuales tanto el espacio como el tiempo se suponen ser discretos y cada una de las unidades de la interacción pueden tener solamente un número finito de estados discretos.

El concepto de AC fue introducido en los 1950's por Von Neumann mientras formulaba una teoría abstracta para estudiar las condiciones lógicas para las máquinas computacionales auto-replicables. Fue sin embargo, debido al juego de la vida de Conway y posteriormente Wólfram, que la familia de los autómatas celulares se popularizó. Desde entonces el concepto de AC se ha aplicado para modelar una variedad amplia de sistemas. Para nuestro conocimiento el primer modelo de AC para tráfico vehicular fue introducido por Cremer y Ludwig. Sin embargo, fue gracias a la

contribución de Nagel y Schreckenberg que los modelos de AC se volvieron ampliamente conocidos en la modelación del tráfico vehicular.

En los modelos AC de tráfico, la posición, velocidad, aceleración así como el tiempo son tratados como variables discretas. En esta aproximación, un carril es representado por un lattice 1-dimensional. Cada uno de los sitios de la lattice representa una celda, la cual puede estar vacía u ocupada por a lo más un vehículo en un instante de tiempo dado, a cada paso de tiempo discreto. (Fernández, 2009)



3 MARCO APLICATIVO

En este capítulo se desarrolla la construcción del modelo de la dinámica del tránsito vehicular bajo el enfoque microscópico, para ello se requiere la teoría planteada en el capítulo anterior. En el desarrollo del modelo se llevaran a cabo las siguientes etapas:

- ◆ Descripción Informal del Modelo
 - Componentes
 - Variables Descriptivas
 - Interacción entre Componentes
- ◆ Descripción Formal del Modelo
- ◆ Recolección de datos
- ◆ Construcción y verificación del programa en computador:
- ◆ Ejecución de pruebas del modelo
- ◆ Análisis de Resultados

3.1 Marco Experimental

Se considera el problema como el modelado de evento discretos, donde nos interesa conocer la posición, la velocidad y el comportamiento de los vehículos en una vía de dos carriles interactuando con otros vehículos.

3.2 Descripción Informal del Modelo

El modelo que se presenta para el tráfico de vehículos en una vía de dos carriles con vehículos que se mueven en un solo sentido de izquierda a derecha trata de describir el comportamiento individual de cada uno de los vehículos. Este comportamiento se ve afectado por el comportamiento de los demás vehículos, lo que provoca que exista una interacción entre todos los vehículos que forman parte del sistema.

En el modelo, se divide el tiempo en pequeños intervalos iguales y en cada uno de ellos, se actualizan las posiciones y las velocidades de los vehículos simultáneamente.

Todos los vehículos están descritos por su propia ecuación de movimiento, se asume una velocidad uniforme para todos los vehículos, existirá un parámetro probabilístico eso se refiere a la probabilidad que tiene un vehículo de disminuir sus velocidad.

La vía está compuesta por dos carriles consistirá en dos lattices adyacentes sobre los cuales se aplicara las reglas del modelo de NaSch en cada una, de manera independiente con frontera periódica, para simular el cambio de carril se considerara la velocidad del vehículo a analizar, la distancia al vehículo de enfrente y de atrás del carril adyacente, para cada vehículo se verifican las reglas de cambio consecutivamente, si estas se cumplen pasan al otro carril de forma transversal y enseguida se actualiza el sistema aplicando el modelo de NaSch a cada carril.

Cada carril estará dividida en celdas iguales, de tamaño tal que en cada una de ellas a lo más cabe un vehículo, se delimita el espacio entre dos vehículos consecutivos como el número de celdas vacías.

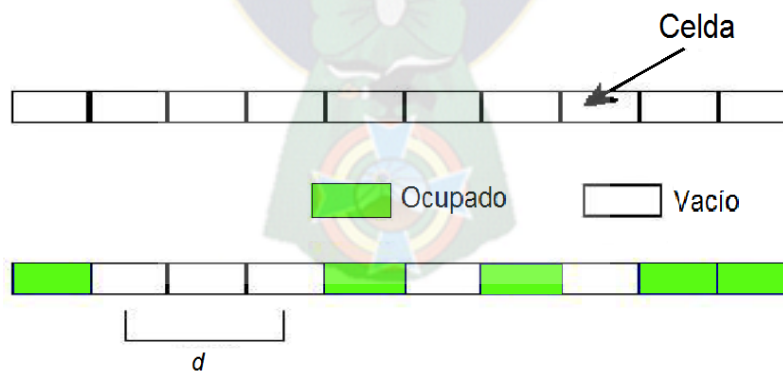


Figura 3.1. Arreglo de 10 celdas

Fuente (Elaboración Propia)

3.2.1 Componentes

El modelo de simulación de la Dinámica del Tránsito Vehicular bajo el Enfoque Microscópico está compuesto principalmente por un Autómata Celular unidimensional homogéneo eso significa de un solo tipo de vehículo.

Vehículos a

Celdas = {celda (i) | $i \in \mathbb{N}$ } binaria

3.2.2 Variables descriptivas

Los componentes descritos anteriormente están compuestos por variables que determinan diferentes estados en los que se pueden encontrar los componentes a través del tiempo.

Para cada Celda (i);

Vehículo

Posición x : x dependerá del vehículo predecesor

Velocidad v : $v = \{1, 2, \dots, 5\}$; donde 5 es la velocidad v_{max} .

Distancia d : d número de celdas vacías frente a el vehículo.

Estado_Celda (i) ocupado (1) o desocupado (0).

Parámetros

Densidad μ = numero de vehiculos sobre la logitud

Tiempo t = tiempo discreto de 1 segundo

Longitud celda = 7.5 m

Numero N = Número de vehiculos en el AC

3.2.3 Reglas de interacción

Se describen la relación que existen entre los componentes y que influencia tiene, alterando sus condiciones y evolucionando el sistema,

- Para un tiempo t , cada célula puede estar ocupada por un vehículo o vacía.
- Un vehículo puede tener una posición en un tiempo determinado.
- Cada vehículo tendrá un desplazamiento en un tiempo.
- Desplazamiento está dado por células sobre tiempo.
- La brecha existente entre el vehículo y vehículo predecesor es la distancia entre ambos.
- Vehículo avanza si existen células desocupadas delante en frente hasta llegar a su velocidad máxima.
- Si existe vehículo predecesor y no hay células vacías para avanzar el vehículo disminuye su velocidad en 1.
- Un vehículo en un instante del tiempo tendrá una posición.
- Vehículo tendrá una probabilidad de frenado que estará dentro del rango entre 0-1.
- Las células cambian su estado en etapas del tiempo de acuerdo a la función local.
- El conductor del vehículo se encuentra enfrente a una distancia para la cual sea necesario disminuir la velocidad.
- El conductor mira hacia adelante del otro carril y compara la distancia de donde se encuentra el vehículo siguiente con las distancia del vehículo de enfrente
- El conductor mira hacia atrás del otro carril y considera si es posible cambiar de carril.

3.3 Descripción Formal del Modelo

El modelo presentado en esta simulación se basa en el modelo de NaSch y el modelo microscópico que considera el uso de un Autómata Celular unidimensional que se define como un modelo matemático de tipo discreto se define su estructura como una cuádrupla.

$$AC = (L, S, V, F)$$

Donde:

L : Lattice finito con l células con condición de frontera periódica

S : Conjunto finito de estados será

$$s = \{0,1\}$$

Es decir que en un tiempo t una celda de L puede tomar los siguientes valores:

$$celda(i, t) = \begin{cases} 0 & ; \text{la celda esta desocupada por un vehiculo} \\ 1 & ; \text{la celda esta ocupada por un vehiculo} \end{cases}$$

V : Conjunto de vecindades de radio

$$r = \{1\}$$

Como lo que se quiere generar es el avance del vehículo en el lattice y debido a que solo puede ir en dirección de izquierda a derecha se toma en cuenta al vecino más cercano de la izquierda y al vecino más cercano de la derecha.

F : Función de transición local de estados para la evolución del autómata.

Aceleración

$$v(i, t + 1) = \min[v(i, t) + 1, v_{max}]$$

Desaceleración debido a la interacción con otros vehículos

$$v(i, t + 1) = \min[v(i, t), d(i, t)]$$

Aleatoriedad

$$v(i, t + 1) = \max[v(i, t) - 1, 0], \text{ con probabilidad } p$$

El parámetro de frenado se define por:

$$p = \begin{cases} p_0 & ; \text{ si } v(i, t) \text{ es } 0 \\ p_b & ; \text{ en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Donde: p_0 : es la probabilidad de frenado cuando un vehículo se encuentra detenido

p_b : es la probabilidad de frenado de un vehículo en cualquier otro caso.

Movimiento

$$x(i, t + 1) = x(i, t) + v(i, t + 1)$$

A partir del modelo de NaSch. Se considerara un Autómata Celular unidimensional compuesto por dos carriles unidimensionales adyacentes de tamaño L (Figura 3.2) y sobre cada uno simular el modelo de NaSch. Para simular el cambio de carril se agregan 4 reglas al modelo.

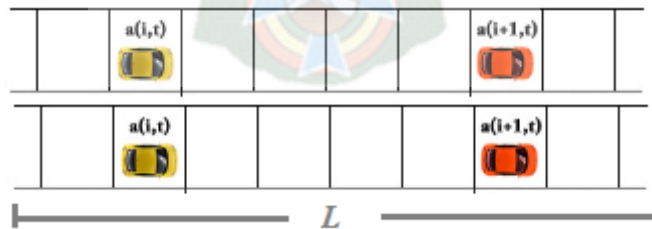


Figura 3.2. Carriles adyacentes de tamaño L.

(Elaboración Propia)

Para la actualización del sistema será llevado a cabo en los dos puntos siguientes:

- Analizar el cambio de carril de acuerdo al nuevo conjunto de reglas. Si un vehículo cumple con las condiciones de cambio de carril, este es movido al siguiente carril transversalmente sin avanzar, esto es, si el vehículo se encuentra en la posición i – *esima* del arreglo 2 o viceversa.
- Se actualiza el sistema conforme a las reglas del modelo de NaSch esto de forma independiente en cada arreglo

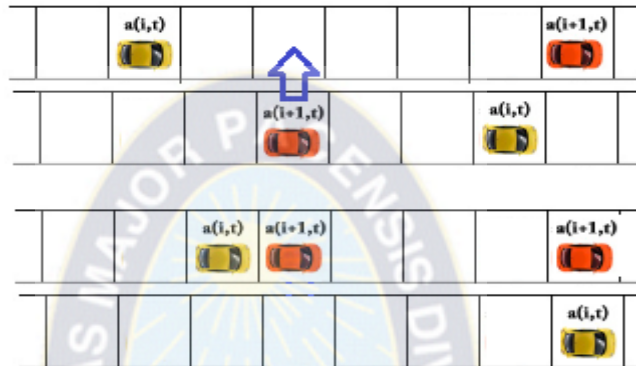


Figura 3.3. Cambio de carril de forma transversal

(Elaboración Propia)

Parámetros importantes.

- ✓ Las reglas de cambio de carril rigen para cada uno de los vehículos en todos los carriles.
- ✓ Probabilidad de Cambio: Debido a que los vehículos no alcanzan su velocidad máxima por la aparición de grupos que generan embotellamiento todos evalúan las condiciones del otro carril para realizar el posible cambio de carril, lo cual es hecho una y otra vez esto hace que el pelotón se disuelva o bien es rebasado por otros vehículos.
- ✓ Dirección de casualidad: para un cambio de carril se debe considerar la distancia del vehículo de enfrente, la distancia del vehículo de adelante y de atrás del carril a donde se desea hacer el cambio.

Sea $j \in A := \{1, 2, \dots, n\}$. Sea $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ con $x_j = \{v_i\}_{i_j}$ configuración admisible para cada $j \in A$. Si k es la posición del k -ésimo sitio, entonces $k_{-j} \leq k$

denotara el sitio sobre el carril j que contiene el vehículo más cercano al sitio k por atrás; y $k_{+j} > k_{-j}$ el sitio sobre el carril j que contiene el vehículo más cercano al sitio k por delante. Si x_{i_j} es la posición del i -ésimo vehículo en el carril j , entonces se definen las siguientes variables:

Número total de sitios vacíos enfrente de un vehículo en el mismo carril.

$$g(i)_j := x_{i+1_j} - x_{i_j} - 1$$

Número de sitios vacíos por delante de carril k , a donde desea hacer el cambio.

$$gp(i)_{jk} := (x_{i_j})_{+k} - x_{i_j} - 1$$

Número de sitios a donde se encuentra el vehículo más cercano por la parte de atrás del carril k .

$$gs(i)_{jk} := x_{i_j} - (x_{i_j})_{-k}$$

Criterios que deben cumplirse para el cambio de carril son los primeros 4:

1. Criterio estímulo $g(i) < l$.
2. Situación del carril adyacente $gp(i) > l_0$.
3. Evita distancias muy pequeñas a los vehículos siguientes en el otro carril.
 $gs_{0,atrás}(i) > l_{0,atrás}$
- 4.- $rand() < pc$
- 5.- El vehículo es colocado en la posición x sobre el carril i .
- 6.- El sistema se actualiza aplicando las reglas del modelo NaSch de manera independiente a cada carril.

Donde: $g(i)$ es la distancia con respecto al vehículo i sobre su propio carril

$gp(i)$ Es la distancia respecto al vehículo i sobre el carril adyacente.

$gs_{0,atrás}(i)$ Es la distancia en el otro carril al próximo vehículo de atrás

l, l_0 y $l_{0,atrás}$ Son parámetros para decidir qué tan lejos se debe encontrar el siguiente vehículo enfrente sobre el mismo carril, sobre el otro carril y por la parte de atrás del otro carril respectivamente para poder hacer el cambio de carril, mientras que pc es la probabilidad de que un vehículo cambie de carril, y $rand()$ es un número dentro del intervalo $[0,1]$.

El parámetro l para criterio incentivo es:

$$l = \min(v + 1, v_{max})$$

El espacio mínimo asegura que los vehículos que conducen en conjunto lento intenten cambiar de carril si es posible.

Situación del carril adyacente motiva la poción:

$$l = l_0.$$

Para evitar distancias pequeñas en el otro carril tomamos $l_{0,atrás} = v_{max}$. El cambio de carril se da con una probabilidad pc que minimiza, los cambios de carril frecuentes de los vehículos en pasos del tiempo consecutivos.

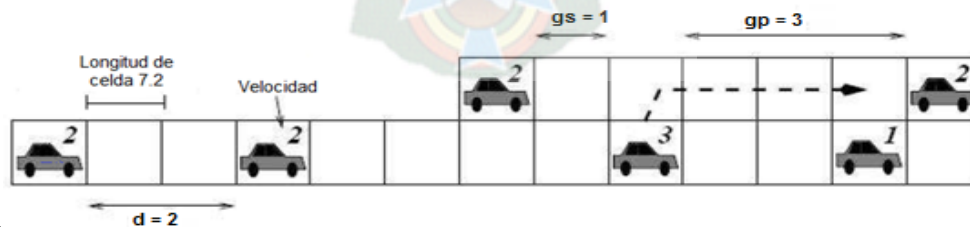


Figura 3.4. Dinámica del Cambio de Carril con $gs=1$ y $gp=3$

Fuente (Metropolitana, 2011)

3.4 Recolección de Datos

Los datos empleados en esta tesis fueron obtenidas de forma experimental sobre un punto específico de una vialidad se realizó un extensión vehicular durante un día en periodos de 1 hora dando como resultado el número de vehículo que muestran en la Tabla 3.1.

Tiempo	Número de Vehículos
8:00-9:00	460
9:00-10:00	453
10:00-11:00	402
11:00-12:00	355
12:00-13:00	401
13:00-14:00	459
14:00-15:00	400
15:00-16:00	310
16:00 -17:00	313
17:00-18:00	351
18:00-19:00	403
19:00-20:00	465

Tabla 3.1. Muestra número de vehículos por hora

Fuente (Elaboración Propia)

Determinamos que el flujo máximo se encuentra entre los horarios de 8:00-9:00, 13:00-14:00 y 19:00-20:00.

Analizamos los datos de número de vehículos para hallar la fluidez entre rangos de una hora, según los datos de la Tabla 3.1

Tiempo	Numero vehículos (15 min)	Flujo (veh/h)
08:00- 08:15	155	620
08:15- 08:30	186	744
08:30- 08:45	191	764
08:45- 09:00	190	760
09:00- 09:15	183	732
09:15- 09:30	162	648
09:30- 09:45	150	600
09:45- 10:00	142	568
10:00- 10:15	139	556
10:15- 10:30	141	564
10:30- 10:45	143	572
10:45- 11:00	152	608

Tabla 3.2. Densidad Flujo

Fuente: (Elaboración Propia)

Entre intervalo de tiempo de una hora se tiene como flujo máximo:

Tiempo	Flujo máximo
8:00-9:00	764
9:00-10:00	732
10:00-11:00	608

Tabla 3.3. Flujo máximo calculado en una hora

Fuente: (Elaboración Propia)

3.5 Construcción y Verificación del Programa en Computador

Diagrama de Flujo para la llamada a la rutina de Inicialización.

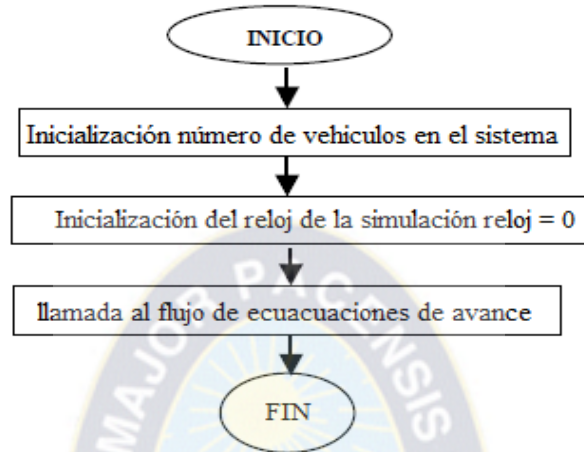


Figura 3.5. Diagrama de Flujo para la condición de activación

Fuente (Elaboración Propia)

Diagrama de Flujo para las ecuaciones de avance que es aplicado para cada vehículo. Ver Figura 3.6

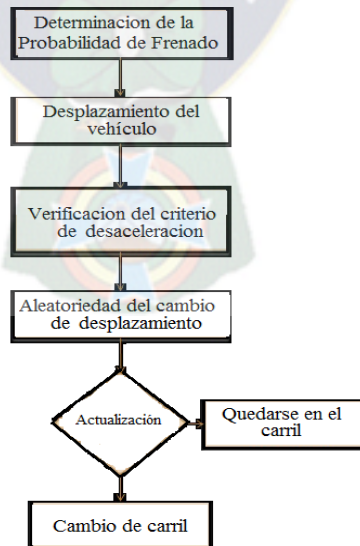


Figura 3.6. Diagrama de Flujo de Ecuaciones de Avance

Fuente (Elaboración propia)

Las funciones que explican las ecuaciones de avance son detallados a continuación:

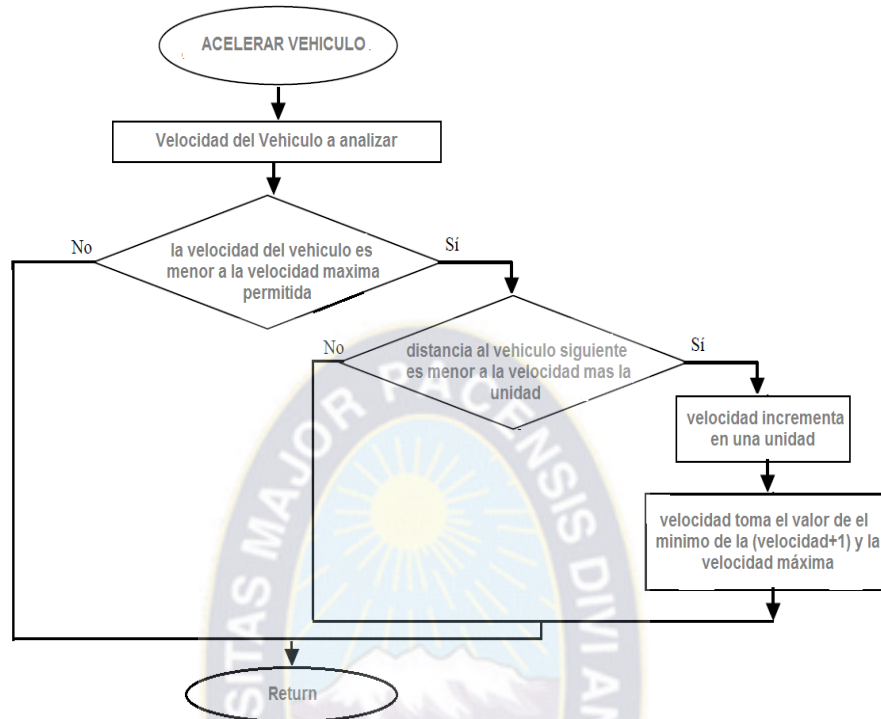


Figura 3.7. Diagrama de Flujo del Método Rutina NaSch

Fuente: (Elaboración propia)

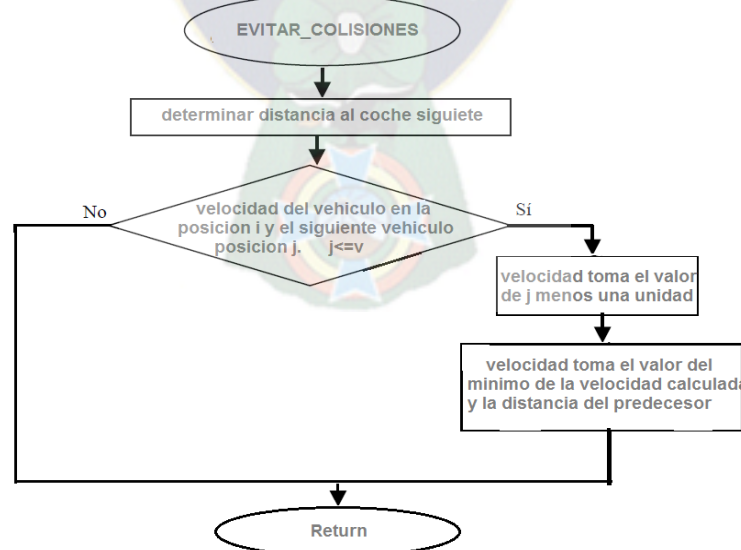


Figura 3.8. Diagrama de Flujo Desaceleración por Causa de otros Vehículos.

Fuente: (Elaboración propia)

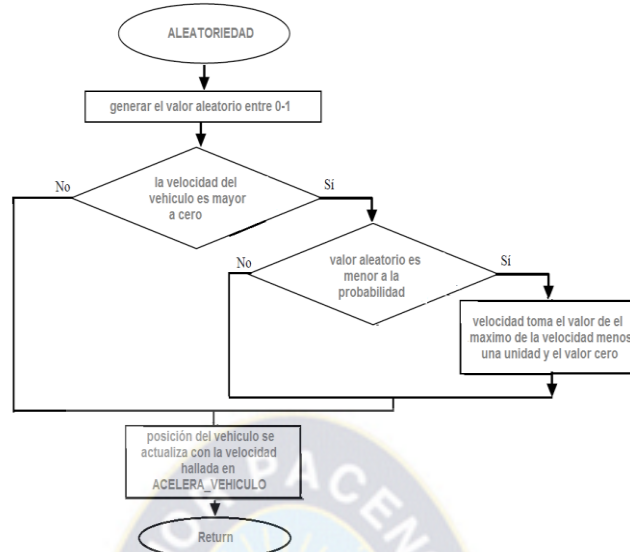


Figura 3.9. Diagrama de Flujo Aleatoriedad

Fuente: (Elaboración Propia)

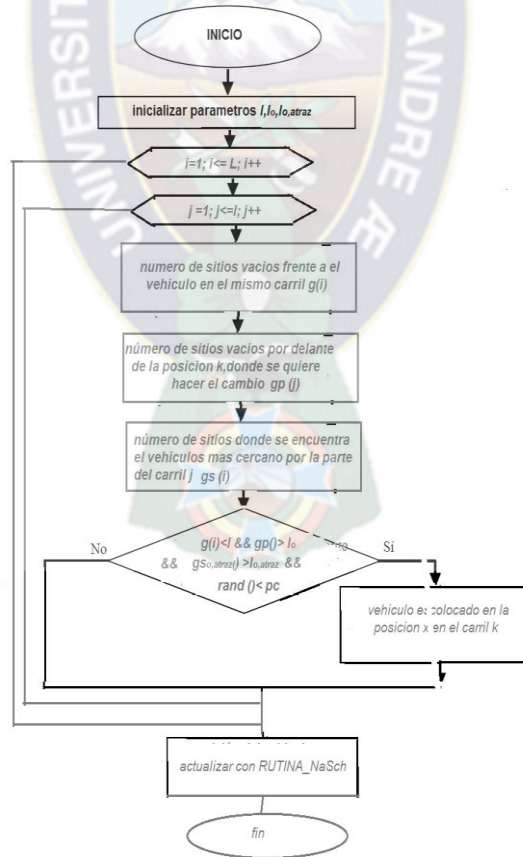


Figura 3.10. Diagrama de Cambio de Carril

Fuente: (Elaboración Propia)

Para poder presentar de manera gráfica las ecuaciones expuestas y explicadas en la descripción formal del modelo se desarrolló un programa en java las herramientas utilizadas son:

1. Editor Sublime text 2
2. JDK 7 de 32 bits
3. Lenguaje de programación Java y HTML
4. Sistema operativo Windows 7 Edition 32 bits.

El simulador permite manipular varias de las variables explicadas y de esta forma mostrar cómo interactúan entre sí los vehículos en una vía de dos carriles en estos se puede controlar el número de vehículos que ingresan a la vía y cómo es la dinámica de estos, si N es muy grande existe menos fluidez en el sistema, si N es intermedia existe fluidez.

El simulador es compuesto por una sección de la simulación y de graficado de la ecuación fundamental donde se muestra la información de:

1. Representación animada del movimiento de los vehículos, en los carriles se puede observar el movimiento de los vehículos que tiene el sistema donde de manera dinámica se puede ver dos carriles con vehículos que avanzan en el mismo sentido de izquierda a derecha que pueden cambiar de carril si lo ven oportuno.

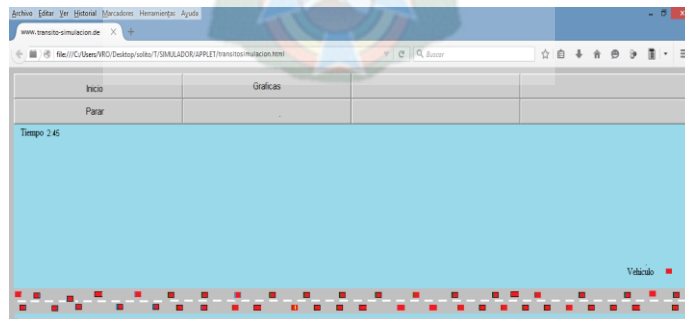


Figura 3.11. Ventana del Prototipo de Simulación

(Elaboración Propia)

2. Diagrama Fundamental que muestra la relación de densidad y flujo la cual ayuda a la interpretación de los datos que se obtienen en las simulaciones con diferentes parámetros. Ver Figura 3.12-a.
3. Diagrama Espacio tiempo permite ver el comportamiento del sistema conforme va avanzando el tiempo, cada vehículo es representado por su posición en el sistema, donde se pueden observar congestionamientos. Ver Figura 3.12-b.

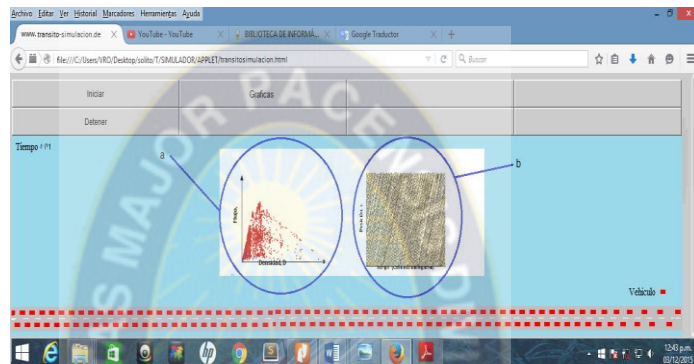


Figura 3.12. a) Diagrama flujo-densidad, b) Diagrama espacio-tiempo
(Elaboración Propia)

CAPITULO IV

4 PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 Ejecución de Pruebas del Modelo

La Simulación de la dinámica del tránsito vehicular bajo el enfoque microscópico da paso a realizar pruebas de la simulación, con el objetivo de determinar la precisión del modelo y si los resultados obtenidos son confiables.

Para realizar las pruebas del modelo se definieron los siguientes escenarios flujo libre y congestionamiento en un lattice de 180 celdas y así poder observar la dinámica que existen en el tránsito vehicular.

Prueba 1: Flujo libre

Número de vehículos(15 min)	Probabilidad de frenado	Tiempo (minutos)	hora
60	0.5	60	15:00-16:00

Los datos obtenidos son:

Fluidez (veh/hora)	Fluidez de la simulación por carril
240	242

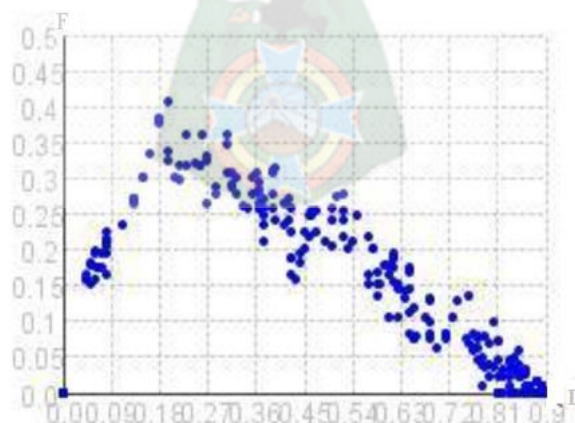
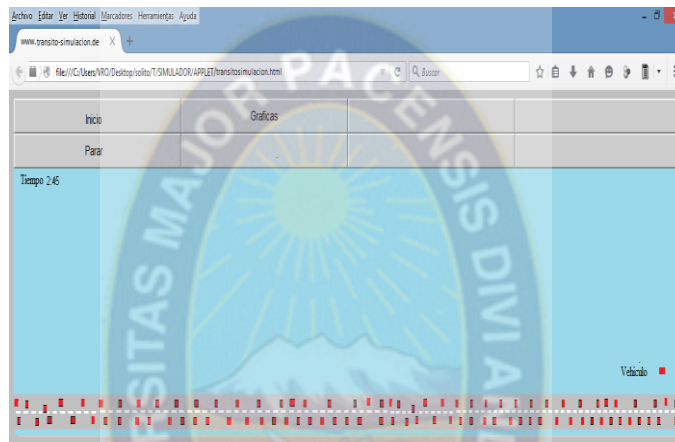


Figura 4.1 Modelo Propuesto carril Izquierdo

Interpretación:

Se tuvo como entrada el número de vehículos 60 por minuto que es determinante para observar el comportamiento que este tendrá en el comportamiento de los vehículos, en una hora se tendrá la fluidez del dato observado 240 y el dato de la simulación 242 vehículos que pasaran por ese punto durante la hora de menos afluencia de vehículos ese cambio se debe al cambio de carril efectuado.



Prueba 2: Flujo congestionado

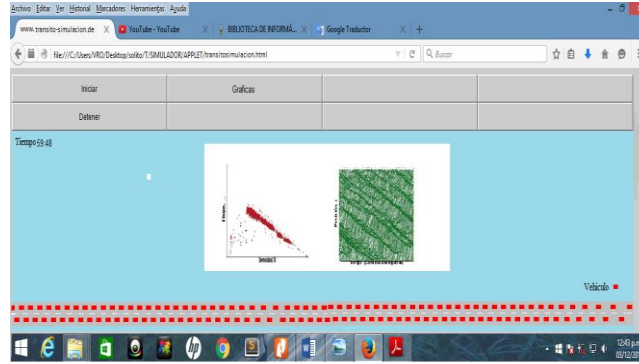
Número de vehículos	Probabilidad de frenado	Tiempo (minutos)	hora
80	0.5	60	19:00-20:00

Los datos obtenidos son:

Fluidez (veh/hora)	Fluidez de la simulación
320	321

Interpretación:

Se tuvo como entrada el número de vehículos 80 por minuto que es determinante para observar el comportamiento que este tendrá en el comportamiento de los vehículos, en una hora se tendrá la fluidez del dato observado 320 y el dato de la simulación 321 vehículos que pasaran por ese punto durante la hora de menos afluencia de vehículos ese cambio se debe al cambio de carril efectuado.



El congestionamiento se divide en dos tipos: el congestionado y el flujo sincronizado, por lo que se hará la prueba de este comportamiento.

Prueba 3: Flujo Sincronizado.

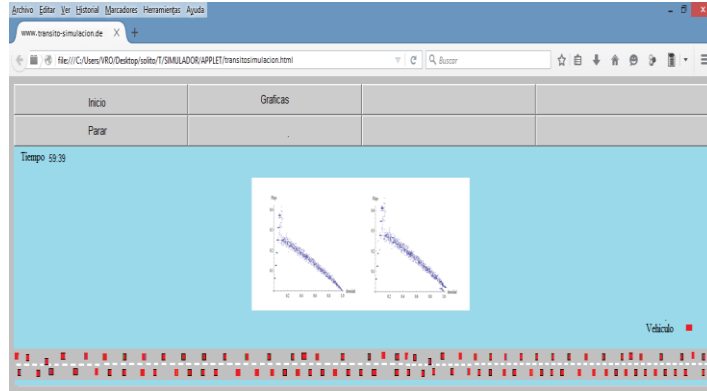
Número de vehículos	Probabilidad de frenado	Tiempo (minutos)	hora
75	0.5	60	19:00-20:00

Los datos obtenidos son:

Fluidez (veh/hora)	Densidad (veh/m)
300	300

Interpretación:

Se tuvo como entrada el número de vehículos 600 por hora que es determinante para observar el comportamiento que este tendrá en el comportamiento de los vehículos, en una hora se tendrá la fluidez del dato observado 300 y el dato de la simulación: 300 vehículos, ese punto durante esa hora hora los vehiculos avanzan en grupos y el cambio de carril es muy improbable..



Se presenta un análisis comparativo entre los modelos RNSL y el modelo propuesto a través del diagrama fundamental del carril-1 y carril -2 y de todo el sistema.

Las gráficas que se exponen en Corresponden a una simulación con parámetros $\rho_c = 0.8$; $\rho_1 = \rho_2 = 0.5$.

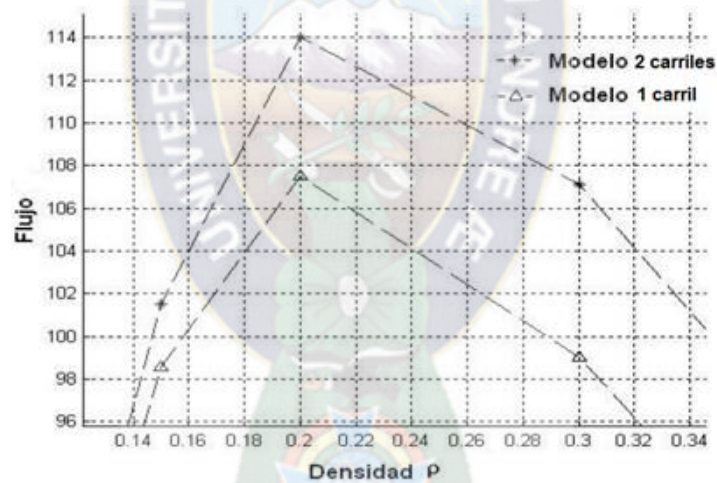


Figura 4.2. Comparación del modelo NaSch y el modelo de 2 carriles

(Elaboración Propia)

Se observa que el modelo con $D=0.2$ se obtiene un flujo de 114 vehículos por unidad de tiempo y que la fluidez del otro modelo es de 108 llega a su máximo.

4.2 Análisis de Resultados

Se implementó el modelo de NaSch, en un solo carril y se obtuvo el siguiente diagrama fundamental para hacer la comparación ver Figura 4.3

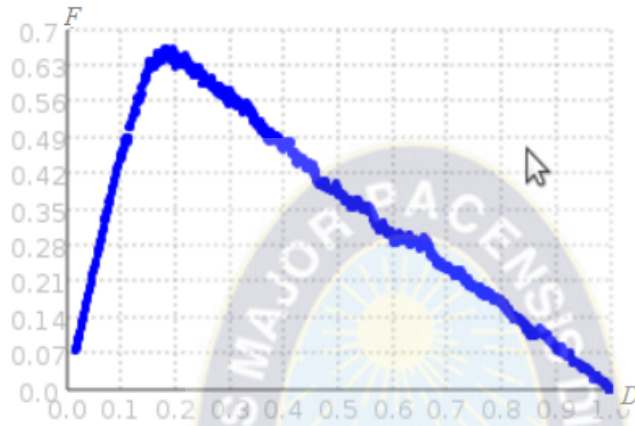


Figura 4.3. $D = 0.2$ Resulta el Flujo máximo 0.63

(Elaboración Propia)

Ahora la el modelo de 2 carriles propuesto.

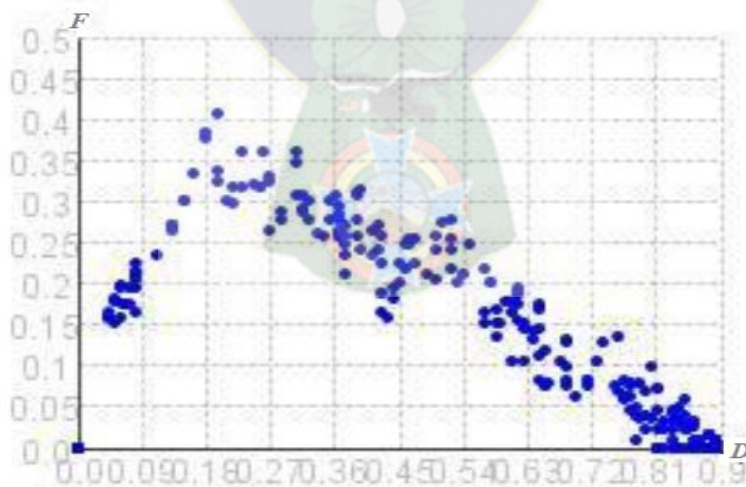


Figura 4.4. Modelo propuesto, aplicado en un solo carril.

Los experimentos realizados permitieron que se pueda realizar cambios en el prototipo.

Uno de los datos más relevantes es el número de vehículos que hace que se pueda observar los distintos fenómenos en la dinámica del tránsito vehicular que influencia en la fluidez la densidad y a la vez en el desplazamiento que cada vehículo pueda tener.



5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Con el presente trabajo se ha demostrado que el modelo de la dinámica del tránsito vehicular bajo el enfoque microscópico obtiene mejores resultados además de mostrar de una manera más realista cómo interactúan los vehículos en una vía.

En el desarrollo de la tesis se definió formalmente la dinámica del tránsito vehicular bajo el enfoque microscópico este último es una herramienta efectiva para estudiar sistemas de salto de partícula porque permite observar el comportamiento de cada uno de los componentes de este sistema y junto a la investigación de Nasch. Se puede afirmar que se construyó un modelo capaz de mostrar cómo interactúan los vehículos en la dinámica del tránsito vehicular.

Las simulaciones que se realizaron con el prototipo fueron capaces de mostrar congestión, circulación fluida, circulación sincronizada y cambios de carril. Usando los datos observados los datos en la tabla 3.1 pudimos hacer las pruebas que muestran los fenómenos que se pueden encontrar en el tránsito vehicular.

Se cumplieron los objetivos específicos mencionados en el capítulo 1, Revisar el modelo de flujo de tráfico vehicular en un solo carril propuesto por K.Nagel y M.Schreckenberg el que fue la base de esta tesis, obtener información del enfoque microscópico que utiliza autómatas celulares y permitió que pueda observarse la dinámica del tránsito vehicular, examinar la teoría sobre los Autómatas Celulares usada para el fenómeno del tránsito vehicular definiendo la estructura de la tupla con la que se trabajó y realizando el prototipo del programa de simulación.

5.2 Recomendaciones

Gracias al modelo microscópico que permite utilizar los saltos de partícula se pueden estudiar los vehículos uno a uno haciendo esto que se puedan tomar decisiones a niveles macroscópicos.

Hacer algún tipo de cambio en la ecuación de NaSch para mostrar resultados aún más reales de lo que el modelo predice.

Obtener datos para realizar las pruebas de más días de observación y no solo por horas.

Analizar las ecuaciones de cambio de carril para adaptarlos y que se pueda hacer ese cambio en una vía multicarril.

Trabajar con la ecuación fundamental de fluidez densidad y desplazamiento.

Buscar un simulador de sistemas discretos para poder hacer redes urbanas y aplicar en ellos las reglas de Nash.

Si se puede utilizar DEVS (*Especificación de Sistemas de Eventos Discretos*) para realizar un estudio en este campo.

5.3 Trabajos Futuros

A partir de este trabajo se pueden hacer diversas extensiones, en varias direcciones, incluyendo las siguientes:

- Ampliar en número de carriles.
- Considerar un sistema de más de un tipo de vehículo para hacer más realista el sistema.
- Considerar desvíos de ingreso y salida en la vía.
- Considerar el recorrido por la vía en dos sentidos de derecha-izquierda e izquierda derecha.

- Considerar condiciones de frontera abierta con el fin de observar los fenómenos que se presentan.
- Podría segmentarse el lattice en celdas que representen una división de la carretera de menos de 7.5m
- Trabajar con velocidades máximas distintas por tipo de vehículos y diferentes tamaños.
- Considerar cruce de avenidas.
- Considerar semáforos para observar el tiempo de espera y que fenómenos se pueden observar por este tiempo.



6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Banks, J. (1996). *Software for Simulation*. IEE, Piscataway .N.J.
- Castillo, G. T. (2009). *Tesis para Maestria en Ciencias de la Computación* . Mexico D.F.: Centro de Investigación en Computación. IPN.
- Coss, R. (1995). *Simulación un enfoque práctico*. México D.F.: LIMUSA, S.A. de C.V.
- De *Conceptos.com* . (s.f.). Recuperado el 12 de 10 de 2012, de <http://deconceptos.com/ciencias-naturales/dinamica>
- DEFINICION ABC. (2007). *Definicion ABC*. Obtenido de <http://www.definicionabc.com/social/transito.php>
- Definición.DE*. (10 de 09 de 2015). Obtenido de <http://definicion.de/simulacion/>
- Fernández, A. M. (diciembre de 2009). Obtenido de www.saber.cic.ipn.mx/cake/SABERsvn/trunk/Repositorios/webVerArchivo/422/1
- Fernandez, A. M. (2009). *Modelación y Simulación con Rampas Usando Automatas Celulares*. México D.F.: Centro de Investigaciones en Computacion.
- Genaro J. Martínez, H. Z. (2011). *Sistemas Complejos como Modelos de Computación*. LUNIVER PRESS.
- Hachinski. (2001). *Cellular Automata*. World Scientific.
- Henry, M. T. (2009). *Tesis de Licenciatura Modelo de Simulación para el Tráfico Vehicular*. La Paz: Carrera Informatica. UMSA.
- Hoyo, A. (2006). *Simulacion de Trafico Vehicular con automatas celulares*. Caracas-Venezuela.

- Maldonado, C. J. (2013). *Modelo Predictivo para el Análisis del Tráfico Vehicular en Carreteras con Redes Neuronales Artificiales*. La Paz - Bolivia: UMSA.
- Metropolitana, U. A. (2011). *Modelación de problemas de flujo vehicular*. Iztapalapa, México.
- Raczynski, S. (1993). Simulación por Computadora. En S. Raczynski, *Simulación por Computadora* (págs. 37-54). México D.F.: Megabyte Grupo Noriega Editores.
- Shannon, R., & Johannes, J. D. (2007). *Systems Simulation: The Art and Science*. Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions.
- Transito. (1978). *Reglamento de Transito*.
- Universidad Nacional de Colombia. (s.f.). *Dirección Nacional de innovación Académica*. Recuperado el 10 de 09 de 2015, de <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4060010/lecciones/Capitulo1/modelo.htm>
- UTADEO. (s.f.). *Modelado y Simulación*. Obtenido de <http://www.utadeo.edu.co/es/link/maestria-en-modelado-y-simulacion-mms/26106/layout-1/que-es-modelado-y-simulacion-ms>
- Zeigler, B. P. (1984). *Theory of Modelling and Simulation*. Malabar, Florida: Robert E. Krieger Publishing Company.

ANEXOS

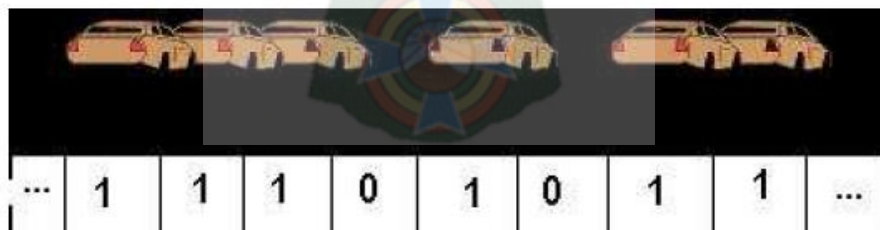
Autómata Celular AC-184 de Wolfram

El límite determinístico del AC de NaSch cuando $p = 0$ y $V_{max} = 1$, equivale a saltarse el paso aleatorio y ocupar el sitio de enfrente si está desocupado. Esta es la definición del AC de Wolfram con la regla 184 en su notación. Este modelo fue introducido por Biham y colaboradores con $V_{max} = 1$. Ha sido fuente de resultados en otros trabajos y se ha usado para modelar tráfico bidimensional.

La notación AC184/n significa el modelo AC con la regla 184 de wólfram y $V_{max} = n$. el nombre de la regla viene de la manera de codificar la regla de transición temporal ilustrada en la siguiente tabla:

Patrón al tiempo t	111	110	101	100	011	010	001	000
Estado de la celda central al tiempo $t + 1$	1	0	1	1	1	0	0	0

La regla 184 se ha usado en diversos contextos: tráfico vehicular, deposición superficial, aniquilación balística, en el contexto que nos interesa la regla de interpreta como se ve en la siguiente figura. (Metropolitana, 2011).



Interpretación de la regla 184 en el tráfico vehicular