

Trabajo Final de Proyecto Terminal

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

División de Ciencias Básicas e Ingeniería

Ingeniería en Computación

TRABAJO FINAL DE PROYECTO TERMINAL

**Diseño de una estrategia predictiva de congestión vehicular,
usando autómatas celulares en un escenario de dos rutas**

ALUMNO

Pérez Zavala Joshua

Matrícula 205205225

Asesor

Germán Téllez Castillo

Numero económico

18139

Trabajo Final de Proyecto Terminal

Contenido

Capitulo 1. Problema.....	4
1.1 Antecedentes	4
1.2 Problemática	5
1.3 Objetivos Generales	5
1.4 Objetivos Particulares	6
1.5 Justificación	6
Capitulo 2. Antecedentes	7
2.1 Autómata Celular	7
2.2 Autómatas Celulares Unidimensionales	11
2.3 Modelación de tránsito vehicular utilizando AC	13
2.4 Modelo basado en dinámica de fluidos	16
2.5 Modelos basados en teoría de colas	17
Capitulo 3. Solución.....	18
El Modelo	18
Capitulo 4. Simulación y Resultados	20
Capitulo 5. Conclusiones	¡Error! Marcador no definido.
Bibliografía	27

Tabla de Figuras

Figura 1. Vecindad de Moore.....	9
Figura 2. Evolución de life. A partir de (a) aplicando las reglas de evolución se llega a (b).....	10
Figura 3. Otras configuraciones "life"	10
Figura 4. AC Lineal	11
Figura 5. Arreglo visto como anillo.....	11
Figura 6. Numero de Wolfram (regla 54)	12
Figura 7. Ejemplos de números de Wolfram.....	12

Trabajo Final de Proyecto Terminal

Figura 8. Sección de un carril en un modelo de tránsito de vehículos con un AC, se muestran los conceptos de predecesor, sucesor y brecha	16
Figura 9. Simulación con la estrategia de tiempo de viaje.....	21
Figura 10. Gráficas de la simulación de la figura 9.....	22
Figura 11. Simulación con la estrategia de velocidad media	22
Figura 12. Gráficas de la simulación de la figura 11.....	23
Figura 13. Simulación con la estrategia de coeficiente de congestión	24
Figura 14. Gráficas de la simulación de la figura 13.....	25
Figura 15. Simulación con la estrategia Predictiva.....	25
Figura 16. Gráficas de la simulación de la figura 15.....	26

Capítulo 1. Problema

1.1 Antecedentes

El flujo de tránsito vehicular y los problemas relacionados son un área de estudio desde la década de los 50's del siglo pasado en varios países; disminuir o al menos retrasar sus efectos tiene una gran importancia económica y social. Varias teorías han sido propuestas, para estudiar, explicar y entender su dinámica tales como: la teoría del carro siguiente [1], la teoría cinética [2], la teoría de salto de partículas [3, 4]. Estas teorías tienen la ventaja de permitir simular la congestión de tráfico así como la infraestructura existente. Aun cuando la dinámica de flujo de tráfico con información de tránsito en tiempo real se ha empezado a investigar [5,6], hallar una estrategia eficiente es una tarea aún pendiente. Actualmente, existen varias estrategias de retroalimentación en tiempo real, tales como: la estrategia de tiempo de viaje (ETV) [5,7], la estrategia de velocidad media (EVM) [5,8] y la estrategia de coeficiente de congestión (CCFS) [5,9]. Se ha probado que el EVM es más eficiente que el ETV [8], y que el ECC es más eficiente que el EVM [3]. Sin embargo el ECC no es el mejor debido al hecho de que su retroalimentación no está a tiempo, por lo que no puede saberse, inmediatamente, la situación del tránsito de la ruta. En este proyecto terminal propondremos una estrategia predictiva (EP), para sugerir una ruta a los usuarios; compararemos nuestra estrategia con las estrategias ECC, EVM, ETV. Reportaremos los resultados de la simulación de las cuatro estrategias en un escenario de dos rutas usando el modelo de autómatas celulares (AC) de Nagel-Schreckenberg [3].

Por otra parte, el modelado y la simulación de sistemas, constituyen una valiosa herramienta que permite representar a diferentes niveles, la complejidad de un problema, en este caso el de la congestión del tránsito en las avenidas de una ciudad.

Las investigaciones sobre tránsito vehicular basadas en modelos matemáticos ayudan a identificar problemas específicos que se presentan en situaciones reales de tráfico, por lo que tomar medidas sobre éstos en el tránsito real, ayuda a minimizar o retrasar su aparición.

Una simulación debe tomar en cuenta los datos reales de tránsito (tomados en la avenida a ser analizada o publicados en alguna revista arbitrada por pares; en nuestro caso usaremos datos publicados en la revista de la *American Physical Society*). La mayoría de los modelos usados para estudiar y entender los problemas de tránsito vehicular están basados en ecuaciones diferenciales (ED); sin embargo, este tipo de

Trabajo Final de Proyecto Terminal

modelos sólo tuvieron éxito para reproducir algunos aspectos de la problemática del tránsito y han dejado de lado varios parámetros que son importantes, por ejemplo: la heterogeneidad del tipo de vehículos, el cumplimiento de un porcentaje de conductores de algún porcentaje del reglamento de tránsito, (en teoría todos lo deben cumplir y al 100%), las diferentes formas de conducir de las personas, etc. Modelar estos aspectos con ED se vuelve complejo, por lo que se deben buscar opciones de modelado y de simulación; en nuestro caso hemos escogido a los AC dado que es una herramienta de modelación discreta cuya implementación es en un dispositivo de cómputo discreto (la computadora) y que trata con un problema cuyas componentes son discretas (los vehículos). Los AC pueden ser considerados como una herramienta útil para modelar las interacciones locales y no-locales que se dan entre los vehículos. El tránsito vehicular es uno de los problemas que ha sido estudiado desde su aparición en los 50's, pero pesar de ello, las soluciones propuestas aún no son satisfactorias.

1.2 Problemática

Varias teorías han sido propuestas, para estudiar, explicar y entender la dinámica del flujo de tránsito vehicular. Estas teorías tienen la ventaja de permitir modelar y simular la congestión de tráfico así como la infraestructura existente. Un elemento característico del tránsito vehicular es que las condiciones de tránsito pueden cambiar bruscamente de un momento al siguiente, de condiciones favorables a condiciones no favorables, producto de un accidente automovilístico, un cierre de carriles, etc., por lo que contar con una estrategia de medición en tiempo real de las condiciones de tránsito es algo necesario. Aun cuando la dinámica de flujo de tráfico con información de tránsito en tiempo real se ha empezado a investigar, hallar una estrategia eficiente es una tarea aún pendiente. En este proyecto terminal propusimos una estrategia predictiva (EP), para sugerir una ruta a los usuarios; comparamos nuestra estrategia con las estrategias ECC (estrategia de coeficiente de congestión), EVM (estrategia de velocidad media), ETV (estrategia de tiempo de viaje).

1.3 Objetivos Generales

Diseñar una estrategia predictiva (EP) de congestión vehicular, usando AC en un escenario de dos rutas que permita al usuario escoger una ruta con menos conflictos de tránsito.

1.4 Objetivos Particulares

1. Estudiar los conceptos de AC y de tránsito vehicular necesarios para resolver el problema planteado en el objetivo general.
2. Diseñar una EP usando un AC.
3. Programar el AC con la estrategia EP y las estrategias siguientes: estrategia de tiempo de viaje (ETV), estrategia de velocidad media (EVM), estrategia de coeficiente de congestión (ECC).
4. Simular el AC con las cuatro estrategias ETV, EVM, ECC y EP.
5. Validación de resultados generados por el objetivo particular cuatro y los publicados.
6. Ajustar el autómata diseñado.
7. Analizar, comparar y sacar conclusiones de los resultados generados por el sistema, obtenidos en el objetivo particular seis, de las 4 estrategias.
8. Crear una interfaz gráfica amigable para el usuario del AC obtenido en el objetivo particular seis.

1.5 Justificación

Los sistemas con retroalimentación de información tienen un efecto significativo en muchos sistemas socio-económico, por ejemplo, en el mercado de valores y en los sistemas de tráfico, se hace uso de este tipo de fuentes. En este proyecto terminal estudiaremos la dinámica de flujo de tráfico diseñando una estrategia de retroalimentación que denominamos estrategia predictiva (EP). Esta estrategia será probada en un escenario de dos rutas en el que la información dinámica, sobre las condiciones de tránsito es obtenida, de alguna forma, y es usada para sugerir a los conductores, previa simulación de nuestro modelo y obtención de resultados, que ruta tiene menos problemas de tránsito. La propuesta incorpora los efectos de adaptabilidad de un modelo de AC para flujo de tránsito; nuestro objetivo es mostrar

Trabajo Final de Proyecto Terminal

el nivel de eficiencia de nuestra propuesta de EP y compararlo con otras tres estrategias de información.

Para el desarrollo de este proyecto terminal, se requiere conocimiento sobre teoría de autómatas y de computación. Un ingeniero en computación de la UAM, puede a través de prueba y error, inducir y proponer reglas que permitan al autómata reproducir la dinámica promedio del tránsito vehicular; además, tiene el conocimiento de diferentes herramientas de software, que le permiten seleccionar la mejor herramienta para implementar el algoritmo creado para resolver el problema planteado. El tópico de autómatas se revisa en UEA's como, inteligencia artificial y teoría matemática de la computación. Otro de los conocimientos necesarios, es el manejo matemático y computacional del álgebra de matrices; temas cubierto en UEA's como álgebra lineal y complementos de matemáticas y métodos numéricos; esto es, el conocimiento matemático y computacional requerido para llevar a cabo este proyecto terminal es cubierto por UEA's que pertenecen a la currícula de un ingeniero en computación de la UAM-A.

Además, se puede dar continuidad a este proyecto mediante la incorporación de:

- (1) Varios carriles a las avenidas.
- (2) Diferentes tipos de vehículos al modelo.
- (3) Diferentes velocidades máximas para los diferentes tipos de vehículos.
- (4) Semáforos a las avenidas.

etc.

Capítulo 2. Antecedentes

2.1 Autómata Celular

Los autómatas celulares son sistemas que evolucionan en el tiempo en base a reglas locales. Tanto el tiempo como el espacio fase, son discretos; para un instante dado, el estado del autómata se describe por medio de un vector (AC lineal) o una matriz multidimensional (un AC bidimensional); cada celda o célula puede tomar un valor de

Trabajo Final de Proyecto Terminal

un conjunto discreto de valores. Desde el punto de vista teórico los AC constituyen un puente entre los modelos de dinámica de fluidos y los de car-following.

Un AC tiene las siguientes características:

1. Una lattice d-dimensional de células, donde d es un entero positivo. Si el autómata es unidimensional las celdas se distribuyen a lo largo de una línea; si es de bidimensional a través de una rejilla plana que puede ser triangular, rectangular, cuadrada, hexagonal, etc.
2. Cada celda o célula del lattice puede estar en un único estado en determinado instante de tiempo. Este estado pertenece a un conjunto finito A de estados.
3. El estado de las celdas cambia de un instante a otro de acuerdo a un conjunto de reglas de evolución comunes a todas las celdas.
4. Un conjunto N (llamado la vecindad). El vecindario de una celda está formado por las celdas que influyen en el valor de la celda.
5. Una función $F: A^{\text{card}(N)} \rightarrow A$ que actualiza los valores de las células. El dominio de F es el conjunto de estados de las células de la vecindad N de una célula i; y cuyo dominio es el estado, asignado por F para la célula i. Las vecindades de las células estarán dadas por la interacción de los vehículos. Estas reglas son esencialmente una máquina de estado finito, usualmente especificadas en una tabla de reglas (también conocida como función de transición), con una entrada para todas las posibles configuraciones del vecindario.

La génesis de los AC es asignada a Stanislaw Marcin Ulam y John von Neumann (década de los años 40 del siglo XX). Ulam, le propone a von Neumann construir un universo abstracto para el estudio y análisis del problema de la auto-reproducción; ofreciendo de esta forma un marco teórico para el estudio de problemas provenientes de sistemas con comportamientos complejos. En el primer ejemplo de AC propuesto por von Neumann, el universo era un tablero de miles de celdas, cada celda del tablero asumía diferentes valores o estados dentro de un conjunto de 29 valores, la vecindad usada fue la que hoy se conoce como vecindad de von Neumann, y la evolución de los estados en cada una de las celdas eran gobernadas por leyes simplificadas de la Física. A partir de allí el estudio y desarrollo de los AC ha venido recibiendo una notable atención por investigadores en diferentes áreas del conocimiento; citamos por ejemplo, que en la Teoría de la Computación promovió el impulso del procesamiento paralelo y el procesamiento de imágenes; en la Biología han sido empleados los AC

Trabajo Final de Proyecto Terminal

para modelar problemas provenientes de la Genética; en la Física son usados para el estudio, entre otros, de problemas de la dinámica de fluidos; en Química para el estudio de problemas de reacciones de difusión. Un AC que se hizo famoso en la década de los setenta del siglo pasado, es el denominado Juego de la Vida, el cual fue inventado por el matemático británico John Horton Conway, y publicado como una curiosidad matemática en la sección *Mathematical Games* de la revista *Scientific American* [6]. Este AC está modelado en una lattice 2-dimensional en donde cada célula admite uno de dos estados posibles: 0 = célula muerta y 1 = célula viva. La evolución de los estados de las células en el lattice ocurre de manera simultánea y síncrona; la vecindad ocupada es la de Moore, figura 1.

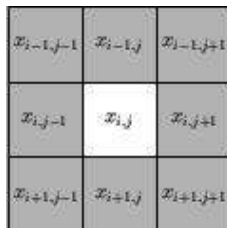


Figura 1. Vecindad de Moore.

La evolución del valor x_{ij} depende de los valores de las células vecinas a x_{ij}

La ley que gobierna el juego de la vida es la siguiente:

- Si una célula muerta tiene exactamente tres vecinas vivas, estas se reproducen y le dan vida.
- Si una célula viva tiene dos o tres vecinas vivas, ella permanece viva; pero si hay menos de dos vecinas vivas, muere por aislamiento.
- Si una célula tiene más de tres vecinas vivas, muere por superpoblación si estaba viva, y permanece muerta si ya lo estaba.

La figura 2 muestra como las células vecinas se reproducen para darle vida a la célula c que estaba muerta. La evolución del juego genera; configuraciones periódicas o preperiódicas. Versiones probabilísticas del juego de la vida han sido creadas. También se demostró que el juego de la vida es equivalente a una Máquina de Turing. En la actualidad se continúan construyendo máquinas de Turing soportadas sobre este AC.

Trabajo Final de Proyecto Terminal

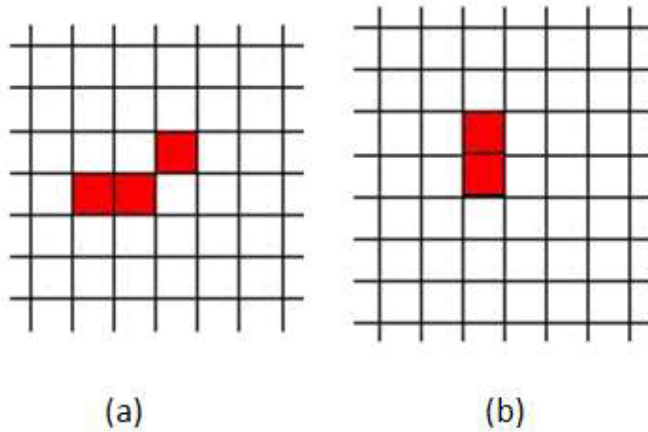


Figura 2. Evolución de life. A partir de (a) aplicando las reglas de evolución se llega a (b)

La figura 3 muestra otras configuraciones que se obtiene de Life.

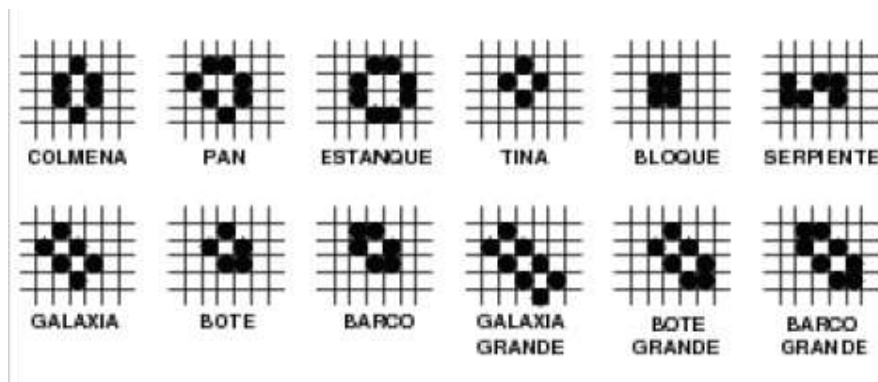


Figura 3. Otras configuraciones "life"

En la década de los ochenta del siglo XX, Stephen Wolfram clasifica los AC lineales. Para esto, introduce un reticulado unidimensional. Cada punto, o célula, admite uno de dos valores: 0 y 1. La evolución del estado de cada célula regido por una regla que depende de los estados de la propia célula y sus dos vecinas adyacentes. Wolfram consideró las 256 posibles reglas posibles hoy conocidas por la numeración asignada por Wolfram. Muchas de estas reglas dan origen a dinámicas triviales, otras genera dinámicas complejas (simulación del una maquina de Turing). En 2002 Wolfram publicó un libro que recopila su trabajo e ideas sobre la teoría de AC [9].

2.2 Autómatas Celulares Unidimensionales

Un AC unidimensional consta de un arreglo lineal finito de células; cada célula del arreglo puede tomar un valor de un conjunto finito de k -estados; el radio r de la vecindad indica el rango de interacción a nivel local que van a tener las células entre sí, (ver figura 4), es decir si r es igual a 1 entonces cada célula del arreglo verá afectado su estado a partir de los estados de las células vecinas más próximas tanto del lado izquierdo como del lado derecho; de esta forma surge la notación Wólfram ($k; r$) para un autómata celular lineal donde k representa el número de estados por cada célula y r el radio de la vecindad.

Por otro lado, al ser el arreglo finito, la primera y la última célula del lattice no tendrán vecinos del lado izquierdo y derecho respectivamente; por lo que una manera de solucionar esto es tomar el arreglo como un anillo (figura 5).



Figura 4. AC Lineal

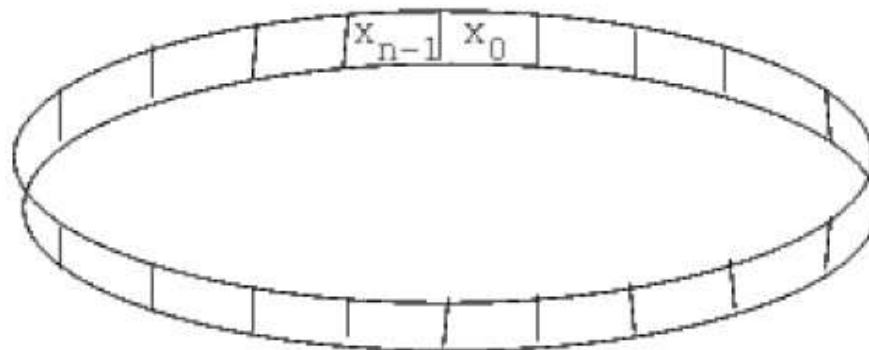


Figura 5. Arreglo visto como anillo

Trabajo Final de Proyecto Terminal

La regla de evolución determina el estado al cual va a evolucionar cada célula del arreglo en el tiempo $t + 1$ a partir de los estados de los vecinos y del suyo propio en el tiempo t . Comúnmente una regla de evolución de un AC lineal se expresa en términos de su valor decimal (número de Wolfram). En la figura 6 en la primer columna se observan las vecindades posibles para un AC lineal, la segunda columna muestra el estado al que evoluciona la célula central de la vecindad; los valores de la columna dos pueden ser interpretados como un numero en notación binaria y que al ser expresados en notación decimal determina el nombre (numero) de la regla, para este caso el numero es 54 y en la figura 7 se muestran otros ejemplos de números de Wolfram.

Vecindad	Estado al que evoluciona la célula central
000	0
001	1
010	1
011	0
100	1
101	1
110	0
111	0

Figura 6. Numero de Wolfram (regla 54)

Configuración	Número en notación decimal que corresponde a la configuración
100000101	517
010000110	262
111001001	905
000101110	94
001110001	225
1100010011	787
0010111100	188
0111000010	450
1000100111	551
0101111000	376
0110000100	388
1001001110	590
111110001	1009
000001010	10
000011111	31
1000100001	545
0101110010	370
1110001111	911
0001010000	80
0011111000	248
0100000100	260
1110001110	910
0001010001	81
1011111011	763
0100000100	260

Figura 7. Ejemplos de números de Wolfram

2.3 Modelación de tránsito vehicular utilizando AC

Las personas que analizan el tránsito de vehículos han estudiado las características de la topología de las avenidas, tales como: la longitud que tiene el carril; el número de carriles; el lugar en donde se encuentran los carriles; la discontinuidad de los carriles, es decir, los lugares donde un carril termina y reinicia para continuar el flujo; los puntos de acceso y salida de rampas; los lugares donde se colocan sensores inductivos para el tráfico en las vías principales; el límite de velocidad; el tamaño de la célula en metros; el intervalo de duración en segundos. Con respecto a la descripción del vehículo, algunos aspectos investigados son: la máxima aceleración; la máxima desaceleración; aceptabilidad de viaje en carriles restrictivos y la capacidad del carril; el máximo de velocidad permitido en el límite de velocidad legal; porcentaje del número total de vehículos de algún tipo.

En términos generales, los puntos de interés para la teoría del flujo del tránsito vehicular en que coinciden los expertos de este campo para realizar las simulaciones son:

- velocidad del flujo en vehículos por unidad de tiempo.
- velocidades,
- distancia por unidad de tiempo.
- tiempo de viaje sobre una distancia conocida de la vía.
- Promedio de tiempo en que un punto en la vía es ocupado por los vehículos.
- densidad,
- vehículos por unidad de distancia;
- TIME HEADWAY entre los vehículos,
- tiempo por vehículo;
- espacio o SPACE HEADWAY entre vehículos,
- distancia por vehículo.

En general el flujo del tránsito no es uniforme, varía sobre dos variables: el espacio y el tiempo; debido a esto, el muestreo de las variables es aleatorio.

Trabajo Final de Proyecto Terminal

Un modelo de flujo de tránsito vehicular es una colección de partículas, que representan a los vehículos moviéndose sobre una línea, ésta línea representa la vía sobre la que circulan los vehículos, esos vehículos circulan de acuerdo a sus velocidades, conforme a la ley que describe la forma en la que cambian sus velocidades; esa ley representa la aceleración o desaceleración de los vehículos. Con base en esto, es posible utilizar un AC para modelar el flujo de tránsito vehicular, haciendo una analogía entre los elementos de un modelo de flujo de tránsito de vehículos y los elementos de un AC:

- Las partículas en movimiento son análogas a las células, cuyos estados representan las velocidades de las partículas.
- La línea sobre la que se mueven las partículas es análoga al lattice del AC, implementada con alguna condición de frontera: abierta, periódica o una combinación de ambas; esto último es útil para modelos de más de un carril, conectando los extremos de la autopista con una frontera periódica, pero dejando los bordes laterales con una frontera abierta.
- Notemos que si el lattice representa explícitamente a la vía donde se moverán los vehículos, entonces no todas las células del lattice representarán a un vehículo, también podría haber espacios vacíos entre una partícula y otra.
- Estos espacios vacíos serán representados por células del lattice cuyo estado no sea una velocidad válida; estas células serán conocidas como células vacías.
- Dependiendo del modelo utilizado, la interacción entre las partículas que provoca sus aceleraciones y desaceleraciones, es análoga a la vecindad entre las células que representan a un vehículo y a la función de transición del AC.

El elemento esencial en un modelo de flujo de tránsito vehicular con AC es el vehículo:

Dado un AC $A = (L, S, N, f)$, diremos que:

el vehículo i -ésimo en el tiempo t , $a(i, t)$, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, corresponde con una célula $r_{\{a\}}$ $(i, t) = r_{\{j\}} \in L$ que ocupa la posición $j \in \{0, 1, \dots, M-1\}$ en L ,

dónde:

N el número de vehículos del modelo sobre L , en el tiempo t , y

M el número de células de L .

En el caso de L con frontera periódica, N permanece constante todo el tiempo, mientras que con frontera abierta N puede variar con el tiempo.

Trabajo Final de Proyecto Terminal

Para un determinado vehículo pueden existir: el sucesor, que se encuentra directamente detrás del vehículo, y el predecesor, que se encuentra inmediatamente enfrente del vehículo.

Sean $A = (L, S, N, f)$ un AC que modela flujo de tránsito de vehículos y $a(i, t)$ un vehículo en el tiempo t .

Si existe $a(i + 1, t)$ entonces diremos que $a(i + 1, t)$ es el predecesor de $a(i, t)$.

Si existe $a(i - 1, t)$ entonces diremos que $a(i - 1, t)$ es el sucesor de $a(i, t)$.

De otra forma diremos que $a(i, t)$ no tiene predecesor o sucesor, según sea el caso, ver figura 8.

En el caso de L con frontera periódica, $a(i, t)$ tendrá siempre un predecesor y un sucesor para toda $i \in \{1, \dots, N\}$ en el tiempo t , aun cuando el predecesor y el sucesor pudieran representar al mismo vehículo, mientras que con frontera abierta esto no es cierto, en particular el vehículo $a(1, t)$ no tiene sucesor y el vehículo $a(N, t)$ no tiene predecesor.

En un AC el concepto de vecindad es importante, en los modelos de flujo de tránsito vehicular con AC éste se representa con el concepto de brecha, el espacio entre un vehículo y su predecesor. Sean $A = (L, S, N, f)$ un AC que modela flujo de tránsito de vehículos y $a(i, t)$ un vehículo del modelo en el tiempo t , tal que $a(i, t)$ tiene predecesor. La célula que corresponde con $a(i, t)$ es $r_{\{a\}}(i, t) = r_{\{j\}}$, y la célula que corresponde con $a(i + 1, t)$ es $r_{\{a\}}(i+1, t) = r_{\{k\}}$.

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 a la brecha entre ambos vehículos:

Si $k > j$ se tiene: $d(i, t) = k - j - 1$ y

Si $k < j$ se tiene: $d(i, t) = k - j + (M - 1)$

El caso $k > j$ implica que $a(i + 1, t)$ se encuentra después de $a(i, t)$ en el lattice sucede siempre para L de frontera abierta y en la mayoría de los casos de frontera periódica. El caso $k < j$ implica que $a(i + 1, t)$ se encuentra antes de $a(i, t)$ en el lattice sucede en particular con L de frontera periódica para $a(i, t) = a(N, t)$, el último vehículo del lattice; y $a(i + 1, t) = a(1, t)$, el primer vehículo del lattice.

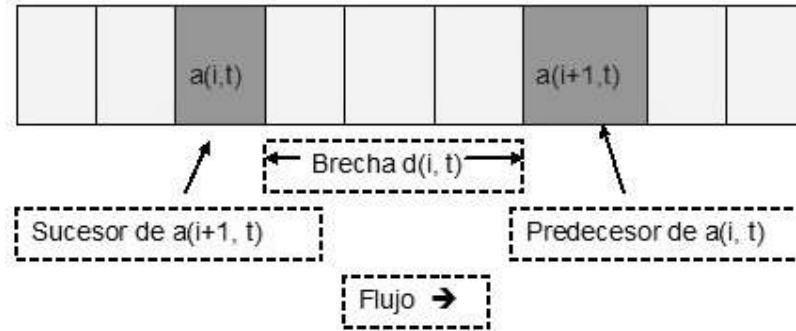


Figura 8. Sección de un carril en un modelo de tránsito de vehículos con un AC, se muestran los conceptos de predecesor, sucesor y brecha.

2.4 Modelo basado en dinámica de fluidos

Los modelos de tránsito basados en la teoría de dinámica de fluidos han sido desarrollados desde los años 50's en estos modelos el tránsito, puede ser visualizado como un torrente de líquido o fluido; por lo cual un estudio de tránsito basado con el enfoque de la teoría de dinámica de fluidos trata al tránsito como un fluido unidimensional. Denotando $(x; t)$ y $J(x; t)$ la densidad y el flujo en una posición aleatoria x en un instante arbitrario t , respectivamente; la ecuación de continuidad que relaciona a la densidad y el flujo del tránsito como un fluido en una vía sin intersección es la ecuación 1:

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial J(x,t)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

Trabajo Final de Proyecto Terminal

La ecuación 1 sugerido por Lighthill y Witham tiene dos funciones desconocidas (x ; t) y $J(x; t)$ tras lo cual asumen que la función $J(x; t)$ es determinada por la función ($x; t$) o sea que $J(x; t) = J(c(x; t))$ sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene:

$$\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} + v g \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial x} = 0$$
$$\text{donde } v g(\rho) = \frac{dJ(c)}{dc} \quad (2)$$

Los modelos basados en teoría de dinámica de fluidos también contemplan embotellamientos mediante la incorporación de elementos como presión del gas y viscosidad.

2.5 Modelos basados en teoría de colas

La teoría de colas indica que un servicio es proporcionado con cierta velocidad y que las peticiones que llegan solicitando el servicio llegan con cierta velocidad. El tiempo entre el arribo del elemento n y el elemento $n-1$ se denomina tiempo de arribo y la longitud de tiempo en la cual el elemento permanecerá en el servicio, tiempo de servicio. Si denotamos a:

λ como la velocidad de arribos y

μ como el índice de salidas desde una cola no vacía,

entonces el promedio de la distribución de arribos es

$$1/\lambda$$

y el promedio de la distribución de tiempos de servicio es

$$1/\mu$$

el índice de esas cantidades

$$\lambda/\mu = \rho$$

Trabajo Final de Proyecto Terminal

se denomina la intensidad de tránsito de la cola. Cuando la velocidad a la que arriban las solicitudes es mayor que la velocidad de servicio se forma una cola de solicitudes. Las colas pueden ser conectadas para reflejar redes de transportación. Siguiendo con esta idea en 1997 Gawron introdujo un modelo similar a los modelos para flujo de tránsito de autos basados en colas, con la diferencia fundamental de que su modelo incluía derramamientos. El modelo consistía en que el número de autos que dejan la fila es restringido por la capacidad de la cola y por el número de autos que se acomodan en la cola; si la cola destino de un auto está llena, este permanecerá donde está. Cada vez que un auto entra a una cola se calcula su tiempo de viaje esperado.

Capítulo 3. Solución

El Modelo

Las células del AC miden 7.5 m.

N = Número total de vehículos en un camino de longitud L

La densidad del AC es N/L

$g(t)$ = Número de sitios (células) vacías al frente del n - ésimo vehículo en el tiempo t

Supongamos que existen dos rutas A y B tal que ambas tienen la misma longitud L .

En cada etapa de tiempo un vehículo es generado en la entrada de las dos rutas y podrá elegir una de ellas.

Si un vehículo entra a una de las dos rutas su movimiento sigue la dinámica del modelo de autómata celular.

Si un nuevo vehículo no es capaz de entrar a la ruta deseada entonces, es borrado.

Un vehículo es borrado después de que alcanza el punto final.

Dos tipos de vehículos son introducidos en el modelo:

- El vehículo estático
- El vehículo dinámico

Trabajo Final de Proyecto Terminal

Un vehículo es llamado dinámico, si elige su ruta con base en la información dada.

Un vehículo es llamado estático, si elige una ruta aleatoriamente, ignorando la información dada.

La densidad de vehículos dinámicos es d y $(1 - d)$ es la densidad de los vehículos estáticos.

La simulación será realizada siguiendo las siguientes etapas:

Primero: las rutas están vacías; Segundo: entran los vehículos en las rutas con base en las cuatro estrategias. La información es generada, transmitida y desplegada en un tablero en cada etapa de tiempo; tercero: el usuario elegirá la ruta con las mejores condiciones de tránsito de acuerdo a la información que exista a la entrada de las dos rutas.

Las condiciones del camino son caracterizadas por el flujo de las dos rutas.

El flujo es definido como:

$$F = V(\text{media}) * \rho = V(\text{media}) * N/L$$

donde:

$V(\text{media})$ representa la velocidad media de todos los vehículos sobre el camino.

N representa el número de vehículos en cada camino.

L es la longitud de los dos caminos.

Las tres estrategias de retroalimentación son:

1. Estrategia del tiempo de viaje (ETV). Al inicio de la simulación ambas rutas están vacías y la información de tiempo de recorrido sobre un tablero está en cero. Cada conductor registra el tiempo cuando entra a cada una de las rutas y una vez que el vehículo deja el sistema de las dos rutas, su tiempo de recorrido es transmitido al tablero y en ese tiempo un nuevo vehículo elige el camino con el tiempo más corto.
2. Estrategia de velocidad media (EVM). En cada etapa de tiempo cada vehículo sobre las rutas transmite su velocidad al centro de control de tráfico, el cual trata la información y despliega la velocidad media de los vehículos de cada ruta en el tablero. Los usuarios en la entrada de la ruta eligen el camino con mayor velocidad media.

Trabajo Final de Proyecto Terminal

3. Estrategia de coeficiente de congestión (ECC). En cada etapa de tiempo cada vehículo transmite información sobre su posición en la ruta, la información es transmitida al centro de control de tráfico. El trabajo del centro de control de tráfico es calcular el coeficiente de congestión de cada camino y desplegarlo en el tablero. Los usuarios al inicio de la ruta eligen la ruta con el coeficiente de congestión más pequeño.

Para todas las estrategias se aplica:

- Al final de las dos rutas, el auto más cercano a la salida la toma primero.
- Si el auto al final de las dos rutas tiene la misma distancia a la salida entonces, el vehículo con mayor velocidad toma la salida.
- Si los autos al final del camino de las dos rutas tiene la misma distancia a la salida y la misma velocidad, entonces el auto que está en la ruta con más autos sale primero.

Si las reglas a, b y c son satisfechas al mismo tiempo, entonces los autos salen aleatoriamente.

El sistema muestra información sobre el status del tránsito en las dos vías usando las cuatro estrategias. El usuario puede determinar cuándo detener la simulación.

El proyecto se implementó en el lenguaje Java 2 SE, por la portabilidad en diferentes arquitecturas, y la capacidad que tiene en el ámbito visual para la implementación de la interfaz gráfica. También se hizo uso del IDE NetBeans para la programación del proyecto. El sistema se desarrolló y ejecutó en el Sistema Operativo Windows 7, por la facilidad de uso del IDE NetBeans sobre dicha plataforma. Como la aplicación es portable se puede ejecutar en cualquier otro Sistema Operativo que cuente con la máquina virtual Java instalada.

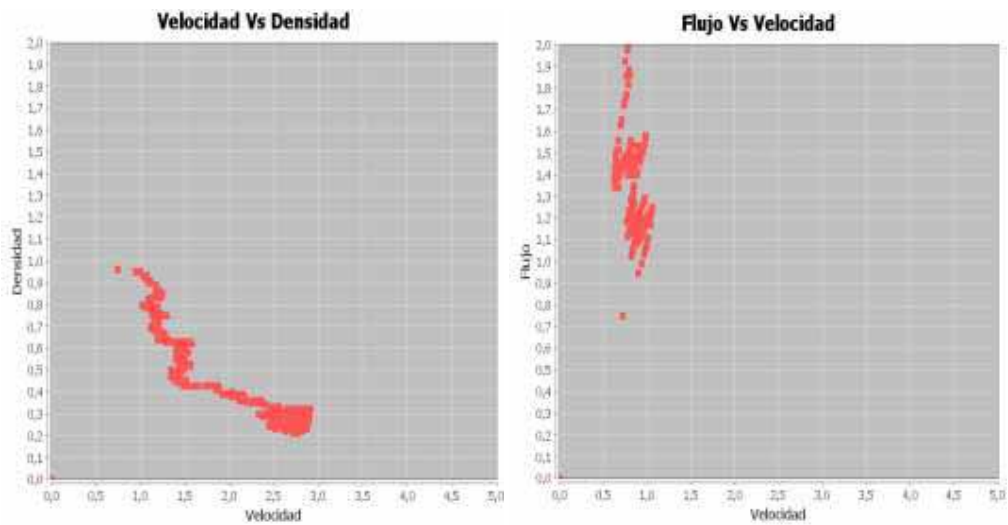
Capítulo 4. Simulación y Resultados

Trabajo Final de Proyecto Terminal

Estrategia de Tiempo de Viaje



Figura 9. Simulación con la estrategia de tiempo de viaje



Trabajo Final de Proyecto Terminal

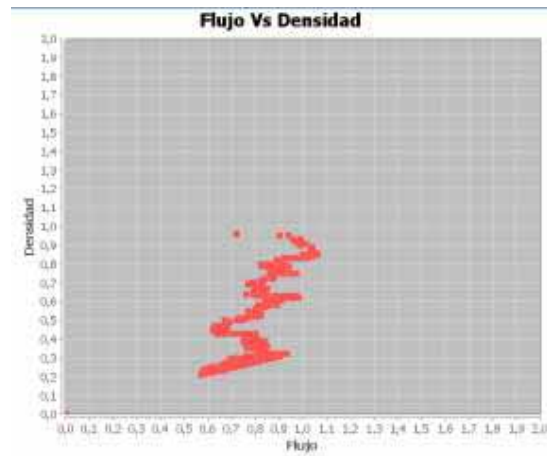


Figura 10. Gráficas de la simulación de la figura 9.

Estrategia de Velocidad Media



Figura 11. Simulación con la estrategia de velocidad media

Trabajo Final de Proyecto Terminal

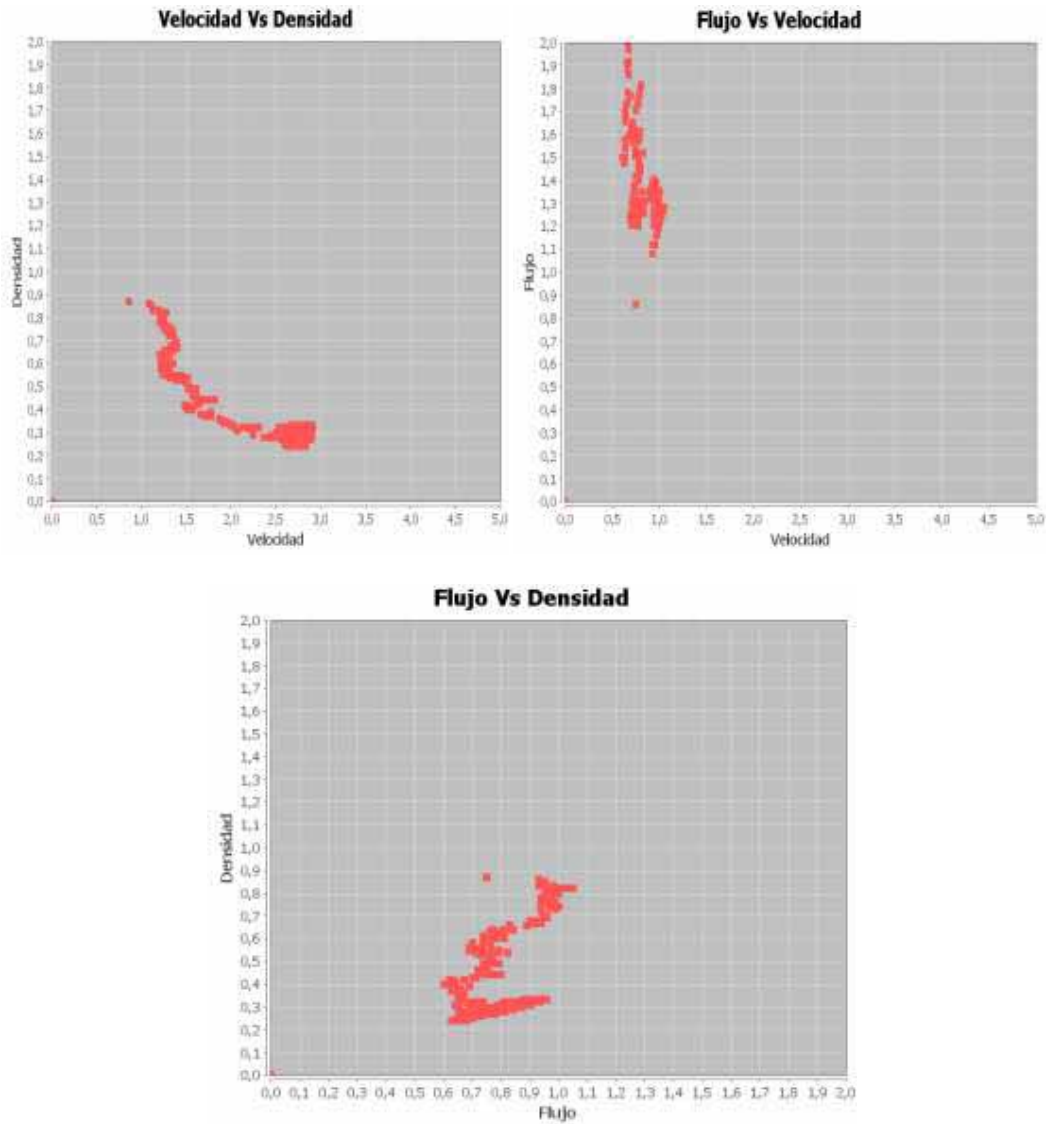


Figura 12. Gráficas de la simulación de la figura 11.

Trabajo Final de Proyecto Terminal

Estrategia Coeficiente de Congestión

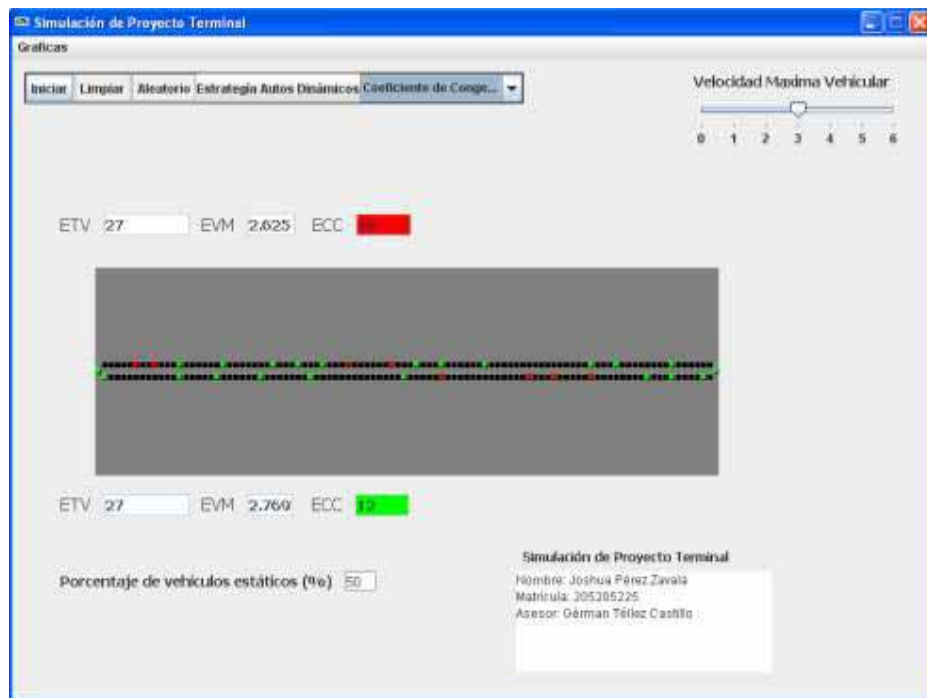
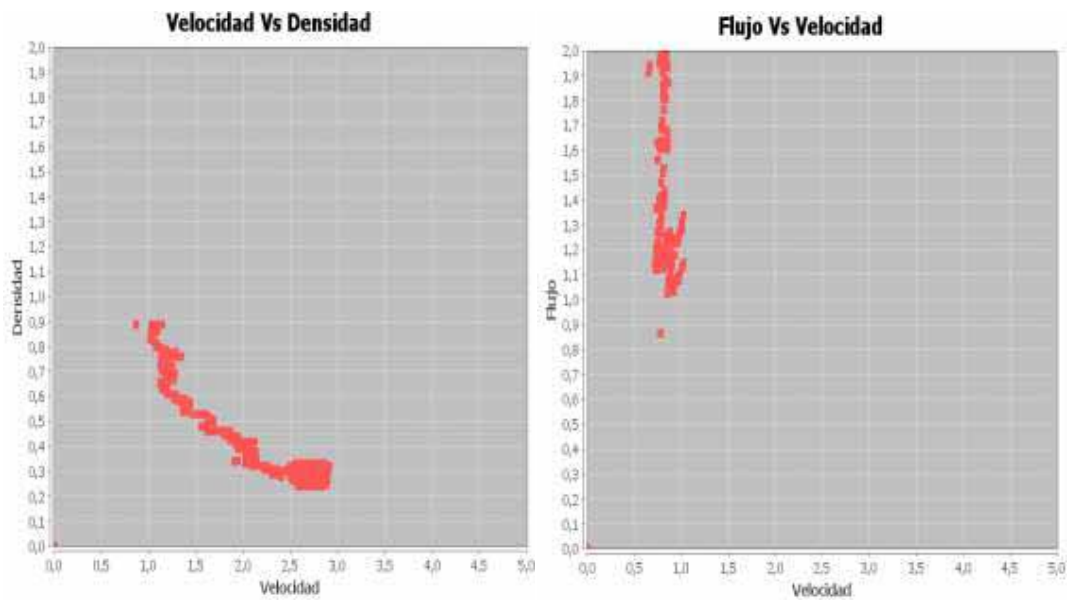


Figura 13. Simulación con la estrategia de coeficiente de congestión



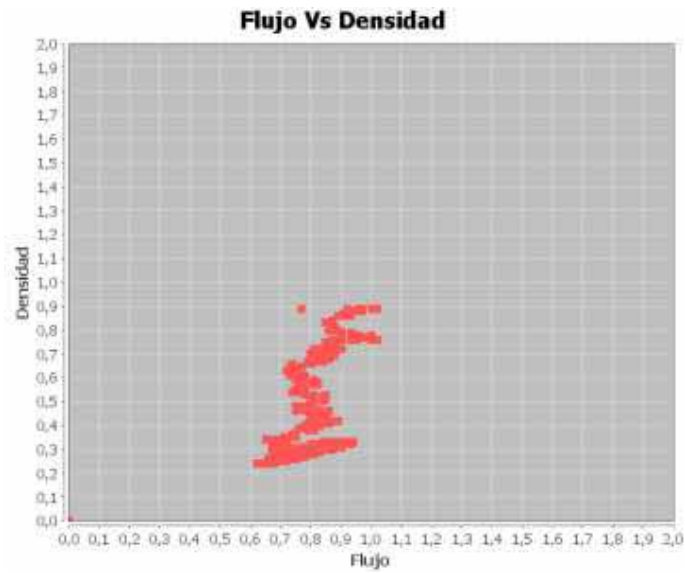


Figura 14. Gráficas de la simulación de la figura 13.

Estrategia Predictiva

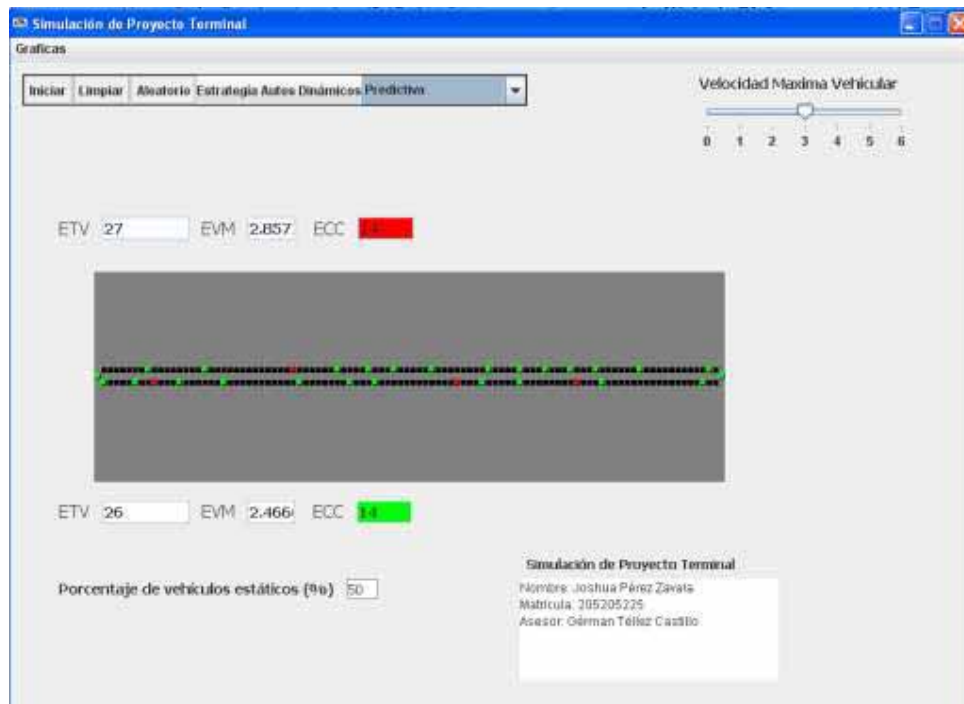


Figura 15. Simulación con la estrategia Predictiva

Trabajo Final de Proyecto Terminal

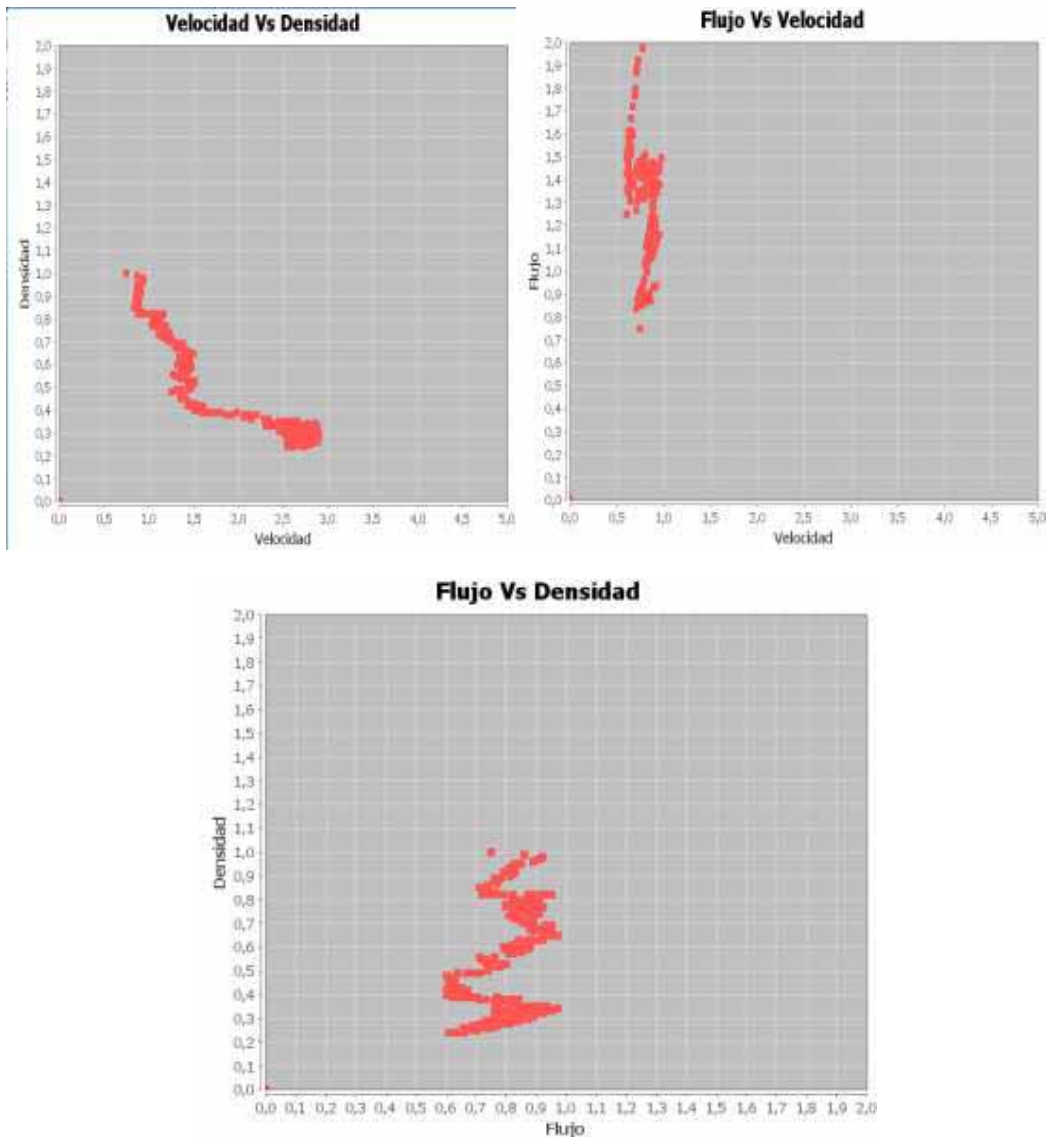


Figura 16. Gráficas de la simulación de la figura 15

Bibliografía

1. I. Prigogine, F.C. Andrews. **A Boltzmann-like Approach for Traffic Flow.** *Operations Research*, Vol. 8, n6, pp. 789-797, (1960).
2. Paveri-Fontana S L. **Transportation Research** 9:225-235, (1975).
3. K. Nagel and M. Schreckenberg. **A cellular automaton model for freeway traffic,** *J. Phys. I France* 2 22212229, (1992).
4. O. Biham, A. A. Middleton & D. Levine: **Self-organization and a dynamical transition in traffic flow models.** *Physical Review A*, Vol 46, Issue 10, (1992), R6124-R6127.
5. Yasushi Yokoya. **Dynamics of traffic flow with real-time traffic information.** *Physical Review E* 69, 016121, (2004).
6. Pushkin Kachroo and Kaan Ozbay, **Real Time Dynamic Traffic Routing Based on Fuzzy Feedback Control Methodology,** *Transportation Research Record* 1556, pp 137-146, (1996).
7. JoachimWahle, Ana Lúcia C. Bazzan, Franziska Klügl and Michael Schreckenberg **Decision dynamics in a traffic scenario.** *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications.* Volume 287, Issues 3-4, 1 December 2000, Pages 669-681.
8. K. Lee, P.M. Hui, B. H.Wang, and N. F. Johnson, **Effects of announcing global information in a two-route traffic flow model,** *J. Phys. Soc. Jpn.* 70, 3507 (2010).
9. Stephen Wolfram, **A New Kind of Science,** *Wolfram Media Inc.,* 2002. ISBN: 1-57955-008-8.