



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN

“UN MODELO REALISTA
PARA EL TRÁFICO VEHICULAR HETEROGÉNEO
BASADO EN EL PARADIGMA DE AUTÓMATAS CELULARES”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA
(COMPUTACIÓN)

P R E S E N T A

HÉCTOR ALONSO GUZMÁN GUTIÉRREZ

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. MARÍA ELENA LÁRRAGA RAMÍREZ

México, D.F.

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

*A mis padres,
Sonia y Héctor.*

Agradecimientos

Estoy muy agradecido con mis cinco sinodales, doctores todos: Luis Álvarez Icaza, Héctor Benítez Pérez, Carlos Gershenson-García, Ma. Elena Lárraga Ramírez, Jesús Antonio del Río Portilla, por haberme compartido su valiosa experiencia y haber enriquecido mi trabajo y la Ciencia en general.

Mi especial agradecimiento a mi tutora, la Dra. Ma. Elena, por compartir conmigo su conocimiento, su tiempo, sus consejos, sus ideas y su amistad. También expreso mi gratitud de manera especial para el Dr. Luis porque desde el inicio de la investigación aportó su tiempo y su experiencia, sobre todo en momentos de incertidumbre.

Gracias a todos los profesores de las materias que fueron parte de mi maestría, aprendí lo que nunca imaginé y me quedé con la curiosidad de muchas otras cosas que algún día conoceré.

Muchas gracias para algunas personas que recordaré como las que hacen mejor su trabajo y que se preocupan por sus compañeros en todos los sentidos: Amalia, Cecilia, Diana y Lulú, todas miembros del personal administrativo del Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación UNAM.

Agradezco a las instituciones que hicieron posible la realización de esta tesis: al Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación, por darme la oportunidad de estudiar una maestría de excelencia; al Instituto de Ingeniería por brindarme la beca para la elaboración de mi tesis; a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme los servicios educativos, laborales, sus instalaciones y un panorama más grande del Universo, además de los beneficios del proyecto DGAPA UNAM IN107909 y finalmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca CVU-331074 que me otorgó para estudios de maestría.

Esta tesis se desarrolló en un ámbito estrictamente académico; sin embargo, las personas más importantes de mi vida están en mi ámbito personal y algunos de ellos también en el académico.

Papá, mamá, les estoy infinitamente agradecido por su apoyo en esta etapa de mi vida. Ustedes solían decir que nos apoyarían siempre, en particular que nos impulsarían a estudiar un posgrado si así lo queríamos. Aquí está un muestra más del cumplimiento de su palabra.

Hermanas, muchas gracias por ser estar siempre ahí para apoyarme, para animarme, convivir, reír, llorar y soñar. Espero que cada vez seamos una familia más fuerte y unida.

Abuelos, ustedes son un claro ejemplo de que se puede vencer hasta el más difícil de los problemas en la vida, gracias.

Cinthya, tengo tanto que agradecerte en este proyecto y en estos últimos años, tu eres mi compañera en el día a día, mi amiga, mi novia, mi motivadora. Sólo espero corresponderte tantas cosas buenas.

Gracias a todos mis amigos, de las más variadas procedencias, pero eso quizá es lo de menos. Son muy preciados los momentos en que podemos convivir y cruzar algunas palabras. Me hacen sentir una persona muy afortunada y querida.

Resumen

En los últimos años, el desarrollo de modelos de tráfico vehicular orientados al análisis y entendimiento del comportamiento del tráfico vehicular y la valoración de las alternativas para mejorar su desempeño, se ha convertido en una necesidad. En este trabajo presentamos un modelo nuevo basado en Autómatas Celulares (AC) para la modelación del tráfico vehicular de varios carriles con vehículos heterogéneos. El objetivo se enfocó en lograr un modelo más acorde con el desempeño microscópico, tanto de los vehículos como de los conductores reales y no solamente que imitara los fenómenos del tráfico vehicular. El modelo resultante extiende un modelo reciente para el tráfico vehicular de un solo carril, que incorpora tres distancias de seguimiento requeridas por un vehículo para acelerar, desacelerar o mantener su velocidad en forma segura y que se usaron en la definición de las reglas de cambio de carril. Por lo tanto, el modelo desarrollado toma en cuenta el espaciamiento entre vehículos, su velocidad relativa y capacidades de aceleración/desaceleración con valores límite acordes a los de los vehículos reales. Los resultados de simulación obtenidos de un sistema de dos carriles con condiciones de frontera periódica muestran que el modelo reproduce diversos fenómenos que se han observado, como la inversión de uso de carril y la dependencia del número de cambios de carril en función de la densidad. Además, el modelo es robusto cuando se consideran diferentes tipos de vehículos; de tal manera que en densidades bajas el flujo vehicular no se domina por la presencia de camiones, es decir, vehículos con mayor longitud y menor velocidad límite que los automóviles comunes. Aún más, el modelo que propusimos en este trabajo preserva la simplicidad computacional que caracteriza a los modelos basados en AC y es computacionalmente paralelizable, lo que lo hace adecuado para su uso en tiempo real para la predicción y análisis de tráfico vehicular.

Abstract

In recent years, the development of vehicular traffic models oriented to analyze and understand the behavior of vehicular traffic and the evaluation of alternatives to improve its performance has become a necessity. We present a new model based on Cellular Automata (CA) for modeling multi-lane vehicular traffic with heterogeneous vehicles. The objective was focused on achieving a more consistent model with the microscopic performance of both vehicles and real drivers and not only on imitating the vehicular traffic phenomena. The resulting model extends a recent single lane vehicular traffic model, which incorporates three safe distances required for a vehicle to accelerate, decelerate or keep its speed safely, which were used in the definition of the lane changing rules. Therefore, the developed model takes into account the space between vehicles, their relative speed and acceleration/deceleration capabilities with limit values according to the actual vehicles. The simulation results obtained from a two-lane system with periodic boundary conditions show that the model reproduces several phenomena that have been observed, such as the lane usage inversion and dependence on the number of lane changes as a function of density. In addition, the model is robust when considering different types of vehicles, so that at low densities vehicular flow is not dominated by the presence of trucks, i.e. vehicles with greater length and lower speed limit than common cars. Furthermore, the model proposed in this thesis preserves the computational simplicity that characterizes the AC-based models and is computationally parallelizable, which makes it suitable for real time use for prediction and vehicular traffic analysis.

Tabla de Contenido

Introducción	1
1. El paradigma de modelación de los Autómatas Celulares y conceptos relacionados	7
1.1. Introducción a los autómatas celulares	7
1.2. Definición de los autómatas celulares	8
1.3. Definición formal de los autómatas celulares unidimensionales	8
1.3.1. Condiciones de frontera	10
1.4. Aplicaciones de los autómatas celulares	11
1.4.1. Simulación de sistemas naturales	11
1.4.2. Estudios Teóricos	11
1.4.3. Realización de tareas específicas	11
2. El tráfico vehicular y su modelación	13
2.1. El tráfico vehicular	13
2.2. Consideraciones y conceptos para el estudio del tráfico vehicular	14
2.2.1. Consideraciones empíricas	15
2.2.1.1. El diagrama fundamental y las fases del tráfico vehicular	15
2.2.2. Clasificación de los modelos de tráfico vehicular	18
2.2.2.1. Modelos macroscópicos	19
2.2.2.2. Modelos microscópicos	21
3. Modelación de tráfico vehicular con autómatas celulares	27
3.1. El modelo Nagel-Schreckenberg y algunas modificaciones	27
3.1.1. Definición del modelo Nagel-Schreckenberg	28
3.1.2. El modelo de Krauss y el modelo de Lee	29
3.1.3. Un modelo de autómatas celulares realista basado en políticas de manejo seguras	31
4. Un nuevo modelo para el tráfico vehicular de varios carriles	41
4.1. Consideraciones para la simulación	42
4.2. Definición del modelo	43
4.2.1. Definición de las reglas de cambio de carril	44
4.3. Análisis de simulación	50

4.4. Comentarios del capítulo	60
5. Conclusiones	63
A. Modificaciones al modelo LAI	67
B. Sintonización de los parámetros del modelo	71
B.1. Ajuste de parámetros con reglas experimentales	71
B.2. Ajuste de parámetros con las reglas definitivas	74
C. Estabilidad del sistema	77

Introducción

En los países desarrollados, los sistemas de transporte se basan principalmente en el uso de vehículos automotores, lo que ha originado un incremento continuo de la demanda vehicular y por lo tanto, que se sobrepase la capacidad para la cual fueron diseñadas sus vías, calles o autopistas. Como consecuencia, la contaminación ambiental y los congestionamientos vehiculares se incrementan día con día, mientras que la seguridad vial se decrementa. Por lo que el tráfico vehicular ha llegado a ser uno de los problemas sociales y económicos más importantes de la vida diaria. Aunque la construcción de nuevas vías de transporte o la modificación de las vías existentes pueden ser un método simple y efectivo para disminuir las consecuencias inducidas por la alta demanda vehicular, debido a diversas restricciones espaciales, sociales y económicas, no es fácil de implementar en la actualidad. La alternativa es buscar nuevas soluciones orientadas a un uso más eficiente de las infraestructuras existentes, que permitan mejorar el desempeño de las mismas. Sin embargo, probar los impactos de estas nuevas soluciones en el mundo real antes de su implementación final puede ser muy costoso y no factible. Esto ha motivado el desarrollo continuo de modelos de tráfico vehicular orientados para el análisis y entendimiento del comportamiento del tráfico vehicular y la valoración de las alternativas para mejorar su desempeño.

La modelación del tráfico vehicular tiene una historia muy amplia, se ha desarrollado desde el punto de vista de la ingeniería, la física y las matemáticas aplicadas (Prigogine, et al., 1971; Chowdhury, et.al, 2000; Helbing, 2001; Schadschneider, et. al., 2007). Las clases de modelos usados para su descripción se pueden clasificar en dos grupos principales, los modelos microscópicos y los modelos macroscópicos. Los modelos microscópicos representan a cada vehículo en forma separada, lo que permite considerar diferentes tipos de vehículos o conductores con propiedades individuales. En los modelos macroscópicos, el estado del sistema se describe a través de densidades, por ejemplo, la densidad de masa derivada de las posiciones de los vehículos. A lo largo de los años se han desarrollado diversas aproximaciones para modelación (Chowdhury, et.al, 2000; Helbing, 2001). Los modelos hidrodinámicos ven el tráfico como un fluido compresible formado por varios vehículos. Esta aproximación es macroscópica dado que se basa en densidades más que distinguir entre vehículos. Los modelos de cinética de gas tratan de derivar modelos macroscópicos a partir de ecuaciones microscópicas (Prigogine, et al., 1971). El tráfico vehicular se trata como un gas de partículas que interactúan, que se describe por una función de distribución con la evolución temporal dada por una ecuación de Boltzmann. 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 de Newtoniana para describir el tráfico vehicular (Brackstone, et.al., 1999). La aceleración se determina, por ejemplo, por la diferencia de velocidad al vehículo precedente. Mientras que en los modelos de velocidad óptima (Bando, et al., 1995), 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 AC son modelos microscópicos, en los cuales la dinámica vehicular depende de un conjunto de reglas de evolución locales y simples, fáciles de entender, computacionalmente eficientes y suficientes para emular el desempeño que se observa en el tráfico vehicular.

Profundamente arraigados en la investigación básica en matemáticas y ciencias de la computación, los AC se reconocen como un paradigma de modelado intuitivo del tráfico vehicular. En los modelos para tráfico vehicular basados en AC, el espacio que se simula, el tiempo y las variables de estado que se usan son discretas. Así, la red de transporte se parte en una malla con una topología ordenada, inducida por la topología real, que respeta las relaciones de conectividad y los sentidos de circulación de la red original. El estado de los vehículos se caracteriza por su posición y velocidad. La primera está determinada por su ubicación dentro de la malla y la segunda surge de las relaciones que el vehículo bajo análisis guarda con su entorno, determinado por los vehículos vecinos y la presencia de elementos externos (intersecciones, semáforos, etc.). La dinámica vehicular de los modelos de AC se basa usualmente en reglas intuitivas y locales, que permite reproducir las decisiones que los conductores toman basados en su situación actual, la relación con sus vecinos, su metas, etc. Este hecho es importante ya que permite tomar en cuenta por ejemplo, aspectos psicológicos o de comportamiento de los conductores en una forma natural y eficiente. Además, la interacción local entre los vehículos permite capturar dinámicas a un nivel microscópico y propagarlas a un nivel macroscópico. Por lo que los modelos para tráfico vehicular basados en AC han llegado a ser un método bien establecido para modelar, analizar, entender y aún para pronosticar el desempeño del tráfico vehicular (Maerivoet, et.al., 2005)

El primer modelo que mostró las bondades de los AC para simular el tráfico vehicular surgió al inicio de los años 90s, cuando los alemanes (Nagel, et.al., 1992) propusieron un modelo (referido como NaSch) para la simulación del tráfico vehicular de carreteras en un solo carril. Aunque el modelo NaSch reproduce la estructura básica de la relación densidad-flujo observada empíricamente y la formación espontáneas de estancamientos vehiculares, no exhibe otras características del tráfico vehicular como metaestabilidad, el flujo sincronizado, decaimiento de la capacidad vehicular, etc. Por lo que desde su creación se han desarrollado un número considerable de modificaciones ó extensiones del modelo NaSch enfocadas en el tráfico vehicular de un solo carril (ver por ejemplo, (Barlovic, et.al., 1998; Fuki, et.al., 1996; Helbing, et.al., 1999; Jiang, et.al., 2005; Kerner, et.al., 2002; Knospe, et.al., 2000; Larraga, et.al., 2004; Larraga, et.al., 2005; Li, et.al., 2001; Maerivoet, et.al., 2005)).

Sin embargo, la mayoría de los modelos se han sido orientados a reproducir los fenómenos que ocurren en el tráfico vehicular real y raramente han considerado una velocidad de desaceleración con un valor límite semejante al de los vehículos reales. De hecho, la mayoría de los modelos existentes han considerado explícitamente criterios libres de colisión, mediante la imposición de desaceleraciones arbitrariamente grandes (de 100 km/h a 0 en 1s) que se alejan de la capacidad práctica de frenado en pavimento y las condiciones de los neumáticos.

Desde luego, que estas desaceleraciones abruptas exceden las capacidades de desaceleración reales en condiciones normales.

Recientemente, en la búsqueda de nuevos modelos de AC que en su definición tomen en cuenta los mecanismos que conllevan a los fenómenos que suceden en el tráfico real y no solamente a su reproducción, se desarrolló un nuevo modelo de AC para un solo carril (Larraga, et.al., 2010). Este modelo (que aquí referiremos como modelo LAI) trata de capturar las reacciones de los conductores a las condiciones de tráfico vehicular, mientras se preserva la seguridad en las carreteras. De tal manera que el desempeño humano se modela como la respuesta del conductor a las condiciones de tráfico locales. Para este propósito, el modelo toma en cuenta para la definición de la dinámica vehicular el espacio existente entre dos vehículos, su velocidad relativa y las capacidades de aceleración/desaceleración con un valor límite acorde al de los vehículos reales. La determinación de las capacidades de aceleración/desaceleración se derivan de principios de conducción segura para los conductores normales y en acuerdo con las prácticas de transporte y las reacciones humanas (Godbole, et al., 1994; Carbaugh, et. al., 1997); tal que los vehículos no puedan cambiar las velocidades abruptamente (como en la realidad). De tal manera. que el modelo LAI rectifica la desaceleración irreal de los vehículos cuando se enfrentan a a un estancamiento o incidente, como ocurre en la mayoría de los modelos de AC previos. Además, el modelo es muy simple y computacionalmente eficiente. Sin embargo, el modelo sólo se ha estudiado sobre el tráfico en un carril y para simular situaciones de tráfico más complejas y reales, se debe considerar la modelación del tráfico vehicular con varios carriles (multicarril). Esto se debe a que un modelo de un solo carril no es capaz de modelar el tráfico real, principalmente porque el flujo vehicular real se compone usualmente de vehículos que tienen diferentes longitudes y velocidades, y su consideración no es posible con modelos de un solo carril, debido a que no es posible el rebase vehicular; por lo tanto los vehículos más lentos dominan el flujo vehicular.

Diversas modelos basados en AC para el tráfico vehicular multicarril ya se han desarrollado. Uno de los primeros enfoques para modelar el comportamiento de cambio de carril sobre una carretera de dos carriles fue el de Nagatani (Nagatani, 1993). Su trabajo se basó en la regla determinística 184 de los AC (Wolfram, 2002). Uno de los elementos de sus reglas de cambio de carril, fue la existencia de estados en los cuales los bloques de vehículos se alternaban de un carril a otro, sin moverse siquiera. Para resolver este problema, Nagatani aleatorizó el comportamiento de cambio de carril (Nagatani, 1994). Después, Rickert et al. aplicaron esta metodología de cambio de carril, al extender el modelo NaSch para manejar tráfico unidireccional de dos carriles (Rickert, et. al., 1996). Más tarde, Wagner, et al. evaluaron el trabajo previo de Rickert et al. y concluyeron que éste no capturó ciertos aspectos (por ejemplo, la inversión de densidad) del flujo de tráfico muy bien (Wagner, 1997). Para este fin, ellos trabajaron sobre el trabajo previo, agregando una condición de seguridad más especializada, la cual toma en cuenta el hecho de que los vehículos deben considerar también los vehículos seguidores en el carril objetivo, de tal manera que se eviten las perturbaciones severas. Como comentario final, ellos establecen que las reglas de cambio de carril en un modelo de tráfico vehicular basado en AC típicamente no proveen un modelo microscópico realista, pero si tienen una buena correspondencia con las características macroscópicas observadas (por ejemplo, la frecuencia de cambios de carril). Nagel et al. introdujeron artificialmente un *parámetro de holgura*, el cual captura la inclinación de un conductor para realizar un

cambio de regreso al carril derecho. Además, ellos describieron una clasificación extensa de aproximadamente 10 reglas y criterios de cambio de carril que se encuentran en la literatura (Nagel, et.al., 1998). Chowdhury et al. ofrecen otro resumen excelente del tráfico multicarril (Chowdhury, et.al, 2000). Sin embargo, todos estos modelos se enfocan en la reproducción de diversos fenómenos que se han observado en el tráfico vehicular de varios carriles a un nivel macroscópico y no contemplan el desempeño microscópico, es decir, el de los vehículos. Por lo que estos modelos definen reglas de cambio de carril cuya dinámica vehicular es semejante al modelo NaSch, es decir, sólo contemplan el espaciamiento entre vehículos para la determinación de los cambios de carril y no consideran las velocidades.

En el año 2002, Knospe et al. propusieron un modelo que introduce la anticipación de la velocidad del vehículo precedente en la definición de las reglas de cambio de carril (Knospe, et.al., 2002). Sin embargo, las reglas son muy conservadoras y al igual que en todos los modelos previos basados en AC para el tráfico vehicular multicarril, no permiten que los vehículos lentos (camionetas, camiones, etc.) se muevan al carril de más a la izquierda. Esta prohibición de movimiento para los vehículos lentos es con la finalidad de evitar uno de los problemas que presentan los modelos, que es la formación de tapones vehiculares ocasionados por los vehículos lentos, los cuales tardan mucho tiempo en deshacerse. Además, si en el modelo se permite que los vehículos lentos se cambien al carril de más a la izquierda, el flujo vehicular se domina totalmente por los mismos. Sin embargo, creemos este comportamiento es consecuencia de no considerar distancias y velocidades relativas entre los vehículos en las reglas de cambio de carril, como ocurre en la realidad; su consideración es importante para solucionar el problema relacionado a los tapones vehiculares y el dominio del flujo por los vehículos lentos que se presenta en los modelos basados en AC para el tráfico vehicular multicarril.

Por lo tanto, el objetivo general de este trabajo de tesis es proponer un nuevo modelo basado en AC para el tráfico vehicular de vehículos heterogéneos, acorde con el desempeño real tanto de los vehículos como de los conductores. De tal manera que la definición de la dinámica vehicular no se oriente solamente a reproducir los distintos fenómenos que ocurren en el tráfico vehicular real, sino que estos se reproduzcan en forma implícita como resultado de una definición de dinámica vehicular más acorde al desempeño microscópico de los vehículos, los conductores reales y prácticas de transporte. Para este propósito, se extenderá el modelo LAI propuesto en (Larraga, et.al., 2010), para la modelación del tráfico vehicular en varios carriles. De tal manera que se propondrá un conjunto de reglas de cambio de carril, el cual tome en cuenta en su definición distancias de seguimiento seguro entre vehículos que consideren velocidades y distancias relativas e incorpore capacidades de aceleración/desaceleración vehicular con un valor límite en forma semejante al modelo LAI. El nuevo conjunto de reglas también deberá considerar las normas viales para las carreteras de México y el desempeño real, tanto de los vehículos como de los conductores. Además, el nuevo modelo debe de (i) consistir de reglas locales y simples; (ii) ser robusto al considerar vehículos lentos, esto es, el flujo no debe de dominar por una pequeña fracción de vehículos lentos; (iii) reproducir las curvas de cambio de carril empíricas en función de la densidad; (iv) mostrar la inversión de uso de carril que se ha observado empíricamente (en el caso de reglas de cambio de carril en las que se considera un carril preferente para conducir) y (v) no debe cambiar el desempeño dinámico del modelo en un carril. Para ello se realizará un profundo análisis de

resultados basados en simulación y se hará una comparación con datos empíricos reportados en la literatura. Al definir el conjunto de reglas de cambio de carril, éste se debe mantener simple y computacionalmente paralelizable. De esta forma, se espera lograr un modelo más real y computacionalmente eficiente. El nuevo modelo servirá como un precedente para la creación futura de un simulador para el análisis de las vías en México, donde escasamente se realizan este tipo de estudios a nivel microscópico.

Con la introducción de distancias y velocidades relativas en la definición de las reglas para la ejecución de los cambios de carril y no solamente en la actualización de la velocidad se corrigen unos de los problemas que se presentan en los modelos existentes basados en AC: la formación de tapones vehiculares que duran mucho tiempo y la dominación del flujo vehicular por vehículos lentos (camiones) cuando se permite su paso al carril de más a la izquierda.

El trabajo de tesis se presentará en la siguiente forma, con la finalidad de ayudar al lector a un mejor entendimiento del trabajo, en el capítulo 1 se introducirán los autómatas celulares (AC) y algunos conceptos relacionados.

En el capítulo 2, con el objetivo de introducir el problema sobre el que se centra este trabajo de tesis, se describirá el problema del tráfico vehicular, algunos conceptos relacionados al mismo y a su modelación. Así como una breve descripción de diversos modelos existentes en la literatura.

En el capítulo 3 se introducirá brevemente la modelación de tráfico vehicular basada en AC. Se describirán algunas consideraciones empíricas importantes para la modelación, simulación computacional y el análisis de resultados. Además, se proporcionará la descripción de algunos modelos existentes de AC para el tráfico vehicular importantes y fundamentales para el desarrollo de este trabajo de tesis. Particularmente, se describirá en forma detallada el modelo LAI, que representa la base del modelo que se propondrá en este trabajo de tesis.

En el capítulo 4, se definirá un modelo nuevo de AC para modelar el tráfico vehicular de sistemas multicarril con vehículos heterogéneos, el cual introduce distancias y velocidades relativas en la definición de las reglas de cambio de carril. En particular, se presentarán resultados de simulación para sistemas con dos carriles, sin embargo, se mostrará que el modelo puede aplicarse a sistemas con más carriles sin cambiar su definición. Los resultados se presentarán para un sistema de dos carriles con dos tipos de vehículos, automóviles y camiones, y reglas de cambio de carril con una dinámica vehicular semejante a las normas viales de las carreteras en México. Se mostrará, que el modelo reproduce diversos fenómenos que se han observado, como la inversión de uso de carril y la dependencia del número de cambios de carril en función de la densidad. La finalidad será mostrar que el modelo es robusto cuando se consideran diferentes tipos de vehículos, es decir, en densidades bajas el flujo vehicular no se dominará totalmente por la presencia de un bajo porcentaje de los vehículos lentos.

Por último se presentarán las conclusiones de este trabajo.

Adicionalmente, se incluyen tres apéndices. En el apéndice A se describirá a detalle una pequeña modificación a la definición del modelo LAI para la consideración de vehículos heterogéneos, la cual será fundamental para reducir los tapones vehiculares y su duración. Se presentará un análisis de resultados de simulación que justifican la modificación al modelo LAI. Por otra parte, en el apéndice B se presentará el proceso de sintonización de los parámetros del nuevo modelo para reproducir las observaciones empíricas del tráfico vehi-

cular multicarril, el cual requiere un arduo trabajo de simulación y análisis de resultados. Finalmente en el apéndice C se presentará un análisis de datos de simulación para garantizar las condiciones de estabilidad del sistema bajo estudio.

Finalmente se presentarán las referencias de este trabajo de tesis en un orden alfabético.

Capítulo 1

El paradigma de modelación de los Autómatas Celulares y conceptos relacionados

Los Autómatas Celulares (de aquí en adelante referenciados como AC) se emplean en una variedad de contextos de modelación. Como sucede con otras herramientas de modelación matemática, sus capacidades de modelación se fundamentan precisamente en sus propiedades matemáticas. Sin embargo, las discusiones acerca de los AC cuando se usan para modelación tienden a no distinguir claramente entre sus propiedades matemáticas puras y su potencial computacional y de representación. Para entender la contribución de los AC a la práctica de la modelación y la simulación, se requiere primero describir los AC en sí mismos. En este capítulo, se introducirá la definición de los AC, sus propiedades y algunos conceptos relacionados. También se describirán brevemente algunas de sus aplicaciones, en particular, para la modelación de sistemas naturales y físicos con un comportamiento complejo, como el tráfico vehicular.

1.1. Introducción a los autómatas celulares

La modelación computacional es un elemento integrador indispensable para realizar la predicción científica de muchos sistemas en ciencias e ingeniería. Actualmente, la modelación basada en simulación computacional ha llegado a ser una de las estrategias de las que dispone la ciencia para predecir sucesos en sistemas con un alto grado de complejidad. Esta complejidad es tal que la matemática clásica no resulta suficiente para expresar todos los fenómenos que ocurrirán en el sistema. Los AC han llegado a ser uno de los paradigmas computacionales más poderosos para describir, entender y simular el desempeño de tales sistemas complejos, en los que emergen propiedades colectivas y fenómenos de auto-organización global a partir de interacciones locales muy simples.

Los AC son sistemas dinámicos discretos tanto en el espacio como en el tiempo, cuyas variables pueden representar un número finito de estados. Son el arquetipo de sistemas discretos y buenos representantes de los sistemas que evolucionan según reglas. Básicamente, un sistema dinámico se caracteriza por tener un espacio de estados (posición, temperatura,

etc.) y una ley de evolución que determina el cambio de los estados en el tiempo.

Los primeros autómatas celulares rigurosamente establecidos se debieron a Von Neumann (Neumann, 1966) y Ulman (Ulam S., 1970). Si bien es verdad que durante cerca de 30 años los AC fueron considerados como una especie de curiosidad matemática sin aplicaciones, en la actualidad y fundamentalmente gracias a los trabajos de Wolfram (Wolfram, 1983; Wolfram, 1984; Wolfram, 1986), se están convirtiendo en una de las herramientas imprescindibles en el estudio de múltiples fenómenos naturales.

La ventaja principal de los AC no es precisamente su discretización, sino el hecho de que su dinámica se basa usualmente en reglas intuitivas y locales, lo que permite considerar diversos aspectos acerca del comportamiento del sistema a modelar, que con otra metodología resulta sumamente complicado. En lo siguiente, se introduce una descripción más formal de los AC.

1.2. Definición de los autómatas celulares

Definición 1 *Se denomina **autómata celular d -dimensional** a una colección de células dispuestas uniformemente según un espacio de d dimensiones, las cuales tienen interacciones locales. Cada célula posee un estado específico, el cual toma de un valor discreto de un conjunto finito de k estados, que evoluciona sincronamente con el paso discreto del tiempo, de acuerdo a un conjunto de reglas. El valor de una celda está influido por los estados de sus células vecinas. (Toffoli, et.al., 1987; Wolfram, 1983; Wolfram, 1984; Wolfram, 1986).*

Los autómatas celulares más utilizados suelen ser los unidimensionales o lineales (es decir con $d = 1$ y las células se disponen según una línea recta) y los bidimensionales (en cuyo caso $d = 2$ y las células se distribuyen en un plano). Salvo que se diga lo contrario, en lo que resta de este capítulo sólo se considerarán AC unidimensionales.

1.3. Definición formal de los autómatas celulares unidimensionales

Definición 2 *Formalmente, los **autómatas celulares unidimensionales** se pueden definir como una cuatripleta (L, S, N, Φ) (Cattaneo, et.al., 1999), donde:*

- L Es el espacio celular, el cual se compone precisamente de un arreglo de L celdas o células que integran el sistema en un espacio unidimensional, donde i denota la posición de cada celda y cada una de ellas tiene un estado del conjunto S , el cual se describirá a continuación.
- S es un conjunto finito de estados, el cual se forma por todos los valores posibles que una celda puede tomar en un instante de tiempo determinado, los cuales son enteros y discretos (con valores de 0 a $k - 1$: $S = \{0, 1, \dots, k - 1\}$).

- N_i es el conjunto finito de células para definir la vecindad que afecta el estado de la célula $\langle i \rangle$, según la regla de transición que se considere. Las vecindades más comunes en los AC son de carácter *simétrico*, de modo que la célula $\langle i \rangle$ es la célula central. Estas vecindades pueden escribirse de la siguiente manera:

$$N_i(r) = \{\langle i - r \rangle, \dots, \langle i - 1 \rangle, \langle i \rangle, \langle i + 1 \rangle, \dots, \langle i + r \rangle\} \quad (1.1)$$

donde r recibe el nombre de *radio de la vecindad* y es el número de celdas hacia adelante y hacia atrás que afectan el estado de una celda cualquiera de L , tal como se puede observar en la figura 1.1.



Figura 1.1: Vecindad simétrica, la cual se muestra en las celdas sombreadas

Existen otros tipos de vecindades no simétricas, por ejemplo la que se puede observar en la figura 1.2. Sin embargo, de aquí en adelante, si no se hace referencia expresa a lo contrario, se supondrá que las vecindades usadas son las simétricas.



Figura 1.2: Un caso particular de vecindad asimétrica, la cual se muestra en las celdas sombreadas

La cardinalidad de la vecindad se describe como sigue: $|N| = 2r + 1 = n$. Es decir, el nuevo estado de la celda $i \in L$ toma como entrada los estados de las n celdas que pertenecen al conjunto N_i .

- S^n es un conjunto finito, el cual se integra por todas las combinaciones posibles de los estados, tanto del elemento en consideración como de aquellos $n-1$ sitios que conforman su vecindad. Dado lo anterior, se tiene que $\Phi : S^n \rightarrow S$ es la función de transición local para cada celda y se representa mediante un conjunto finito de reglas, entre ellas una regla de actualización. El efecto de la función de transición es cambiar la configuración de una celda a cada paso de tiempo. Esta regla de transición depende del tipo de red, el radio de la vecindad y los estados de las celdas vecinas.

Los estados de cada celda evolucionan mediante la iteración en el tiempo del mapeo Φ . Se involucra una vecindad de sitios alrededor de ésta (que especifica la regla del AC), tal que para un AC unidimensional:

$$\alpha_i^{(t)} = \Phi(\alpha_{i-r}^{(t-1)}, \alpha_{i-r+1}^{(t-1)}, \dots, \alpha_i^{(t-1)}, \dots, \alpha_{i+r}^{(t-1)}) \quad (1.2)$$

donde $\alpha_i^{(t)}$ es el nuevo estado en la celda i al tiempo de evolución t (Hernandez, et. al., 2002; Wolfram, 1984) .

En la definición formal de un AC, normalmente se requiere que la red (arreglo) sea infinito. Para consideraciones de computabilidad y complejidad, esto es razonable y necesario; pero resulta imposible simular fielmente una red infinita en una computadora (al menos que la región activa siempre sea finita).

1.3.1. Condiciones de frontera

La evolución de un AC finito, depende de las condiciones de frontera aplicadas, es decir, las condiciones que se impongan en los límites. Estas condiciones determinan las vecindades en los bordes de la malla. Se suelen considerar dos casos, bordes periódicos y bordes absorbentes (Hernandez, et. al., 2002), los cuales se describen a continuación.

Bordes periódicos: Células opuestas se consideran vecinas, de forma que en una retícula plana la superficie se convierte en un toro. Para un AC unidimensional, la condición de frontera periódica es aquella donde el primer y el último sitio se identifican (como una lista circular, ver figura 1.3).

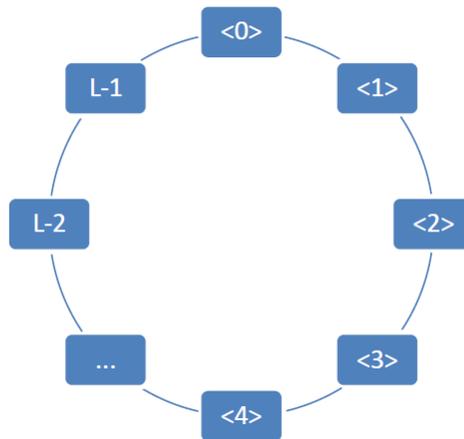


Figura 1.3: AC unidimensionales con condiciones de frontera periódica, donde la primera celda es vecina de la última

Por ejemplo, para un arreglo circular de L celdas con condiciones de frontera periódicas y tamaño de vecindad $n = 3$ ($radio = 1$), se tiene que la forma de especificar la condición periódica es la siguiente:

$$\alpha_0^{(t)} = \Phi(\alpha_{L-1}^{(t-1)}, \alpha_0^{(t-1)}, \alpha_1^{(t-1)}) \tag{1.3}$$

$$\alpha_{L-1}^{(t)} = \Phi(\alpha_{L-2}^{(t-1)}, \alpha_{L-1}^{(t-1)}, \alpha_0^{(t-1)}) \tag{1.4}$$

Bordes absorbentes: Las células de los bordes no tienen vecinos más allá de los límites del retículo, tal como se observa en la figura 1.4



Figura 1.4: AC unidimensionales con condiciones de frontera absorbentes.

Los AC permiten una gran simplificación numérica en problemas de simulación de sistemas dinámicos complejos, ya que debido a sus propiedades, se obtienen reducciones al usar aritmética entera y aplicar cálculos en paralelo. Esta definición formal de AC como máquinas computacionales tiene muy diversas aplicaciones ([Baldwin, et.al., 2000](#); [Cattaneo, et.al., 1999](#); [Larraga, 2001](#); [Wolfram, 1986](#)) y algunos ejemplos de éstas se describen a continuación.

1.4. Aplicaciones de los autómatas celulares

Se puede identificar tres vertientes principales en donde se utilizan los AC para algún propósito: simulación de sistemas naturales, estudios teóricos y realización de tareas específicas.

1.4.1. Simulación de sistemas naturales

Dentro de este contexto se busca simular sistemas cuyo comportamiento se rija por la interacción local de sus componentes. De esta forma se puede modelar el crecimiento de cristales, incendios forestales, modelos de reacciones químicas como la reacción de Belousov-Zhabotinsky, mecánica de fluidos, patrones de pigmentación de piel, crecimiento de conchas marinas y corales, comportamiento de colonias de microorganismos, tráfico vehicular, entre otros. Ejemplos de estas aplicaciones se pueden encontrar en ([Gutowitz, 1991](#); [Seck, 1997](#); [Wolfram, 1986](#)).

1.4.2. Estudios Teóricos

En este campo se utilizan a los AC para estudiar áreas como complejidad, sistemas caóticos, termodinámica, entropía, computación en paralelo, computación universal, teoría de lenguajes computacionales o estudio de patrones fractales, tal como se muestra en ([Margarita, 1995](#); [Seck, 1997](#); [Wolfram, 1984](#)).

1.4.3. Realización de tareas específicas

Aquí se buscan construir AC que sean capaces de desarrollar un proceso en especial, esto puede ser desde creación de fondos para diseños artísticos, procesamiento de imágenes o cifrado de datos ([Gutowitz, 1991](#); [Seck, 1997](#)).

Se puede observar que estos campos de desarrollo no son excluyentes, ya que un mismo trabajo puede caer en las tres vertientes, un ejemplo puede ser el AC de Von Neumann ([Neumann, 1966](#)), ya que puede ser visto como una simulación de la autoreproducción de

organismos microscópicos, se puede estudiar en éste el funcionamiento de un sistema complejo y es un AC que realiza una tarea en especial, la replica de él mismo ([Seck, 1997](#)).

En particular, en su aplicación al tráfico vehicular, los AC permiten modelar el fenómeno a un nivel de detalle donde el énfasis está en el comportamiento de cada vehículo que circula por una vía de transporte.

Los modelos para tráfico vehicular basados en AC han llegado a ser un método bien establecido para modelar, analizar, entender y aún para pronosticar el desempeño del tráfico vehicular real; debido a que la dinámica vehicular depende de un conjunto de reglas de evolución simples, fáciles de entender, computacionalmente eficientes y suficientes para emular el desempeño que se observa en el tráfico vehicular ([Larraga, 2010](#)).

En este trabajo de tesis se propone un modelo nuevo para el estudio y análisis del tráfico vehicular basado en el paradigma de los AC. Por ello, en el siguiente capítulo se introduce el problema del tráfico vehicular, algunos conceptos relacionados y antecedentes referentes a la modelación del tráfico vehicular basada en AC.

Capítulo 2

El tráfico vehicular y su modelación

El tráfico vehicular (también llamado tránsito vehicular, o simplemente tráfico) se refiere al fenómeno causado por el flujo de vehículos en una vía, calle o autopista. Para estudiar el tráfico vehicular es necesario modelarlo en alguna forma. Aunque el tráfico de vehículos de pasajeros no tiene más de 100 años de existencia, la investigación del tráfico vehicular inició en 1930. El tráfico vehicular se ha modelado con diferentes metodologías, algunas de las cuales han sido más populares que otras, pero todavía muchas de ellas se usan actualmente. En este capítulo se presentará un breve resumen de los conceptos y consideraciones empíricas usados para la descripción del tráfico vehicular y algunos de los métodos diferentes que se usan para su modelación. Particularmente, se hará énfasis en el paradigma de los AC, que es la base para el desarrollo de la investigación que se presenta en este trabajo.

2.1. El tráfico vehicular

En las sociedades modernas, el tráfico vehicular se encuentra presente en casi todas las esferas de la actividad diaria de la gente. Por ello, la demanda vehicular se incrementa en forma continua. Sin embargo, en los últimos años, muchos países industrializados como México empiezan a ver los límites de tal crecimiento, la capacidad vehicular para la cual se diseñaron las vías, calles o autopistas se está sobrepasando y como consecuencia, la congestión vehicular se ha vuelto una experiencia cotidiana.

La congestión vehicular se refiere a la condición de un flujo vehicular que se ve saturado debido al exceso de demanda de las vías, produciendo incrementos en los tiempos de viaje, estancamientos y consumo excesivo de combustible. Este fenómeno se produce comúnmente en las horas pico, las cuales resultan frustrantes para los automovilistas. Como consecuencia, las sociedades modernas se enfrentan a un incremento continuo de la contaminación del aire y las emisiones de dióxido de carbono (que puede contribuir al calentamiento global), al crecimiento de la frecuencia de accidentes y así, al decremento de la movilidad y de la calidad de vida.

Diversas consideraciones ecológicas, de espacio y de dinero, limitan la posibilidad de resolver el problema del congestionamiento vehicular mediante la modificación y construcción de nuevas redes de transporte.

Ante esta situación, una alternativa es buscar nuevas soluciones orientadas a un uso más

eficiente de las infraestructuras existentes. Sin embargo, probar los impactos de estas nuevas soluciones en el mundo real y antes de su implementación final resulta muy costoso, por lo que los modelos basados en simulación computacional para tráfico vehicular resultan de gran ayuda y su uso ha tomado mucho auge en los últimos años, gracias al advenimiento de computadoras cada día más potentes.

En lo siguiente, se presenta una breve introducción a la modelación y simulación del tráfico vehicular y algunos conceptos relacionados para su entendimiento.

2.2. Consideraciones y conceptos para el estudio del tráfico vehicular

El análisis y entendimiento de los fenómenos producidos por el tráfico vehicular, representan un insumo indispensable para la planeación de todas las actividades a realizar en una red de transporte; son así fundamentales para la operación, mantenimiento y desarrollo de una red.

En la operación, el conocimiento del flujo vehicular permite comparar la oferta de servicio con la demanda existente, estimar el grado de ocupación y realizar análisis operacionales que orienten el encauzamiento del tráfico vehicular y el desenvolvimiento en que opera cada segmento de la red.

Con un análisis de evaluación histórica en los segmentos existentes, es factible definir las tendencias de crecimiento y el momento a partir del cual ciertos segmentos dejarán de presentar un servicio adecuado y se convertirán en un cuello de botella del transporte, estancando el desarrollo en lugar de seguir propiciándolo; por lo tanto, este análisis permite priorizar las necesidades de mantenimiento, definir el momento de las modernizaciones o reconstrucciones y señalar la necesidad de rutas alternas.

Además, la adecuada auscultación del tráfico vehicular de una red resulta un insumo indispensable para planear las actividades por realizar en la misma. En lo que a infraestructura se refiere, facilita la asignación de tráfico vehicular en los nuevos segmentos propuestos, así como definir sus características geométricas y estructurales.

Los factores involucrados en una modelación de tráfico vehicular son muchos, como por ejemplo, los límites de velocidad, incorporaciones de tráfico vehicular a una vía rápida, bloques, vehículos lentos, semáforos, etc. Sin embargo, en toda modelación de tráfico vehicular el conocimiento de las tres variables que permiten caracterizar su comportamiento es fundamental: el flujo vehicular, la velocidad y la densidad vehicular.

El **flujo vehicular** se refiere al número de vehículos que pasan por un punto en un periodo de tiempo dado (normalmente referido en veh/h).

La **velocidad** se define como el cambio de posición de un vehículo por unidad de tiempo (normalmente referido en km/h).

La **densidad** vehicular denota el número de vehículos por unidad de longitud de carretera en un tiempo dado (normalmente referido en veh/km).

2.2.1. Consideraciones empíricas

La calidad de cualquier modelo tiene que decidirse por comparación con observaciones empíricas a nivel cualitativo o cuantitativo. Los resultados cualitativos usualmente están relacionados a la ocurrencia de estructuras espacio-temporales entre los cuales los congestionamientos son los más destacados.

En principio pueden ser distinguidos dos tipos de congestionamientos, el primer tipo es creado por un *cuello de botella*, es decir, locaciones de capacidad reducida de acuerdo al flujo de entrada. Aparte de los *congestionamientos inducidos por un cuello de botella*, existen los *congestionamientos espontáneos* o *congestionamientos fantasma* para los cuales esto no es cierto, al menos no de manera evidente.

La figura 2.1 (izquierda) muestra observaciones empíricas (Treiterer, 1975) que indican las crecientes inestabilidades pueden llevar a la formación de congestionamientos espontáneos, incluso en la ausencia de cuellos de botella. Esto fue confirmado por experimentos controlados (Sugiyama, et.al., 2005) (ver figura 2.1 (derecha)) en los cuales se les indicó a los conductores que manejaran tan rápido como fuera posible alrededor de una circunferencia. En densidades intermedias, después de algunos pasos de tiempo (típicamente del orden de 10 minutos) el flujo libre se rompe y entonces se crea un congestionamiento. Su origen es el manejo imperfecto de los conductores humanos. Típicamente si un conductor se aproxima a otro vehículo demasiado rápido y se ve forzado a frenar para evitar un accidente, esta maniobra de frenado será más fuerte de lo que realmente se necesita para evitar el accidente. En densidades suficientemente grandes esta acción comenzará una serie de reacciones, las cuales fuerzan a otros conductores a frenar de manera similar hasta que finalmente un vehículo se tiene que detener, marcando el inicio de un congestionamiento. Al principio del experimento, los conductores estaban aún concentrados y podían evitar este comportamiento, pero rápidamente perdieron la concentración. Esto muestra la importancia de los efectos psicológicos en el tráfico.

Además, los experimentos claramente muestran que el mecanismo de inestabilidad subyacente tiene que ser tomado en cuenta en cualquier enfoque de modelación, ya que éste refleja una parte esencial de las interacciones entre vehículos.

2.2.1.1. El diagrama fundamental y las fases del tráfico vehicular

En múltiples puntos de una carretera, se recolectan datos empíricos automáticamente por bucles inductivos (mejor conocidos por su nombre en inglés, *inductive loops*). Para cada vehículo, el tiempo de su paso por ese punto es almacenado y de este dato se pueden derivar muchas otras cantidades. El *flujo* J está dado por el número de vehículos $N(t)$ pasando por el detector en un paso de tiempo t , es decir $J = \frac{1}{t}N(t)$. La *velocidad* v puede ser derivada del intervalo de tiempo necesario para pasar dos bucles cercanos. Otras cantidades que se pueden obtener son la longitud de un vehículo, el intervalo de tiempo entre las señales de dos autos consecutivos (mejor conocido por su nombre en inglés, *temporal headway*) y la distancia espacial entre ellos (mejor conocido por su nombre en inglés, *spacial headway*). Sin embargo, la determinación de la densidad ρ es problemática. Esto tiene dos razones, una fundamental y una técnica: 1) La densidad es una cantidad espacial que es difícil medir localmente, especialmente si los objetos son extendidos, y 2) muchos detectores se manejan en

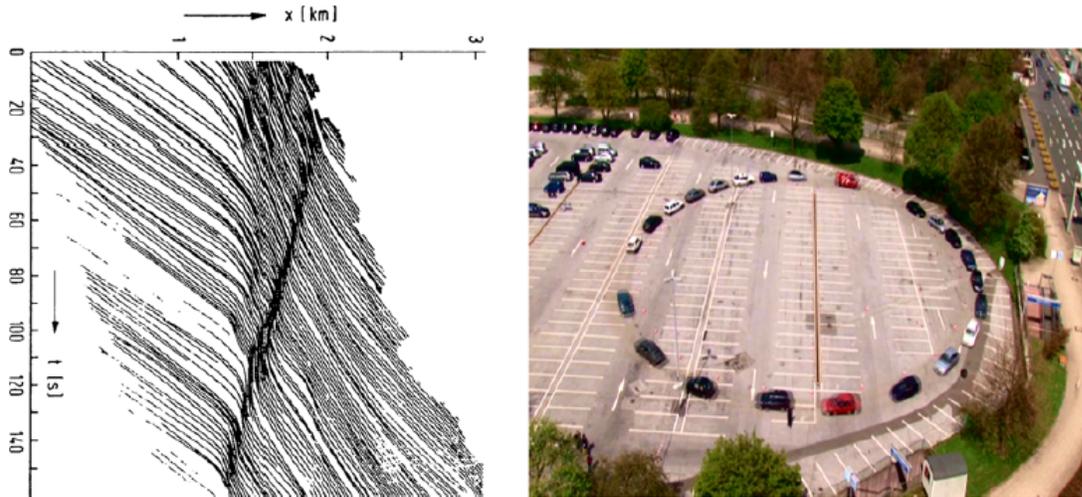


Figura 2.1: Izquierda: Datos empíricos para las trayectorias de vehículos mostrando la formación de congestamientos espontáneos (Treiterer, 1975). Derecha: Experimento para la estación de televisión alemana WDR mostrando la formación espontánea de congestamientos

base a eventos y por lo tanto, solamente los vehículos en movimiento pueden ser detectados. El problema 1) es usualmente evitado al utilizar la relación hidrodinámica de la ecuación 2.1.

$$J = v\rho \quad (2.1)$$

Con la ecuación 2.1 se puede calcular la densidad ρ a partir de un flujo medido J y una velocidad v . La velocidad promedio es usualmente sobre-estimada (pues los vehículos lentos o detenidos no son detectados) y por lo tanto la densidad ρ es subestimada.

La caracterización cuantitativa más importante del flujo de tráfico es el *diagrama fundamental*, el cual describe la dependencia del flujo de la densidad, $J(\rho)$. Debido a la relación hidrodinámica, se pueden establecer las relaciones $v(\rho)$ o $v(J)$. La última evita los problemas al mediar la densidad es usada frecuentemente en la ingeniería de tráfico vehicular.

Usualmente los datos son promediados sobre intervalos de tiempo de 1 a 5 minutos para obtener series de tiempo de puntos de información. Sin embargo, para entender la estructura microscópica se necesita información que no esté promediada y que permita distinguir entre vehículos (mejor conocida por su nombre en inglés, *single-vehicle data*).

Se pueden distinguir tres fases del flujo vehicular en el diagrama fundamental, apoyado por observaciones espacio-temporales (Kerner, et.al., 2004), aunque algunos puntos permanecen en controversia (Helbing, et.al., 2002a).

Flujo libre: En esta fase las interacciones entre vehículos son raras. Cada vehículo se mueve con la velocidad deseada correspondiente, por ejemplo, a su máxima velocidad. Por lo tanto el flujo aumenta linealmente con la densidad de los vehículos. La rama de flujo libre F puede verse claramente en la figura 2.2 (izquierda). La parte de la rama con flujos más

grandes que J_{out} es llamada *rama metaestable*. Ésta corresponde a la región donde el flujo no es determinado únicamente por la densidad.

Todos los estados que no pertenecen al *flujo libre*, pertenecen a los *estados congestionados*. Estos estados se caracterizan por una velocidad promedio más pequeña que la velocidad deseada de los conductores. Hay dos fases congestionadas que se pueden distinguir.

Congestionamientos en movimiento: Los congestionamientos se pueden formar espontáneamente, es decir, sin ninguna razón externa que sea evidente. Los congestionamientos en movimiento son regiones de muy alta densidad y velocidad promedio despreciable. A esta fase también se le llama flujo estancado. Su ancho es mucho más grande que sus extremos, donde la velocidad de los vehículos cambia de manera pronunciada. El frente del congestionamiento se mueve aguas arriba (opuesto a la dirección de manejo) a una velocidad típica de $v_{jam} \approx 15km/h$ (Kerner, et. al.,1996). Otras propiedades características de los congestionamientos en movimiento es su densidad y el flujo de salida J_{out} , el cual no depende del flujo de entrada al congestionamiento (Kerner, et.al., 2004). La velocidad v_{jam} y el flujo vehicular correspondiente sólo se determina por la densidad dentro de un congestionamiento en movimiento y el tiempo de retraso entre dos vehículos que dejan atrás el congestionamiento (Kerner, et. al.,1996).

Flujo sincronizado: En el flujo sincronizado (Kerner, et.al., 2004) la velocidad promedio es significativamente más baja que en flujo libre, pero el flujo vehicular puede ser mucho más grande que en los congestionamientos en movimiento. La característica principal de esta fase es la aparente ausencia de una forma funcional flujo vehicular-densidad, es decir que los puntos de datos correspondientes están distribuidos irregularmente en una área bidimensional grande (ver figura 2.2). En las mediciones de serie de tiempo de flujo-densidad, el flujo puede incrementarse o disminuirse con densidad creciente, en un claro contraste con la fase de flujo libre (estancado), donde el flujo siempre es creciente (decreciente).

En este caso el flujo y la densidad son independientes una de la otra. Esto cuantifica la declaración anterior que menciona que los puntos de datos están distribuidos irregularmente. Además, en una carretera multicarril, las series de tiempo de las mediciones en los diferentes carriles están fuertemente correlacionadas, es decir, sincronizadas. Esta fue la razón para denotar este estado de tráfico como *tráfico sincronizado*.

Las tres fases corresponden a diferentes estrategias de manejo. En flujo libre, los conductores tratan de manejar tan rápido como les sea posible y las interacciones son raras. En la fase congestionada se evitan los accidentes y esto determina el comportamiento y por último, el flujo sincronizado es el deseo de manejar de manera suave y cómoda. Los conductores tratan de evitar cambios de velocidad abruptos, los cuales requieren observar el comportamiento del flujo de tráfico a su alrededor de manera más detallada que en las otras dos fases.

Se han descrito sólo las propiedades más importantes de las fases de flujo de tráfico. En (Kerner, et.al., 2004) se puede encontrar una caracterización más detallada y una discusión de la organización espacio-temporal de los estados de tráfico vehicular.

Sin embargo, cabe mencionar que existe mucha controversia respecto a la dispersión de los datos que se observan en fase sincronizada, ya que no es clara la existencia de los mismos sin la presencia de embotellamientos (rampas de acceso de entrada y/o salida). En (Schonhof, 2009; Treiber, 2010) se sugiere que la dispersión amplia de datos no es una consecuencia de la sincronización del flujo, sino de los congestionamientos en general y depende amplia-

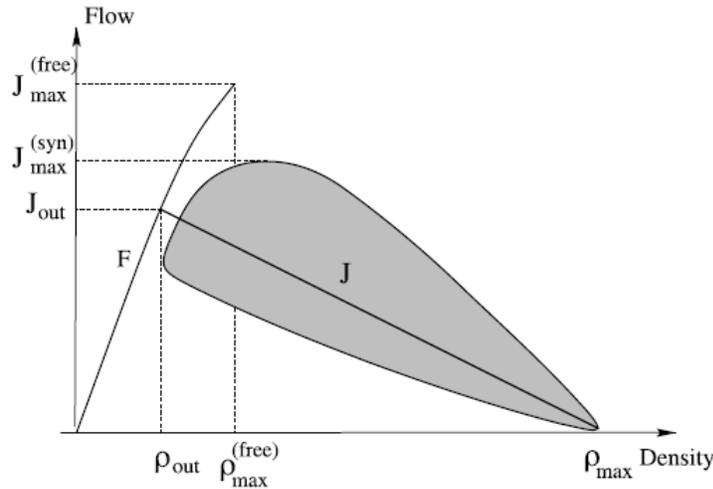


Figura 2.2: Forma esquemática del diagrama fundamental. F denota la rama de flujo libre y la línea de congestiónamiento J es determinada por las propiedades de los congestionamientos en movimiento

mente de los mecanismos de medición de datos; además puede reproducirse por modelos de tráfico macroscópicos (dos fases, flujo libre y congestionado) considerando efectos de ruido y heterogeneidad de vehículos y conductores.

2.2.2. Clasificación de los modelos de tráfico vehicular

Las teorías de tráfico vehicular se utilizan para desarrollar modelos que ayuden a analizar el desempeño del tráfico vehicular. En general, las teorías de tráfico vehicular buscan describir las interacciones entre los vehículos y la infraestructura en una forma matemática precisa. Sin embargo, las soluciones analíticas (la formas matemáticas exactas de la solución), cuando las hay, no producen los resultados esperados. Esto es porque es muy complicado encontrar una solución analítica buena, y aún encontrándola, la simulación computacional de esta solución es difícil de implementar en forma eficiente y rápida, de tal manera que sea factible para su uso en tiempo real.

Por ello, en los últimos años, ciertos modelos basados en simulación computacional para caracterizar el flujo vehicular han llegado a ser una herramienta esencial, tanto para el análisis del tráfico vehicular en tiempo real como para la experimentación.

Los modelos para tráfico vehicular se pueden clasificar con base en el nivel de detalle de las entidades que simulan, en modelos macroscópicos y microscópicos. Los modelos macroscópicos se enfocan en captar las relaciones globales del flujo de tráfico vehicular, tales como la velocidad promedio de los vehículos, el flujo vehicular promedio y la densidad global del tráfico vehicular (véase figura 2.3, izquierda). Estos modelos asumen que el comportamiento de los conductores depende de las condiciones del tráfico vehicular y estudian el comportamiento de los autos a gran escala.

Los modelos microscópicos, por su parte, se enfocan en la descripción del comportamiento del flujo de tráfico vehicular a través de describir las entidades individuales y atómicas que interactúan unas con otras (en este caso cada vehículo o conductor individual). (Véase figura 2.3, derecha). Estos modelos son por lo general discretos (finitos y contables) en espacio, en tiempo o en ambos.

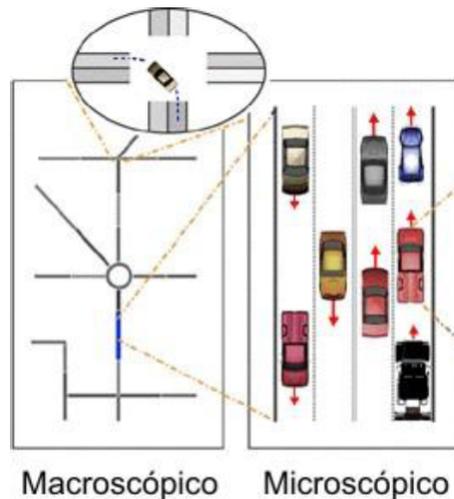


Figura 2.3: Los modelos para tráfico vehicular se pueden clasificar, con base en el nivel de detalle de las entidades que se simulan, en modelos microscópicos y modelos macroscópicos.

A continuación se describe la clasificación de acuerdo al nivel de detalle de manera más amplia.

2.2.2.1. Modelos macroscópicos

Las teorías de modelación en donde los procesos y la población se representan como un todo, a un alto nivel de agregación, donde los individuos diferentes no pueden ser distinguidos y que tienen un nivel de detalle bajo, se denotan como modelos macroscópicos. Este tipo de modelos describen el tráfico vehicular como un flujo; es decir, el flujo de tráfico vehicular se representa a manera de agregación y se enfoca en captar las relaciones globales del flujo vehicular, densidad y velocidad (Gartner, et.al., 1987; Hoogendoorn, et. al., 2001; Schadschneider, et. al., 2011).

Estos modelos son continuos por naturaleza y pueden ser clasificados de acuerdo al número de ecuaciones diferenciales parciales que utiliza el modelo y también por el orden de las mismas.

Las aproximaciones macroscópicas carecen de flexibilidad, pero son adecuados para trabajos de diseño y optimización. Debido a ello, las maniobras individuales de los vehículos no se representan explícitamente, entonces se puede asumir que el flujo de tráfico vehicular está en los carriles y se utiliza una aproximación para este fin.

Dentro de los modelos macroscópicos existen modelos puramente empíricos, denominados modelos de capacidad y nivel de servicio, que renuncian al planteamiento preciso de ecuaciones

diferenciales y se limitan a establecer relaciones empíricas entre las principales variables bajo control del diseñador. Sin embargo, como modelos representativos de las teorías macroscópicas, se incluyen los enfoques de dinámica de fluidos ([Lighthill, et. al., 1955](#)) y a las teorías de (gas-) cinético ([Prigogine, 1960](#)), las cuales se describen a continuación.

Teorías de dinámica de fluidos. Desde un punto de vista lejano, por ejemplo desde un avión, el flujo de tráfico vehicular se asemeja al flujo de un fluido cuando éste es suficientemente grande y solamente son estudiadas las características colectivas. Por lo tanto, una teoría macroscópica de tráfico vehicular se puede desarrollar, en analogía con la teoría hidrodinámica de fluidos, tratando el tráfico vehicular como un fluido compresible y continuo de una dimensión ([Hämäläinen, 2006](#); [Schadschneider, et. al., 2011](#)).

La teoría se basa en la conservación del número de vehículos, excluyendo entradas y salidas en la primera aproximación y de esa manera se puede establecer la ecuación de continuidad [2.2](#) entre estas dos cantidades. La densidad de los vehículos se simboliza con $\rho(x; t)$ y el flujo vehicular con $q(x; t)$.

$$\frac{\partial \rho(x; t)}{\partial t} + \frac{\partial q(x; t)}{\partial x} = 0 \quad (2.2)$$

No se puede resolver una sola ecuación con dos incógnitas como en la ecuación [2.2](#), es decir $\rho(x; t)$ y $q(x; t)$, a menos que se relacione una con otra y para esto se necesita otra ecuación independiente ([Hämäläinen, 2006](#); [Schadschneider, et. al., 2011](#)).

Como alternativa, una de las primeras teorías en este sentido es la conocida como LWR ([Lighthill, et. al., 1955](#)), la cual asume que el flujo vehicular se determina únicamente por la densidad local, así que un vehículo se adapta instantáneamente a la densidad local sin ninguna relajación de tiempo y el número de variables desconocidas se reduce a una. La solución fue nombrada como *ondas cinemáticas*.

La teoría LWR es el prototipo de un modelo de primer orden, ya que se define por una ecuación diferencial parcial de primer orden. Sin embargo, esta teoría tiene varias deficiencias:

- Asume que el diagrama fundamental estacionario también se adecua a situaciones no estacionarias, ya que el diagrama fundamental es la única manifestación de los efectos colectivos. Esto lleva a resultados insatisfactorios para las situaciones dinámicas.
- Debido a que la densidad y el flujo vehicular están siempre en equilibrio, esta teoría no puede explicar ni producir los agrupamientos del tráfico vehicular, ni las ondas de parar y seguir, ni la formación de congestionamientos espontáneos. No existe un régimen de densidad donde las fluctuaciones de las pequeñas densidades crezcan.
- Cerca de los gradientes de densidad grandes, las aceleraciones y desaceleraciones divergen.

Dada la problemática, se incluyeron términos de un orden más alto, constituyendo los modelos macroscópicos de segundo orden, cuyo nombre se debe a las derivadas de segundo orden. La adaptación inmediata es reemplazada con dependencias más realistas. La ecuación continua ahora se acompaña de una ecuación de Navier-Stokes de cambios de velocidad, incluyendo términos de relajación de velocidad a una velocidad promedio máxima y segura (la cual depende de la densidad), la anticipación y el ajuste de velocidad a la de los vehículos vecinos.

Teorías de (gas-) cinético. En estas teorías los vehículos pueden ser tratados como moléculas que interactúan en un gas unidimensional, donde cada molécula representa un vehículo. Las varias diferentes versiones de la teoría cinética de tráfico vehicular han sido desarrolladas al modificar la teoría cinética de gases. (Hämäläinen, 2006; Schadschneider, et. al., 2011).

En la teoría cinética de gases, las moléculas de gas se describen con una función de distribución por el número de moléculas en una unidad de volumen, en un momento, cerca de cierto valor y en un cierto tiempo. La evolución del tiempo de esta distribución se describe con la ecuación de Boltzmann (Hämäläinen, 2006; Schadschneider, et. al., 2011).

Similar a los gases, la función de distribución f representa la probabilidad de un vehículo de existir en un punto de la carretera, con una velocidad cercana a cierto valor en cierto tiempo. Esta teoría sugiere que, si no existen interacciones entre vehículos, debería existir una distribución ideal, en la cual f trate de relajarse (Prigogine, 1960). El proceso se puede describir por una ecuación cinética como la ecuación 2.3. La distribución f cambia con el tiempo, ya sea por relajación (si f difiere de f_{des} para el mismo x y v , existe un deseo de regresar a la distribución ideal) o por las interacciones entre vehículos.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + v \frac{\partial f}{\partial x} = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{rel} + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{coll} \quad (2.3)$$

donde el término $\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{rel}$ se refiere a la relajación de f_{des} y el término $\left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{coll}$ es un término de interacción.

Esta teoría tiene algunos inconvenientes como los saltos de velocidad discontinuos y el hecho de que f no toma en cuenta diferentes perfiles de conductores. Esto fue corregido por la teoría de Paveri-Fontana (Paveri-Fontana, 1975), donde se sugiere que cada conductor tiene una velocidad deseada a la cual siempre trata de relajarse. Así, las alteraciones son importantes para el término de relajación.

2.2.2.2. Modelos microscópicos

En los modelos microscópicos, los agentes y eventos se distinguen, analizan y representan individualmente, de manera separada y muy detallada. Este tipo de modelos permite distinguir diferentes tipos de agentes, con las características y desempeño de todos los individuos (Gartner, et.al., 1987; Hoogendoorn, et. al., 2001; Schadschneider, et. al., 2011).

Las características de las aproximaciones microscópicas suelen ser costosas, pero como beneficio las propiedades y la dinámica de los objetos pueden ser presentadas a detalle (Larraga, 2001).

Un modelo microscópico describe el comportamiento en espacio y tiempo de las entidades del sistema (por ejemplo, vehículos y conductores), así como sus interacciones a un nivel alto de detalle (individualmente). Por ejemplo, para cada vehículo en el flujo de tráfico, un cambio de carril se describe como una cadena de decisiones de los conductores.

Los modelos microscópicos incluyen a los llamados modelos de seguimiento de autos (car-following), los modelos basados en agentes y los modelos basados en AC, los cuales pueden ser de interés en este trabajo y se describen a continuación.

Los modelos de seguimiento de autos (car-following). Los modelos de seguimiento de autos examinan el tráfico vehicular desde un punto de vista microscópico. Las acciones de los conductores son consideradas como respuesta a los diferentes incentivos, incluyendo los del propio conductor y desde luego los de otros vehículos (particularmente los de adelante), las distancias entre ellos, etc. (Hämäläinen, 2006; Hoogendoorn, et. al., 2001; Schadschneider, et. al., 2011).

El comportamiento de cada conductor se describe por separado con una ecuación de movimiento. El comportamiento y las ecuaciones de movimiento de este tipo de modelos basan sus postulados en la naturaleza de los estímulos. Los estímulos pueden ser la velocidad del vehículo, la distancia al vehículo de enfrente, la diferencia de velocidades entre estos vehículos, etc. (Hämäläinen, 2006; Schadschneider, et. al., 2011).

Esto es análogo a una descripción Newtoniana de un sistema clásico de partículas interactuantes. En esta analogía, la aceleración puede ser la respuesta de un vehículo a los estímulos que recibe en forma de fuerza, los cuales incluyen fuerzas externas y las que provienen de la interacción con otros vehículos en el sistema. Ejemplos de modelos de seguimiento de autos son: *el modelo de sigue al líder* (Pipes, 1953), *el modelo de velocidad óptima* (Bando, et.al., 1994), *el modelo de diferencia de movilidad* (Jiang, et.al., 2001), *el modelo de Wiedemann* (Wiedemann, 1974), *el modelo de conductor inteligente* (Treiber, 2000) y *el modelo de Gipps* (Gipps, 1981). A continuación se describirán algunos de ellos.

En el antiguo modelo de este tipo llamado *sigue al líder (follow-the-leader)* (Pipes, 1953), las reacciones de un vehículo se deben a la diferencia de velocidades con el vehículo de enfrente. En este modelo se asume que los conductores tienden a moverse con la misma velocidad que su líder y que la distancia al frente debería crecer cuando la velocidad aumenta (distancia segura). Así, la aceleración del vehículo n se da por la ecuación 2.4.

$$\ddot{x}_n(t) = \frac{1}{\tau}[\dot{x}_{n+1}(t) - \dot{x}_n(t)] \quad (2.4)$$

donde $n+1$ se refiere al vehículo líder y τ es un parámetro cuyo inverso puede ser visto como un coeficiente de sensibilidad.

Durante la década de 1960, los esfuerzos de investigación se centraron en estos modelos (Hoogendoorn, et. al., 2001). También se realizaron algunas modificaciones a este modelo considerando un tiempo de reacción y una constante de sensibilidad. Así, el vehículo seguidor reacciona a las acciones de su líder después de un cierto tiempo T , como en la ecuación 2.5.

$$\ddot{x}_n(t + T) = S[\dot{x}_{n+1}(t) - \dot{x}_n(t)] \quad (2.5)$$

donde S es una constante de sensibilidad y la constante de retraso de tiempo T consiste de 3 cosas: el tiempo de percepción del conductor seguidor (observación del cambio de aceleración del vehículo líder), tiempo de respuesta del conductor y tiempo de respuesta del vehículo.

Otra clase de modelos de seguimiento de auto son los *modelos de velocidad óptima* (Bando, et.al., 1994). En estos modelos los conductores tienden a utilizar una velocidad óptima, la cual depende de la distancia al frente y es diferente a ajustarse a la velocidad del vehículo de enfrente. La dependencia puede expresarse como en la ecuación 2.6.

$$\ddot{x}_n(t) = \frac{1}{\tau}[V^{opt}(\Delta x_n(t)) - \dot{x}_n(t)] \quad (2.6)$$

donde $\Delta x_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t)$. Mientras más grande sea la distancia al frente de un vehículo, el término $V^{opt}(\Delta x_n)$ debe tener un valor más alto. Diferentes expresiones han sido sugeridas para esta función.

Para estos modelos se necesitan ecuaciones diferenciales de segundo orden y los cálculos analíticos son mucho más difíciles, debido a que la expresión ahora toma en cuenta distancias en vez de velocidades.

En estos modelos, si la velocidad actual de un vehículo $v(t)$ es más pequeña (o más grande) que la velocidad deseada, el vehículo acelera (desacelera) de tal manera que se aproxime a esta velocidad; sin embargo, incluso en flujo libre, los conductores no mantienen constante esta velocidad, sino que fluctúan a su alrededor y además siempre se mantiene una distancia segura al frente.

Otro ejemplo es el modelo de *conductor inteligente* (Treiber, 2000), donde *inteligente* se refiere a una estrategia de frenado diferente para situaciones normales y críticas. En este modelo se toma en cuenta la desaceleración, máxima aceleración, velocidad deseada, distancia al vehículo de enfrente, diferencia de velocidades, distancia mínima al frente y tiempos seguros.

Los modelos basados en agentes. Al utilizar la terminología de los sistemas multi-agente (Maes, P., 1994; Schweitzer, F., 2003; Wooldridge, M., et al., 1995; Wooldridge, M., 2002), se puede decir que un *agente* es una descripción de una entidad que actúa en su medio ambiente (Gershenson, C., 2007). Los agentes de un sistema complejo interactúan unos con otros. Por lo tanto, las acciones de un agente afectan a los otros, directa o indirectamente (Heylighen, F., et al., 1995).

En los modelos para tráfico vehicular basados en agentes, un vehículo se puede considerar como un agente que descubre otros vehículos sobre la carretera o vía y como se mueven. Normalmente, el movimiento de un vehículo resulta de observar el movimiento otros vehículos en forma continua. De tal manera que un sistema se puede modelar en dos niveles: el ambiente (ciudad, infraestructura, etc.) y los vehículos. El objetivo del ambiente es lograr un desempeño del tráfico vehicular promedio eficiente, tal que los vehículos se muevan tan rápido como sea posible, mientras media un balance para el espacio y el tiempo. Mientras que cada vehículo tiene como objetivo moverse tan rápido como sea posible para lograr su meta. La definición del ambiente y las reglas de acción se hace acorde al problema de tráfico vehicular que se desea modelar.

La simulación basada en agentes puede ser así una excelente herramienta prototipo para desarrollar y refinar modelos de tráfico vehicular, ya que permite que los parámetros tanto de los vehículos como del ambiente que se modela se varíen en forma fácil; tal que es posible experimentar con muchas alternativas y ganar resultados en tiempo real.

Los modelos de AC para tráfico vehicular. En los modelos basados en AC para modelar el tráfico vehicular, el espacio, el tiempo y las variables de estado que se usan son discretas, es decir son finitas y contables. Así, la red de transporte se parte en una malla con una topología ordenada, inducida por la topología real, que respeta las relaciones de conectividad y los sentidos de circulación de la red original. El estado de los vehículos se caracteriza por su posición y velocidad (véase figura 2.4). La primera está determinada por su ubicación dentro de la malla y la segunda surge de las relaciones que el vehículo bajo análisis guarda con su entorno, que a su vez se determina por los vehículos vecinos y la presencia de elementos externos (intersecciones, semáforos, etc.).

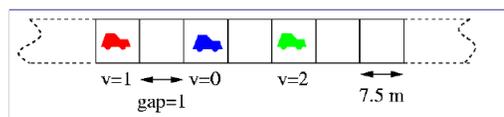


Figura 2.4: Ejemplo de una sección de calle representada mediante AC. Cada celda puede estar vacía u ocupada con un vehículo, el cual tiene una velocidad discreta (v) que toma valores entre 0 y una velocidad límite. En este caso, la longitud de una celda en unidades reales equivale a 7.5 m. y el espaciamiento entre vehículos (gap) es el número de celdas vacías que los separan.

Cabe mencionar que, debido a la discretización de espacio y tiempo de los AC, las velocidades de los vehículos toman valores discretos, que pueden fácilmente convertirse en unidades de datos reales.

Dada la estructura relativamente simple de los modelos de los AC, son ideales para hacer simulaciones masivas, con miles de vehículos. A partir de los resultados de estas simulaciones, es posible observar fenómenos en tiempo real

de difícil predicción con modelos macroscópicos (como la formación de fases y patrones del flujo vehicular, por ejemplo). Esto se debe a que los modelos de tráfico vehicular basados en AC permiten capturar dinámicas en un nivel micro y propagarlas a un desempeño de macro-nivel; es decir, permiten representar las interacciones entre los vehículos individuales y, además, relacionar esta interacción con mediciones macroscópicas como el flujo vehicular, el tiempo de viaje y la velocidad promedio. Por lo tanto, estos modelos preservan las ventajas de la compleja micro-simulación, mientras permanecen computacionalmente eficientes; esto los hace adecuados para simulación en línea del tráfico vehicular.

La diferencia entre los modelos de seguimiento de vehículos (car following) y de AC es que en este último, el espacio y el tiempo son discretos (finitos y contables), además el movimiento se simula mediante saltos de una celda a otra. En contraste, las simulaciones de seguimiento de vehículos discretizan el tiempo, pero usan el espacio continuo y cada vehículo tiene una posición descrita por un número real (ver figura 2.5).

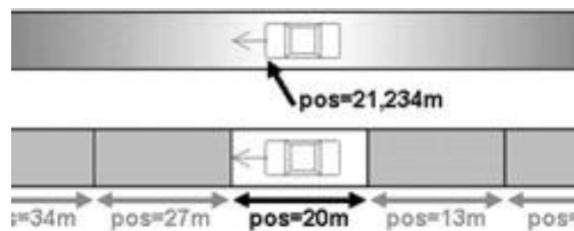


Figura 2.5: Esquema que muestra la diferencia de la modelación del espacio mediante una simulación continua (arriba) y una simulación discreta (abajo). En el primer caso, las posiciones de los vehículos (pos) toman valores reales, mientras que en el segundo caso, las posiciones toman valores discretos (enteros).

Por lo tanto, los modelos de AC permiten tomar en cuenta aspectos microscópicos en forma sencilla, mientras permanecen computacionalmente eficientes; por lo que en nuestros días son una de las herramientas matemáticas más atractivas para la modelación, análisis y predicción del tráfico vehicular (Chowdhury, et.al, 2000; Chowdhury, et.al., 2005; Larraga, 2010; Maerivoet, et.al., 2005; Schmittmann, et.al., 1995).

Cabe mencionar que la metodología basada en AC ya ha sido usada como una opción de alta velocidad en algunos proyectos de simulación de tráfico vehicular real, por ejemplo en Alemania y Estados Unidos (CPC, 1995; Chowdhury, et.al, 2000; Chowdhury, et.al., 2000; Smith, et.al., 1995).

Una vez que se explicaron los conceptos fundamentales del tráfico vehicular y dado que este trabajo de tesis se basa en un modelo de AC, en el siguiente capítulo se introducen brevemente la descripción de algunos modelos para tráfico vehicular basada en AC que son importantes para el entendimiento y justificación del trabajo de tesis.

Capítulo 3

Modelación de tráfico vehicular con autómatas celulares

Los modelos para tránsito vehicular basados en AC han llegado a ser un método bien establecido para modelar, analizar, entender e incluso para pronosticar el desempeño del tránsito vehicular real (Chowdhury, et.al., 2000; Chowdhury, et.al., 2005; Maerivoet, et.al., 2005; Schmittmann, et.al., 1995). Su característica principal, la cual los hace muy atractivos para la simulación del tráfico vehicular es que se basan en reglas locales, lo que permite tomar en cuenta en la modelación aspectos complejos del comportamiento tanto de los vehículos como de los conductores (como los psicológicos), de una manera natural y eficiente. En este capítulo se describirán algunos modelos para tráfico vehicular basados en AC, los cuales son fundamentales para el entendimiento y desarrollo de este trabajo de tesis.

3.1. El modelo Nagel-Schreckenberg y algunas modificaciones

El primer modelo que mostró las bondades de los AC para simular el tráfico vehicular, surgió a inicios del decenio de 1990, cuando los alemanes Kai Nagel y Michael Schreckenberg propusieron un modelo para la modelación de tráfico vehicular de carreteras (*modelo NaSch* por las iniciales de sus autores) (Nagel, et.al., 1992). A partir de éste han surgido diversos modelos con la finalidad de reproducir más fielmente el desempeño del conductor, y de esta forma aproximar mejor los fenómenos que ocurren en el tráfico vehicular (Krauss, et.al., 1997; Larraga, et.al., 2010; Lee, et.al., 2004). Las investigaciones realizadas hasta el momento han probado que los modelos basados en AC son adecuados para la planeación del diseño de carreteras o redes urbanas, para el análisis de su desempeño, la determinación de las causas de los congestionamientos y para proponer posibles modificaciones que permitan mejorar el flujo vehicular. Sin embargo, actualmente no se tiene conocimiento del mejor modelo basado en AC.

En esta sección se describirá el modelo NaSch basado en AC y algunas modificaciones al mismo, las cuales son fundamentales para este trabajo de tesis.

3.1.1. Definición del modelo Nagel-Schreckenberg

El modelo NaSch (Nagel-Schreckenberg) (Nagel, et.al., 1992) es un AC probabilista capaz de reproducir muchas de las características del tráfico vehicular. El modelo consiste de N vehículos moviéndose en una sola dirección sobre una red unidimensional de L celdas con condiciones de frontera periódicas. La longitud típica de una celda (Δx) es de alrededor de 7.5 m. Ésta corresponde al espacio típico (longitud de un vehículo más la distancia al vehículo precedente) ocupado por un vehículo en un estancamiento. Cada celda puede estar vacía u ocupada por exactamente un vehículo que viaja con una velocidad discreta v que toma valores $v = 0, \dots, v_{max}$. Aquí v_{max} corresponde a la velocidad límite y en el caso más simple es la misma para todos los vehículos. Véase figura 3.1

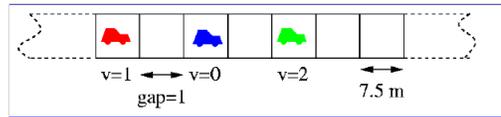


Figura 3.1: Ejemplo de una sección de calle representada mediante el modelo NaSch, basado en AC. Cada celda puede estar vacía u ocupada con un vehículo, el cual tiene una velocidad discreta (v) que toma valores entre 0 y una velocidad límite. En este caso, la longitud de una celda en unidades reales equivale a 7.5 m. y el espaciamiento entre vehículos (gap) es el número de celdas vacías que los separan.

Un paso de tiempo discreto (Δt) corresponde a un segundo, por lo tanto, las transiciones de cambio del sistema son de $t \rightarrow t + 1$. De esta forma, si se consideran los valores de Δx y Δt , $v = 1$ corresponde a mover un vehículo a la celda vecina (en la dirección del flujo vehicular) y corresponde a $27km/h$ en unidades reales. La velocidad máxima usada es $v_{max} = 5$, que es equivalente a $135km/h$.

En el contexto de los AC, debido a la discretización de espacio y tiempo, las unidades propias se omiten frecuentemente. Por lo tanto las unidades apropiadas para el modelo serían d =número de celdas, v =número de celdas por paso de tiempo, t =número de pasos de tiempo, etc. Por esta razón $v < d$ es usada frecuentemente en lugar de $v < d/\Delta t$, porque $\Delta t = 1$.

Sea v_i y x_i la velocidad actual y posición de un vehículo i , respectivamente y sea x_p la posición del vehículo de adelante (que precede al vehículo i), en un tiempo dado. Así, $d_i := x_p - x_i - 1$ denota la distancia (número de celdas vacías) enfrente del vehículo en la posición x_i .

La transición de estado en cada paso de tiempo $t \rightarrow t + 1$, es decir, el cambio de velocidad y posición de los vehículos, se define como el siguiente conjunto de reglas:

R1: Aceleración

Si $v_i < v_{max}$, la velocidad del vehículo i se incrementa en uno, es decir:

$$v_i \rightarrow \min(v_i + 1, v_{max})$$

R2: desaceleración

Si $d_i < v_i$, la velocidad del vehículo i se reduce a d_i . Por lo tanto, la nueva velocidad del vehículo i es:

$$v_i \rightarrow \min(v_i, d_i)$$

R3: Desaceleración aleatoria

Si $v_i > 0$, la velocidad del vehículo i se decrementa aleatoriamente con probabilidad R por una unidad, es decir,

$$v_i \rightarrow \max(v_i - 1, 0) \text{ con probabilidad } R.$$

R4: Movimiento del vehículo

Cada vehículo se mueve hacia adelante de acuerdo a su nueva velocidad determinada en los pasos 1-3, es decir,

$$x_i \rightarrow x_i + v_i$$

Estas reglas se aplican a los N vehículos del sistema mediante una dinámica paralela. Para el caso de un carril, estas reglas garantizan que no se producen alcances entre los vehículos y que el orden se mantiene.

La regla R1 refleja la tendencia general de los conductores a conducir tan rápido como sea posible sin exceder la velocidad máxima límite. La regla R2 es para evitar colisiones entre los vehículos. La desaceleración aleatoria en la regla R3, toma en cuenta los diferentes patrones de desempeño de los conductores individuales, especialmente, la aceleración no determinista; esto es crucialmente importante para la formación espontánea de congestiones.

Los parámetros del modelo NaSch son: la velocidad máxima v_{max} , el parámetro de desaceleración R y la densidad global ρ .

El modelo NaSch establece un estricto orden en la aplicación de las reglas de transición. Un cambio en el orden de éstas cambiaría las propiedades del modelo; en otras palabras, las reglas no conmutan.

Aunque el modelo NaSch reproduce algunas características básicas del tráfico vehicular de una manera macroscópica, también es una simplificación extrema de las condiciones del mundo real. Por lo que desde su creación se han desarrollado un número considerable de modificaciones o extensiones del mismo, por ejemplo ver (Barlovic, et.al., 1998; Fuki, et.al., 1996; Helbing, et.al., 1999; Hsu0, et.al., 2007; Jiang, et.al., 2005; Kerner, et.al., 2002; Knospe, et.al., 2000; Larraga, et.al., 2004; Larraga, et.al., 2005; Li, et.al., 2001; Nagel, et.al., 1992; Wang, et.al., 2002; Wang, et.al., 2006).

La mayoría de estos modelos han sido orientados a reproducir los fenómenos que ocurren en el tráfico vehicular y raramente han considerado una velocidad de desaceleración limitada. De hecho, la mayoría de los modelos existentes han considerado explícitamente criterios libres de colisión, mediante la imposición de desaceleraciones arbitrariamente grandes, que se alejan de la capacidad práctica de frenado en pavimento con las condiciones normales de los neumáticos.

A continuación se describirán los modelos de Krauss y de Lee, los cuales son antecedentes importantes en el tema de desaceleración limitada.

3.1.2. El modelo de Krauss y el modelo de Lee

Quizás el primer esfuerzo en introducir la capacidad de desaceleración limitada en la modelación basada en AC fue el modelo propuesto por Krauss y Wagner (modelo KW) (Krauss,

et.al., 1997). Ellos introdujeron el término llamado velocidad segura a través de la ecuación 3.1.

$$v^{(safe)}\tau^{(safe)} + X_d(v^{(safe)}) \leq g_n + X_d(v_{l,n}) \quad (3.1)$$

donde g_n denota la brecha espacial. A continuación se define el término $X_d(u)$ en la ecuación 3.2.

$$X_d(u) = (u - b\tau) + (u - 2b\tau) + \dots + \beta b\tau = b\tau^2\left(\alpha\beta + \frac{\alpha(\alpha - 1)}{2}\right) \quad (3.2)$$

La ecuación 3.2 representa la distancia esperada de viaje, con la velocidad original u y el intervalo de desaceleración b . El intervalo de tiempo seguro para los conductores se determina como se define en la ecuación 3.3 (Larraga, 2010).

$$\tau^{(safe)} = v^{(safe)}/b = \alpha_{safe} + \beta_{safe} \quad (3.3)$$

La velocidad del vehículo precedente se representa por la ecuación 3.4.

$$\alpha_{safe} = \sqrt{2\frac{X_d(v_{l,n}) + g_n}{b}} \frac{1}{4} - \frac{1}{2}\beta_{safe} \quad (3.4)$$

Además de la complejidad con la que el modelo simula la dinámica vehicular, los resultados del modelo de Krauss mostraron claramente desaceleraciones que exceden las correspondientes a la realidad (Larraga, 2010).

Recientemente, Lee et. al (Lee, et.al., 2004) introdujeron capacidades de aceleración (a) y desaceleración (D) en su modelo y propusieron el criterio de seguridad para el movimiento de los vehículos de la ecuación 3.5, que es muy similar al propuesto por Krauss y Wagner.

$$x_n^t + \Delta + \sum_{i=1}^{\tau_f(c_n^{t+1})} (c_n^{t+1} - D_i) \leq x_{n+1}^t + \sum_{i=1}^{\tau_l(v_{n+1}^t)} (v_{n+1}^t - D_i) \quad (3.5)$$

donde n , $n + 1$ denotan al vehículo seguidor y conductor, respectivamente. c_n^{t+1} denota la velocidad segura al tiempo $t + 1$. Además, x_n^t , v_n^t denotan la posición y velocidad, respectivamente, del vehículo seguidor al tiempo t ; mientras que x_{n+1}^t , v_{n+1}^t denotan la posición y velocidad, respectivamente, del vehículo conductor. τ_f , τ_l denotan los pasos de tiempo que requiere el vehículo seguidor y conductor, respectivamente, para desacelerar hasta parar; es decir, $i = 0, 1, \dots, \tau_f$ para el vehículo seguidor e $i = 0, 1, \dots, \tau_l$ para el vehículo conductor; D es la capacidad de desaceleración máxima y Δ es la distancia mínima con respecto al vehículo conductor.

Tanto el modelo KW como el modelo de Lee antes mencionados, se establecen bajo la suposición que el vehículo siguiente siempre tendrá conocimiento de la velocidad del vehículo

que va adelante y así, mantendrá continuamente una distancia adecuada para evitar colisiones en caso de que el vehículo precedente desacelere a un paro total en el siguiente paso de tiempo. Sin embargo, la distancia de seguimiento segura que un vehículo debe mantener respecto al vehículo que le precede es aún conservadora debido al uso de las velocidades absolutas para su determinación. Además, con la idea de incorporar capacidades de desaceleración limitada, estos modelos más sofisticados utilizan un conjunto de reglas complejo, con un número de parámetros muy grande en comparación con el modelo original NaSch (Lan, et.al., 2009; Larraga, 2010).

Recientemente, en (Larraga, et.al., 2010), que en adelante se expresará como modelo LAI por las iniciales de sus autores, se propuso un modelo probabilista basado en AC para el tráfico vehicular de carreteras. El objetivo en este modelo fue introducir el concepto de anticipación de la velocidad en el proceso de desaceleración, con el objetivo de capturar mejor las reacciones de los conductores. Este modelo se describirá en la siguiente sección.

3.1.3. Un modelo de autómatas celulares realista basado en políticas de manejo seguras

En (Larraga, et.al., 2010) se propuso un nuevo modelo de AC de un carril para el flujo de tráfico vehicular. El modelo toma en cuenta políticas de espaciamiento de los conductores reales y prácticas de ingeniería de transporte para garantizar que el comportamiento microscópico de los vehículos esté más en línea con el movimiento vehicular en el mundo real. Como resultado, las reacciones de los conductores están basadas en un análisis de seguridad que determina la acción más apropiada que debe tomar un vehículo. Por lo tanto, el modelo introduce un nuevo conjunto de reglas simples para cambiar la velocidad de los vehículos que incorporan tres distancias de seguimiento seguro para que un vehículo acelere, desacelere o mantenga su velocidad de manera segura.

Los resultados de simulación, los cuales se obtuvieron de un sistema con condiciones periódicas, muestran que el modelo puede suavizar la disminución de velocidad cuando los vehículos se aproximan al frente de un congestionamiento. Por lo tanto, el modelo evita la desaceleración irreal encontrada en la mayoría de los modelos previos de AC. Además, el modelo es también capaz de reproducir la mayoría de los encuentros empíricos incluyendo los tres estados del flujo de tráfico vehicular, la velocidad de salida del frente de un congestionamiento y diferentes patrones de tráfico vehicular congestionado inducidos por un sistema con condiciones de frontera abierta con una rampa de entrada.

Aunque algunos de estos resultados también se encontraron en trabajos previos, la principal contribución de este trabajo es la definición de las capacidades de aceleración/desaceleración, de tal manera que los vehículos no pueden cambiar su velocidad abruptamente de manera instantánea.

Por lo tanto, con este modelo pueden generarse comportamientos de aceleración/desaceleración más realistas. Además, en comparación con otros modelos de AC que consideran las capacidades de desaceleración, el modelo propuesto conlleva a una representación más fiel del comportamiento de los conductores sin comprometer la eficiencia computacional.

Se asume que los vehículos se mueven de izquierda a derecha. El modelo se define en una rejilla de celdas de longitud L , donde cada celda puede estar vacía u ocupada por un solo

vehículo. La velocidad de cada vehículo puede tomar uno de los $(v_{max} + 1)$ valores enteros permitidos $v = 0, 1, \dots, v_{max}$. En este modelo, los vehículos pueden ocupar más de una celda. Por simplicidad, sólo se considera un tipo de vehículo en este artículo y por lo tanto, la misma velocidad máxima es empleada en todos los vehículos.

Las dinámicas para el modelo propuesto se basan en la respuesta del conductor a las condiciones de tráfico vehicular locales y a las capacidades de aceleración y desaceleración limitadas de los vehículos, los cuales consideran los siguientes aspectos. Cuando existen grandes distancias entre ellos, los conductores tienden a moverse con la máxima velocidad deseada v_{max} . En distancias intermedias, los conductores reaccionan a los cambios de velocidad del vehículo de enfrente, es decir, las reglas para establecer la nueva velocidad no sólo dependen de la velocidad relativa de los vehículos vecinos, ellos ahora toman en cuenta sus distancias relativas positivas. En distancias pequeñas, sin embargo, los conductores ajustan su velocidad de tal manera que un manejo seguro sea posible. Para distancias muy pequeñas, los conductores percibirán una situación insegura y reaccionarán aplicando frenado de emergencia.

Aunque en la conducción normal, la desaceleración de emergencia no ocurre regularmente, este modelo considera que es importante proponer un modelo de flujo de tráfico vehicular que utilice el paradigma de los AC que lo tome en cuenta.

Las reglas para actualizar la velocidad de los vehículos se definen por la inclusión de tres distancias requeridas por un vehículo seguidor para acelerar (d_{acc}), desacelerar (d_{dec}) y mantener su velocidad (d_{keep}) en el siguiente paso de tiempo, las cuales garantizan un movimiento seguro. Estas tres distancias se explicarán más adelante.

Para efecto de replicar los efectos estocásticos del comportamiento de un conductor individual, el modelo considera capacidades de aceleración y desaceleración aleatoria. Una actualización del sistema consiste de los siguiente cuatro pasos consecutivos, que se ejecutan a la vez para todos los vehículos.

S1 : Distancias seguras. Obtener el valor para $d_{dec_n} = d_{dec}(t, v_n(t), v_{n+1}(t))$, $d_{acc_n} = d_{acc}(t, v_n(t), v_{n+1}(t))$, y $d_{keep_n} = d_{keep}(t, v_n(t), v_{n+1}(t))$

S2 : Aceleración retardada. Obtener el valor correspondiente del ruido estocástico R_a , basado en la velocidad del vehículo v_n .

$$R_a = \min(R_d, R_0 + v_n(t) \cdot (R_d - R_0)/v_s) \quad (3.6)$$

donde la velocidad v_s es una constante ligeramente mayor a 0.

S3 : Sea Δv la máxima magnitud en celdas para acelerar/desacelerar un vehículo en una situación normal. La actualización de la velocidad de los vehículos a lo largo de la carretera se lleva a cabo al actualizar simultáneamente todos los sitios de la rejilla de acuerdo a las siguientes reglas:

S3a : Aceleración. Si $d_n(t) \geq d_{acc_n}$, la velocidad del vehículo n es incrementada aleatoriamente en Δv con probabilidad R_a , definida en la ecuación 3.6, i.e.,

$$v_n(t+1) = \begin{cases} \min(v_n(t) + \Delta v, v_{max}), & \text{si } \text{randf}() \leq (R_a) \\ v_n(t), & \text{en otro caso} \end{cases}$$

donde $\text{randf}() \in [0, 1]$ denota un número uniformemente aleatorio (específicamente para el vehículo n al tiempo t)

S3b : Desaceleración aleatoria. Si $d_{acc_n} > d_n(t) \geq d_{keep_n}$, la velocidad del vehículo n se decrementa con probabilidad R_s , i.e.,

$$v_n(t+1) = \begin{cases} \max(v_n(t) - \Delta v, 0), & \text{if } \text{randf}() \leq (R_s) \\ v_n(t), & \text{en otro caso} \end{cases}$$

S3c : Desaceleración. Si $d_{keep_n} > d_n(t) \geq d_{dec_n}$ and $v_n(t) > 0$, la velocidad del vehículo n se reduce en Δv

$$v_n(t+1) \rightarrow \max(v_n(t) - \Delta v, 0)$$

S3d : Desaceleración de emergencia. Si $v_n(t) > 0$ y $d_n(t) < d_{dec_n}(t)$, la velocidad del vehículo n se reduce en M , dado que no disminuye a menos de 0:

$$v_n(t+1) \rightarrow \max(v_n(t) - M, 0)$$

donde M es el máximo decremento de velocidad en un paso de tiempo

S4 : Movimiento de los vehículos. Cada vehículo se mueve hacia adelante de acuerdo a su nueva velocidad determinada con las reglas S3a-S3d:

$$x_n(t+1) \rightarrow x_n(t) + v_n(t+1)$$

donde $x_n(t)$ y $v_n(t)$ respectivamente, denotan la posición y velocidad del vehículo n al paso de tiempo t (se asume que el vehículo $n+1$ precede al vehículo n). Entonces, el espacio al frente del vehículo n , es decir, la distancia desde la defensa delantera del vehículo n a la defensa trasera del vehículo $n+1$, se define como $d_n(t) = x_{n+1}(t) - x_n(t) - l_s$; donde l_s denota el tamaño del vehículo (en celdas) y se asume que la posición de un vehículo es la celda que contiene su defensa trasera. El parámetro M representa la máxima capacidad de desaceleración de un vehículo en un paso de tiempo. Los parámetros estocásticos R_s , R_0 y R_d controlan las fluctuaciones de velocidad de los vehículos.

Finalmente, Δv denota la magnitud para incrementar/decrementar la velocidad de un vehículo en un paso de tiempo bajo situaciones normales y se determina de la siguiente manera:

$$\Delta v = \lfloor 2.5 \text{ m}/\Delta x \rfloor$$

donde Δx denota el tamaño de la celda (en metros) que se utilizan para la discretización del sistema, que en este modelo es $\Delta x = 2.5$.

Las reglas de S3a a S3d están diseñadas para actualizar la velocidad de los vehículos; la regla S4 actualiza la posición. De acuerdo a esta actualización, la actualización del estado se divide en 2 etapas, primero la velocidad y segunda la posición. En las siguientes líneas se discute el modelo con mayor detalle.

S1: El punto inicial de este modelo de AC es el cálculo de las tres distancias de seguimiento seguro, las cuales permiten un manejo seguro. Estas distancias calculan la distancia al frente

que un vehículo seguidor debe mantener con el vehículo que le precede (vehículo líder o conductor) para acelerar, mantener su velocidad o desacelerar de manera segura.

La base para definir las tres distancias mínimas de seguimiento seguro es asumir el peor escenario posible después de que cualquiera de estas tres maniobras básicas es ejecutada, la cual corresponde a que el vehículo de enfrente desacelera abruptamente. Como consecuencia, el vehículo seguidor también comenzará a desacelerar en pasos de tiempo sucesivos, para mantener la seguridad.

Entonces, las distancias de seguridad que permiten un movimiento seguro se definen por las ecuaciones 3.7, 3.8 y 3.9, las cuales se muestran a continuación.

$$d_{acc} = \max\left(0, \sum_{i=0}^{(v_n(t)+\Delta v)_{div}M} [(v_n(t) + \Delta v) - i * M] - \sum_{i=0}^{(v_{n+1}(t)-M)_{div}M} [(v_{n+1}(t) - M) - i * M]\right) \quad (3.7)$$

$$d_{keep} = \max\left(0, \sum_{i=0}^{(v_n(t))_{div}M} [v_n(t) - i * M] - \sum_{i=0}^{(v_{n+1}(t)-M)_{div}M} [(v_{n+1}(t) - M) - i * M]\right) \quad (3.8)$$

$$d_{dec} = \max\left(0, \sum_{i=0}^{(v_n(t)-\Delta v)_{div}M} [(v_n(t) - \Delta v) - i * M] - \sum_{i=0}^{(v_{n+1}(t)-M)_{div}M} [(v_{n+1}(t) - M) - i * M]\right) \quad (3.9)$$

donde $X_{div}Y$ denota la división entera, es decir, $X_{div}Y = \lfloor X/Y \rfloor$, donde “/” denota la división normal y $\lfloor z \rfloor$ es la función piso.

El primer término del lado derecho de las ecuaciones 3.7, 3.8 y 3.9 determina la distancia que el vehículo seguidor viajaría si éste acelera, mantiene su velocidad o desacelera, respectivamente, en el paso de tiempo $t + 1$ y en el siguiente paso de tiempo empieza a desacelerar abruptamente (con una capacidad de desaceleración máxima M), hasta que éste se detiene.

El segundo término del lado derecho de las ecuaciones 3.7, 3.8 y 3.9 determina la distancia que viajaría el vehículo conductor, si en el paso de tiempo $t + 1$ éste empieza a desacelerar abruptamente, considerando que desacelera abruptamente con la máxima capacidad de frenado.

Por lo tanto, la resta de ambos términos en las ecuaciones 3.7, 3.8 y 3.9 corresponde a las distancias de seguimiento seguro requeridas para detener a un vehículo en una situación de emergencia, considerando que éste acelerará, mantendrá su velocidad o desacelerará respectivamente, en el paso de tiempo $t + 1$. Nótese que estas distancias siempre se consideran positivas.

Para un tamaño de celda dado, todos los cálculos envueltos en las ecuaciones 3.7, 3.8 y 3.9 pueden ser ejecutados fuera de línea. Después de estos cálculos fuera de línea, pueden ser generadas tres tablas fijas que contienen las distancias que los vehículos requieren para acelerar, mantener su velocidad o desacelerar de manera segura. Al tener en cuenta el uso de la búsqueda en tablas, el costo computacional de calcular las distancias de seguridad puede ser considerado muy bajo.

S2: Este paso obtiene el valor correspondiente para el valor estocástico R_a , el cual denota la probabilidad para acelerar basado en la velocidad del vehículo. Se asume que los vehículos

cuya velocidad es más pequeña que v_s en el paso de tiempo previo tienen una probabilidad más baja de acelerar que el resto de los vehículos en movimiento ($v_n > v_s$), lo que significa que los vehículos lentos tienen que esperar más tiempo antes de que puedan continuar su viaje. Utilizando una idea similar a (Lee, et.al., 2004), el parámetro estocástico R_a (< 1) en S2 interpola linealmente entre R_0 y R_d ($R_0 < R_d$) si v_n es más pequeño que una velocidad lenta v_s (ver figura 3.2). Entonces la regla S2 alternativamente sugiere que los vehículos que salen del frente de un congestionamiento acelerarán suavemente y entonces, el comportamiento de los vehículos en esta situación se reproduce: un conductor necesita un momento para acelerar el vehículo. Nótese que para un valor dado de R_0 , R_d y v_s , el cálculo realizado en el paso S2 para obtener la probabilidad de aceleración R_a puede ser ejecutado fuera de línea y almacenado en una tabla fija que relaciona el valor de R_a con la velocidad del vehículo v_n . En la práctica, esto reduce el uso de los tres parámetros, R_0 , R_d y v_s , a sólo uno R_a .

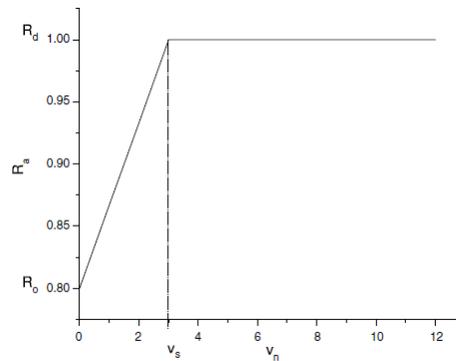


Figura 3.2: El parámetro estocástico R_a interpola linealmente entre R_0 y R_d si v_n es más pequeña que la velocidad lenta, v_s ($R_0 < R_d$)

S3a: Esta regla postula que todos los conductores se esfuerzan por alcanzar la máxima velocidad cuando les es posible. Esto está de acuerdo con otras políticas de velocidad, como es el caso de *la política codiciosa* (Broucke, 1996). La regla S3a toma en cuenta la aceleración no uniforme de los vehículos al considerar que los conductores actúan de manera diferente. Por lo tanto, el proceso de aceleración introduce un elemento de comportamiento humano de manera diferente, basado en el hecho de que el comportamiento de un conductor puede ser influido dependiendo de la situación del tráfico vehicular local (distancias relativas entre vehículos y sus velocidades) y fluctuaciones de tráfico vehicular resultantes del factor humano en forma estocástica (parámetro R_a , definido en la ecuación 3.6, en el paso S2). El factor estocástico considerado en esta regla, por el parámetro R_a , involucra una aceleración retardada como función de la velocidad de los vehículos, la cual afecta no sólo el comportamiento de los vehículos detenidos (como la regla de *lento para comenzar* (*slow-to-start*)), sino también para los vehículos en movimiento. Entonces, una velocidad más pequeña de un vehículo implica un tiempo más amplio de espera para continuar su viaje. Es importante notar que la regla S3a alternativamente sugiere que los vehículos que salen de un congestionamiento acelerarán suavemente. Entonces, el comportamiento de los vehículos en esta situación también está más de acuerdo con el comportamiento del tráfico real: un conductor necesita un momento para acelerar el vehículo.

S3b: Esta regla refleja el hecho de que los conductores intentarán mantener su velocidad si ellos perciben la distancia con el vehículo de enfrente como segura. Además, esta regla también introduce perturbaciones de tráfico vehicular que causan que los conductores reduzcan su velocidad sin razón aparente. Esto puede ocurrir, por ejemplo, debido a incidentes a lo largo de la carretera que distraen a los conductores. Esta desaceleración aleatoria, controlada con el parámetro R_s , contribuye a la creación de congestionamientos de tráfico espontáneos. Entonces, la aleatoriedad se aplica únicamente a los vehículos que se encuentran en condiciones de movimiento y no requieren desacelerar. De esta manera, el doble frenado se evita.

S3c: Esta regla requiere que el conductor aplique desaceleración moderada cuando el espacio que separa a su vehículo del de enfrente llega a ser pequeño. Nótese que los vehículos no pueden cambiar su velocidad instantáneamente, esto es, la máxima desaceleración que un conductor individual está dispuesto a utilizar en situaciones donde no exista una emergencia, como desaceleración cómoda, está limitada por Δv (en unidades de la malla). Entonces, las desaceleraciones extremas son evitadas.

S3d: Esta regla acentúa el enfoque de este modelo: las decisiones más importantes de los conductores están relacionadas con la seguridad. En el flujo de tráfico real, hay dos situaciones de desaceleración: frenado normal y frenado de emergencia. En situaciones normales, un vehículo desacelera para expandir el espacio hacia el frente y alcanzar el espacio al frente deseado. En dos casos de desaceleración de emergencia (el vehículo conductor desacelera súbitamente o el seguidor se aproxima a un vehículo detenido), se requiere una secuencia para evitar una colisión. Si las distribuciones iniciales de las distancias positivas relativas a la velocidad son seleccionadas para satisfacer al menos d_{dec} , entonces los vehículos nunca tendrán una distancia relativa tal que esta regla sea activada. Entonces, esta regla le permite a los conductores reaccionar a un frenado de emergencia del vehículo conductor produciendo perturbaciones en las otras reglas. En este modelo, el frenado de emergencia tendrá un valor de $-5m/s^2$ (esto se considera un valor aceptable para esta maniobra (Alvarez, et.al.,1999; Carbaugh, et. al., 1997)) y será alcanzado en un paso de tiempo. Entonces el parámetro M tomará valores de $M = 5.00/\Delta x$.

Aunque en el presente trabajo sólo se considera un tipo de vehículo con el mismo valor para la máxima capacidad de frenado M , es importante enfatizar que el parámetro M puede tomar valores de acuerdo al tipo de vehículo considerado (autos, autobuses, etc.) sin la necesidad de modificar el modelo. Con esta consideración, pueden ser considerados vehículos con diferentes capacidades de frenado, lo cual tendrá influencia de manera implícita en la determinación de las distancias requeridas por un vehículo para acelerar, mantener su velocidad o desacelerar de manera segura. Un valor más pequeño de M (capacidad de frenado más baja) implica una distancia segura más grande para desacelerar, como ocurre en la realidad. Entonces, una de las principales contribuciones de este nuevo modelo es garantizar que el comportamiento microscópico del vehículo está de acuerdo con las capacidades reales de los vehículos.

Este modelo intenta al mismo tiempo capturar las capacidades de desaceleración finita de los vehículos y evitar accidentes. Debe notarse que las reglas para establecer la velocidad toman en cuenta las distancias relativas y las velocidades relativas de los vehículos vecinos. Además debe notarse que las distancias seguras en las ecuaciones 3.7, 3.8 y 3.9 crecen más rápidamente que de manera lineal con la velocidad relativa de los vehículos. Esto concuerda con las políticas de espaciamiento de los conductores, por ejemplo, con las que se basan en

el seguimiento de vehículos, tiempo constante al frente, etc. De esta manera, este modelo no sólo se enfoca en reproducir las características esenciales del flujo de tráfico basadas en el comportamiento macroscópico, las cuales fueron encontradas en algunos modelos básicos de AC previos, sino también en un comportamiento del conductor aceptable a nivel microscópico y las estructuras relacionadas.

Los parámetros del modelo son los siguientes: máxima velocidad v_{max} , velocidad lenta v_s , longitud del vehículo l_s (en celdas), máximo decremento de velocidad en un paso de tiempo M , probabilidad de desaceleración aleatoria R_s , y las probabilidades R_0 y R_d . A modo de resumen, estos parámetros se presentan en la tabla 3.1 entre otras variables del modelo. Sin embargo, bajo las consideraciones hechas para el parámetro R_a en el paso S2, en la práctica, el número efectivo de parámetros necesarios en las simulaciones cada paso de tiempo son cinco: v_{max}, l_s, R_d, R_a y M . Los parámetros adicionales l_s y M son necesarios para permitir vehículos con diferentes longitudes y capacidades de frenado. Además, es claro que existen más parámetros para ajustar, pero una representación confiable del tráfico vehicular no significa que esta sintonización tenga que realizarse continuamente.

Variable	Descripción	Parámetro	Descripción
x_n	Posición del vehículo n	v_{max}	Velocidad máxima
v_n	Velocidad del vehículo n	v_s	Velocidad lenta
Δx	Tamaño de la celda	l_s	Longitud del vehículo (en celdas)
Δv	Magnitud para incrementar/disminuir la velocidad en un paso de tiempo	M	Disminución máxima de velocidad en un paso de tiempo
d_{dec}	Distancia para frenar de manera segura en el siguiente paso de tiempo	R_s	Probabilidad de frenado aleatorio
d_{keep}	Distancia para mantener velocidad de manera segura en el siguiente paso de tiempo	R_0, R_d, R_a	R_a es un parámetro estocástico para aplicarse en el paso S2, el cual tiene un valor entre R_0 y R_d
d_{acc}	Distancia para acelerar de manera segura en el siguiente paso de tiempo		

Tabla 3.1: Resumen de variables y parámetros del modelo LAI

Resultados de simulación han mostrado que el modelo LAI suaviza el desempeño de desaceleración abrupto e irreal encontrado en la mayoría de los modelos para tráfico vehicular basados en AC y refleja el desempeño del conductor en el mundo real, donde los conductores disminuyen sus velocidades de una forma suave, bajo condiciones de conducción normales. Esto se puede observar en la figura 3.3(a) y (b), donde se muestran las trayectorias y las variaciones de velocidad, respectivamente, de unos cuantos vehículos moviéndose consecutivamente y aproximándose al frente aguas arriba de un estancamiento vehicular, bajo las reglas de cambio de velocidad del modelo LAI.

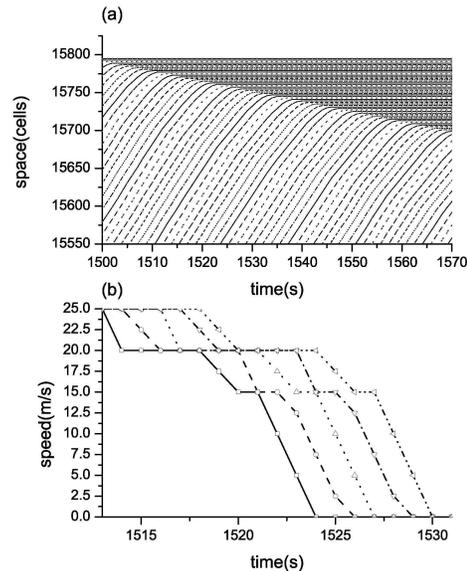


Figura 3.3: (a) Trayectorias de vehículos que se aproximan al frente aguas arriba de un estancamiento vehicular (b) Variaciones de velocidad cuando los vehículos alcanzan el estancamiento vehicular

Además, el modelo LAI también es capaz de reproducir diversos encuentros empíricos, incluyendo las tres fases del tráfico vehicular y la velocidad de propagación hacia atrás de un estancamiento. En la figura 3.4, se muestra el flujo promedio de 1 min con respecto a la densidad (conocido como diagrama fundamental), resultante del modelo LAI con condiciones de frontera periódicas. Como puede observarse de la figura 3.4, el modelo LAI reproduce las tres fases de tráfico existentes. La línea recta con pendiente positiva corresponde a la fase de flujo libre. La fase sincronizada forma una región bidimensional en medio del diagrama fundamental. Mientras que la fase de estancamientos amplios produce puntos distribuidos en la parte baja del diagrama fundamental.

En la figura 3.5 se muestran los diagramas espacio-tiempo de las diferentes fases del flujo vehicular resultantes del modelo LAI. Las figuras 3.5(a)-(c) muestran las características espacio temporales para las fases correspondientes a flujo libre, flujo sincronizado y estancamientos amplios, respectivamente. Cada columna vertical de puntos representa las posiciones instantáneas de los vehículos moviéndose; mientras que las columnas sucesivas de puntos representan las posiciones de los mismos vehículos en pasos de tiempo sucesivos. Los puntos negros representan vehículos con velocidad cero. Como puede notarse de la figura 3.5(b), los vehículos se mueven con una velocidad menor (tono de gris más oscuro) que la correspondiente a la fase de flujo libre, pero no existen vehículos parados. Mientras que en la figura 3.5(c), correspondiente a la fase de estancamientos amplios, se puede notar la presencia de ondas denominadas stop-and-go y la presencia de vehículos con velocidad cero. Con la finalidad de verificar la existencia de la fase sincronizada, en la figura 3.5(d) se presenta una imagen instantánea de una parte de la carretera seleccionada de forma aleatoria, que es resultado de

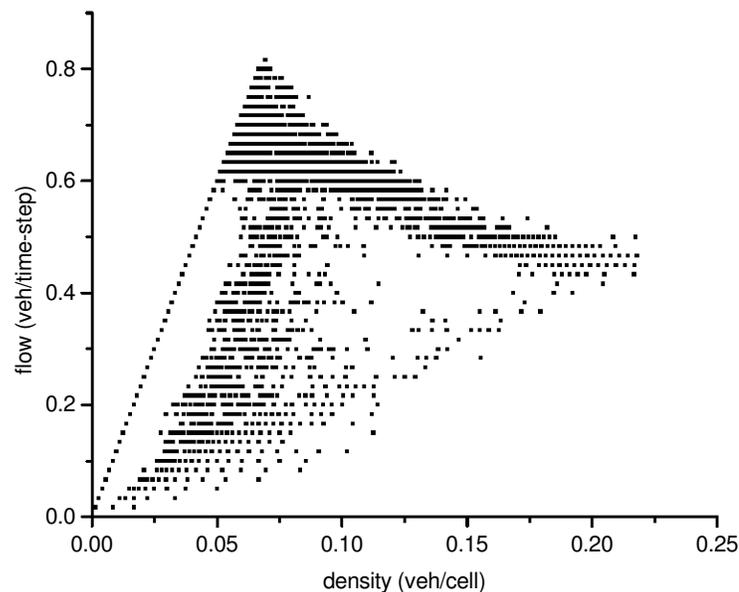


Figura 3.4: El flujo promedio de 1 min respecto a la densidad del modelo LAI para $\Delta x = 2.5m$, $R_d = 1.0$, $R_0 = 0.8$, $R_s = 0.01$, $v_s = 3$, $M = 2$, y $l_s = 2$.

una densidad inicial de 36 veh/km. En esta figura, los círculos sólidos representan vehículos moviéndose de la izquierda a la derecha.

Un análisis más detallado de los resultados del modelo puede consultarse en (Larraga, et.al., 2010).

En resumen, el modelo LAI introduce en la definición de su dinámica reacciones humanas, capacidades de aceleración y desaceleración con un valor límite, cuya definición se deriva de principios de conducción segura y prácticas de ingeniería de transporte. Además de que reproduce diversos fenómenos que ocurren en el tráfico vehicular real. Sobre todo, este modelo preserva la simplicidad que caracteriza a los modelos basados en AC y que los hace adecuados para su uso en tiempo real.

Las investigaciones realizadas hasta en el momento con el modelo LAI han generado resultados alentadores, que concuerdan con lo que se hace internacionalmente en este campo. Sin embargo, estas investigaciones se llevaron a cabo considerando un solo carril con vehículos homogéneos (misma longitud y velocidad). Aunque éste es un buen punto de partida, es necesaria la extensión del modelo LAI para considerar vehículos heterogéneos y vías con varios carriles, como ocurre en la realidad.

Los modelos de flujo de tráfico vehicular multicarril son diferentes de los modelos de un solo carril. Esto se debe a que cada carril tiene diferente comportamiento y los cambios de carril deben considerarse (Gipps, 1986; Helbing, et.al., 1998; Knospe, et.al., 1999). Otra consideración es que en las carreteras reales existen diferentes tipos de vehículos (vehículos heterogéneos) con diferentes tamaños, velocidades máximas y capacidades de aceleración / desaceleración. El comportamiento de cambio de carril realmente afecta el flujo de tráfico vehicular, pero un modelo de un carril o bien de vehículos homogéneos no puede reproducir

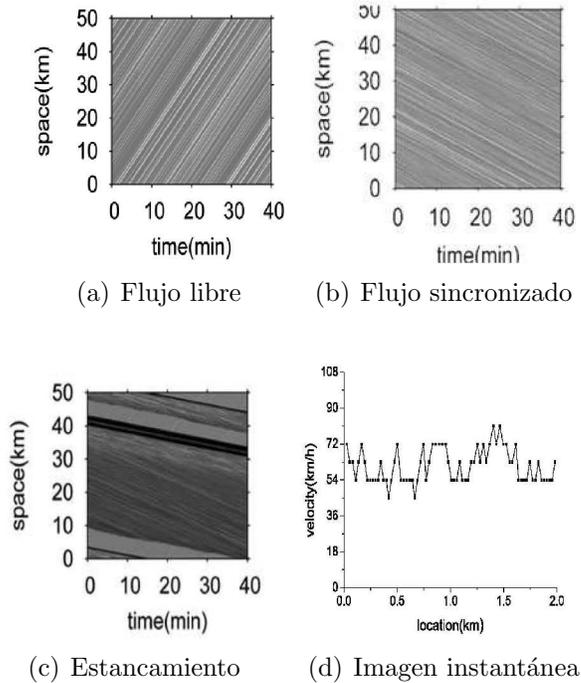


Figura 3.5: La forma espacio temporal de las diferentes fases de tráfico, libre (a), sincronizada (b) y estancamientos (c) para valores de densidad de 14 , 36, y 54 veh/km, respectivamente (0.035, 0.090, y 0.135 veh/cell, respectivamente). (d) Imagen instantánea del flujo sincronizado con una densidad inicial de 36 veh/km.

este fenómeno (Gang, et.al., 2006).

El objetivo de este trabajo de tesis es extender el modelo LAI para la simulación del tráfico vehicular con vehículos heterogéneos en varios carriles, de tal manera que en su definición se consideren comportamientos del conductor semejantes a las que ocurren en la realidad, pero al mismo tiempo mantener la simplicidad de las reglas que definen la dinámica vehicular. De esta forma, se espera lograr un modelo más real y computacionalmente eficiente. El nuevo modelo servirá como un precedente para la creación futura de un simulador para el análisis de las vías en México, donde escasamente se realizan este tipo de estudios a nivel microscópico.

Una vez que se presentaron los antecedentes, conceptos relacionados y consideraciones empíricas del tráfico vehicular y que se finalizó con la explicación de algunos modelos importantes del estado del arte, en particular el modelo LAI, en el siguiente capítulo se definirá un nuevo modelo acorde con el objetivo mencionado anteriormente.

Capítulo 4

Un nuevo modelo para el tráfico vehicular de varios carriles

La simulación del tráfico vehicular de vías con un solo carril es una tarea importante para obtener una vista preliminar, pero profunda, de las propiedades de un modelo. Sin embargo, para simular situaciones de tráfico más complejas y reales se debe considerar la modelación del tráfico vehicular con varios carriles (multicarril). Esto se debe a que un modelo de un solo carril no es capaz de modelar el tráfico real, principalmente porque el flujo vehicular real se compone usualmente de vehículos que tienen diferentes longitudes y velocidades. Por otra parte, introducir diferentes tipos de vehículos en el modelo de un solo carril, sólo resulta en pelotones de vehículos, con vehículos lentos que son seguidos por algunos más rápidos y por lo tanto, la velocidad promedio se reduce a la velocidad de los vehículos más lentos. Además de esto, la mayor parte de los datos empíricos se miden sobre vías de más de un carril. Entonces, no es suficiente que un modelo para tráfico vehicular en un solo carril reproduzca en forma correcta, tanto cualitativamente como cuantitativamente, datos empíricos resultantes de mediciones en varios carriles. De esta forma, con la finalidad de modelar un tránsito más apegado a la realidad, se requiere la modelación del tránsito sobre más de un carril (que aquí se le llamará multicarril).

En este capítulo se presentará un nuevo modelo cuyo objetivo es extender el modelo LAI, presentado en la sección 3.1.3, para la simulación del tráfico vehicular con vehículos heterogéneos en dos carriles, de tal manera que en su definición se consideren comportamientos del conductor semejantes a las que ocurren en la realidad, pero manteniendo la simplicidad de las reglas que definen la dinámica vehicular. De esta forma, se espera lograr un modelo más real y computacionalmente eficiente. El nuevo modelo servirá como un precedente para la creación futura de un simulador para el análisis de las vías en México, donde escasamente se realizan este tipo de estudios a nivel microscópico.

Se describirán algunas consideraciones importantes para la simulación y análisis de resultados. Posteriormente, se definirá el nuevo modelo para tráfico vehicular multicarril que extiende el modelo LAI presentado en el capítulo anterior. Después se presentará la explicación de la simulación y análisis de resultados. Finalmente, se incluirán los comentarios finales y un resumen de resultados.

4.1. Consideraciones para la simulación

Las reglas de cambio de carril para el tráfico vehicular de dos carriles pueden ser simétricas o asimétricas con respecto a los carriles (Schadschneider, et. al., 2011). Si las reglas de cambio de carril simétricas se aplican, las reglas no dependen de la dirección de la maniobra de cambio de carril. Mientras que si se aplican reglas de cambio de carril asimétricas, se deben definir distintos criterios para el cambio de carril, con base en la dirección de la maniobra.

En principio, diversos modelos para el tránsito vehicular multicarril (ver por ejemplo, (Gipps, 1986; Knospe, et.al., 2002; Helbing, et.al., 1998)) formulan en forma análoga las reglas microscópicas para controlar el desempeño del conductor al cambiar de carril, aún cuando se basan en teorías diferentes:

- Primeramente, un vehículo necesita un criterio incentivo para cambiar de carril, es decir, una razón para cambiar de carril (por ejemplo, el vehículo de adelante es muy lento o se desea regresar el carril preferente).
- Segundo, un cambio de carril sólo será posible si se satisface un criterio de seguridad que garantice que no se provocan accidentes (¿puedo cambiar de carril sin causar una colisión?).

Debido a que la formulación de reglas de cambio de carril realistas no es una tarea fácil, la mayoría de los modelos basados en AC existentes se han enfocado en producir resultados que se puedan considerar aceptables al compararlos con resultados de mediciones. En particular, para el tránsito vehicular de dos carriles existen muy pocos resultados empíricos que ayuden a especificar reglas de cambio de carril (Gang, et. al., 1991; Hall, et.al., 1988; Sparman, 1978). Algunas observaciones empíricas en las carreteras de dos carriles asimétricas, las cuales deben ser reproducidas por un modelo realista se describen a continuación.

1. En las carreteras de dos carriles con reglas de cambio de carril asimétricas, como las de México, la regulación legal es que el carril derecho debe ser usado tan frecuentemente como sea posible y el rebase de los vehículos sólo se permite sobre el carril izquierdo. Como resultado, la inversión de uso de carril se puede observar como sigue: en densidades pequeñas, la mayoría de los vehículos se encuentran a la derecha. Sin embargo, conforme se incrementa la densidad vehicular, la mayoría de los vehículos conducen sobre el carril izquierdo después de un punto de inversión. La densidad correspondiente a un punto de inversión es más pequeña que la que corresponde al flujo vehicular máximo. Esta inversión tiende a desvanecerse con el incremento de la densidad, tal que los vehículos se distribuyen en ambos carriles por igual (Chang-Fu, 2007; Wagner, 1997). Desafortunadamente no hay mucha información empírica respecto al comportamiento del uso de carril para valores de densidad grandes. Es importante mencionar, que en el tránsito urbano o en carreteras sin las restricciones del uso del carril derecho, el flujo se distribuye igualmente en ambos carriles.
2. Por otra parte, se ha observado que con el incremento de la densidad total a partir de un valor pequeño, el flujo vehicular del carril rápido alcanza su valor máximo (máxima

capacidad vehicular en condiciones de flujo libre) más pronto que el carril lento. Más allá de esa densidad crítica, el valor del flujo vehicular sobre el carril rápido continúa decreciendo, mientras que en el carril lento se incrementa. Por lo tanto, el decaimiento del flujo vehicular (inicio de congestiones) usualmente se origina en el carril rápido (Chang-Fu, 2007; Wagner, 1997).

3. Para este tipo de modelos, la frecuencia de cambio de carril, es decir, el número de cambios de carril por vehículo en unidad de tiempo, se debe incrementar en función de la densidad hasta que el flujo máximo se alcanza. Después de alcanzar un máximo en la vecindad de la densidad correspondiente al flujo vehicular máximo, esta frecuencia de cambio de carril se debe decrementar con la densidad. Sin embargo, los vehículos pueden todavía cambiar de carril en densidades altas (Chang-Fu, 2007; Wagner, 1997).

Por otra parte, para extender un modelo para el tránsito vehicular de un carril para la consideración de varios carriles, se deben introducir reglas de cambio de carril que consideren algunos aspectos observados empíricamente. De acuerdo a Knospe et al. (Knospe, et.al., 2002), el conjunto de reglas de cambio de carril debe (i) consistir de reglas locales y simples; (ii) ser robusto al considerar vehículos lentos, esto es, el flujo no debe ser dominado por una pequeña fracción de vehículos lentos; (iii) reproducir las curvas de cambio de carril empíricas en función de la densidad; (iv) mostrar la inversión de uso de carril que se ha observado empíricamente (en el caso de reglas de cambio de carril asimétricas) y (v) no debe cambiar el desempeño dinámico del modelo en un carril.

Además de la asimetría de las reglas de cambio de carril con base en las reglas viales, es posible considerar una asimetría función de los tipos de vehículos. Por ejemplo, se pueden definir distintas condiciones para llevar a cabo un cambio de carril con base en las características de los vehículos, como longitud, velocidad máxima, etc.

Como antecedente, en el contexto de los AC se han propuesto diversas extensiones del modelo NaSch para modelar el tránsito vehicular de dos carriles (Knospe, et.al., 2002; Nagatani, 1996; Nagel, et.al., 1992; Rickert, et. al., 1996; Wagner, 1997). Estas extensiones son capaces de reproducir la inversión de uso de carril que se observa empíricamente; sin embargo, éstas fallan en la modelación del número de cambios de carril en función de la densidad. Aún más, en una modificación reciente al modelo NaSch, se mostró que en la aproximación de AC pueden existir algunos problemas si se introducen diferentes tipos de vehículos; sin embargo, estos inconvenientes pueden minimizarse mediante la consideración de efectos de anticipación (Knospe, et.al., 1999); como es el caso de modelo LAI que se definió en el capítulo anterior.

Con base en las consideraciones descritas en esta sección, en la siguiente sección se introduce un nuevo modelo que aporta este trabajo de tesis para la simulación del tráfico vehicular en varios carriles, el cual es una extensión del modelo LAI (Larraga, et.al., 2010).

4.2. Definición del modelo

El modelo extendido consiste de dos carriles, cada uno de los cuales se define como un sistema independiente de un solo carril trabajando en paralelo. El modelo considera dos tipos de vehículos: automóviles (también llamados autos compactos o simplemente autos)

y camiones, los últimos con una longitud mayor que los automóviles y una velocidad límite menor. De esta manera el nuevo modelo que se propone considera distintos tipos de vehículos, no solamente con base en su velocidad límite, como la mayoría de los modelos existentes en la literatura, sino que además toma en cuenta que la longitud de los vehículos es diferente. También es posible, considerar vehículos con la misma longitud y diferente velocidad límite, pero en este trabajo no se realizó.

4.2.1. Definición de las reglas de cambio de carril

La definición de las reglas de cambio de carril, al igual que en el modelo LAI, considera restricciones mecánicas y distancias de seguimiento seguras entre los vehículos, de acuerdo a sus posiciones y velocidades. De esta manera, se toman en cuenta velocidades y distancias relativas en la definición de las reglas de cambio de carril y no sólo los espaciamientos entre vehículos; como lo hacen los modelos existentes en la literatura, con lo cual se alejan del comportamiento real tanto de los vehículos como de los conductores.

Las reglas de cambio de carril del nuevo modelo son asimétricas. La definición de la asimetría toma en cuenta tanto los carriles como los tipos de vehículos. De tal manera que se introducen distintas reglas para el cambio del carril izquierdo al carril derecho y viceversa y a la vez se definen distintas probabilidades para el cambio de carril en función del tipo de vehículo y su carril destino; lo cual se detalla más adelante.

En la definición de las reglas de cambio de carril asimétricas, se deben tomar en cuenta las normas de conducción de acuerdo al problema bajo consideración. Particularmente, el modelo que aquí se propone se basa en las normas de vialidad para las carreteras en México. Dos mecanismos conducen a una asimetría entre los carriles en las carreteras en México:

- (i) La preferencia de conducción sobre el carril derecho. Se obliga por la regulación legal de usar el carril derecho tan frecuentemente como sea posible.
- (ii) La prohibición de rebase por el carril derecho. Prohíbe a un vehículo que conduce en el carril derecho rebasar a un vehículo que conduce sobre el carril izquierdo.

La preferencia del carril derecho obliga a realizar cambios del carril izquierdo al carril derecho, es decir, a que un conductor siempre intente regresar al carril derecho después de rebasar, aunque en la realidad algunos conductores no lo realicen. Sin embargo, si solamente se considera este mecanismo en la modelación, además de no representar completamente la realidad, no se produce una descripción adecuada del uso de carril, debido a que los vehículos predominarían sobre el carril derecho, más que sobre el izquierdo. Por lo tanto, nunca se produce una inversión de uso de carril, como sucede también en la realidad. Más adelante se tratará el mecanismo de la prohibición de rebase por el carril derecho.

Considérense las variables relevantes para las reglas de cambio de carril que se describen en la tabla 4.1 y se ilustran en la figura 4.1; algunas de ellas adicionales a las variables del modelo LAI descrito en el capítulo anterior, en la tabla 3.1.

Reglas de cambio al carril izquierdo

Variable	Descripción
n	Vehículo en estudio
f	Vehículo que se encuentra enfrente de vehículo n en el mismo carril
lb	Vehículo que se encuentra a la izquierda y atrás del vehículo n
lf	Vehículo que se encuentra a la izquierda y adelante del vehículo n
rb	Vehículo que se encuentra a la derecha y atrás del vehículo n
rf	Vehículo que se encuentra a la derecha y adelante del vehículo n
v_{max}	Velocidad máxima permitida
$v_n, v_f, v_{lb}, v_{lf}, v_{rb}, v_{rf}$	Velocidad de los vehículos n, f, lb, lf, rb, rf
cl_n	Estado de la candidatura para cambio de carril del vehículo n . Sus valores pueden ser listo (no es candidato), der (candidato a derecha) o izq (candidato a izquierda)
p_{change}	Probabilidad del cambio de carril. Este valor es diferente para cada tipo de vehículo y carril destino
$d_{keep}(v_n, v_f), d_{acc}(v_n, v_f)$	Distancias de seguimiento seguro para mantener velocidad y acelerar, respecto a las velocidades de los vehículos n y f .
$d_{keep}(v_n, v_{lf}), d_{acc}(v_n, v_{lf})$	Distancias de seguimiento seguro para mantener velocidad y acelerar, respecto a las velocidades de los vehículos n y lf .
$d_{keep}(v_n, v_{rf})$	Distancia de seguimiento seguro para mantener velocidad, respecto a las velocidades de los vehículos n y rf .
$d_{dec}(v_{lb}, v_n)$	Distancia de seguimiento seguro para desacelerar, respecto a las velocidades de los vehículos lb y n .
$d_{dec}(v_{rb}, v_n)$	Distancia de seguimiento seguro para desacelerar, respecto a las velocidades de los vehículos rb y n .
$gap_{n,f}$	Distancia espacial entre los vehículos n y f
$gap_{n,lf}$	Distancia espacial entre los vehículos n y lf
$gap_{n,rf}$	Distancia espacial entre los vehículos n y rf
$gap_{lb,n}$	Distancia espacial entre los vehículos lb y n
$gap_{rb,n}$	Distancia espacial entre los vehículos rb y n

Tabla 4.1: Resumen de variables relevantes para las reglas de cambio de carril

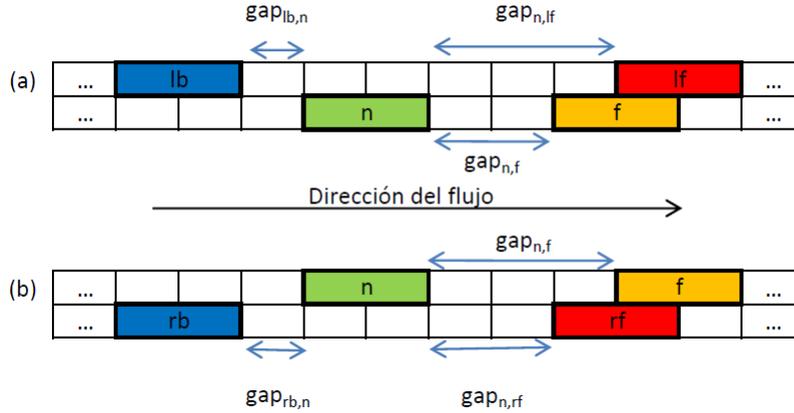


Figura 4.1: Vecinos de un vehículo n considerados en un cambio de carril. (a) Un vehículo que va a cambiar a la izquierda, debe considerar el vecino de enfrente f , el vecino de enfrente a la izquierda lf y el vecino de atrás a la izquierda lb . (b) Un vehículo que va a cambiar a la derecha, debe considerar el vecino de enfrente f , el vecino de enfrente a la derecha rf y el vecino de atrás a la derecha rb .

- Paso 1. Inicializar.

Para cada vehículo n determinar sus vecinos f, lb, lf, rb, rf y hacer $cl_n = listo$

- Paso 2. Determinar el cambio de carril

Criterio incentivo .

(cii1) Si $[(d_{keep}(v_n, v_f) \leq gap_{n,f} < d_{acc}(v_n, v_f))] \text{ y } [(gap_{n,lf} \geq d_{acc}(v_n, v_{lf})) \text{ y } (v_n < v_{max})]$
ó

(cii2) Si $[(gap_{n,f} < d_{keep}(v_n, v_f)) \text{ y } (gap_{n,lf} \geq d_{keep}(v_n, v_{lf}))]$

Criterio de seguridad .

(csi1) Si $gap_{lb,n} \geq d_{dec}(v_{lb}, v_n)$

entonces $(cl_n = izq)$

- Paso 3. Realizar cambio de carril

Si $cl_n = izq$ entonces el vehículo n cambia de carril al carril de su izquierda, con probabilidad p_{change} .

En lo siguiente explicamos la justificación para la definición de esta regla de cambio de carril. La definición de la regla de cambio al carril izquierdo se basa en dos criterios. El primero se refiere a que un vehículo deseará cambiarse al carril izquierdo si sus condiciones con

respecto al carril actual mejorarán. El segundo considera que el cambio de carril será posible si no ocasiona disturbios que pongan en riesgo al vehículo sucesor en el carril objetivo, es decir, el cambio es seguro. De esta manera, un vehículo deseará cambiarse al carril izquierdo bajo dos incentivos: (cii1) un vehículo que aún no alcanza su velocidad máxima tiene condiciones para mantener su velocidad, pero no para acelerar en su carril actual y las condiciones en el carril izquierdo respecto a la posición y velocidad del vehículo precedente le permiten seguir incrementando su velocidad; (cii2) en el carril actual, un vehículo tiene condiciones para desacelerar, con respecto a la velocidad y posición del vehículo que le precede y en el carril izquierdo al menos puede mantener su velocidad. El cambio de carril es posible si la distancia de seguimiento seguro del vehículo sucesor en el carril izquierdo con respecto al vehículo que se cambiará es suficiente para desacelerar en condiciones normales, (csi1).

Cabe mencionar que la mayoría de los modelos de AC existentes en la literatura toman en cuenta condiciones de seguridad muy conservadoras respecto al vehículo sucesor, es decir, basadas únicamente en el espaciamiento existente entre los vehículos, pero no toman en cuenta distancias y velocidades relativas a los mismos. Sin embargo, en la realidad un conductor estima la distancia de seguimiento seguro al vehículo sucesor en el carril objetivo, estimando las velocidades de ambos y su distancia; tal que el cambio permita que el vehículo sucesor frene gradualmente de ser necesario. Condiciones más conservadoras para el modelo pueden establecerse, pero en los resultados que se presentarán en este trabajo no se realizó esa consideración.

La probabilidad de cambio de carril, p_{change} que se introduce en la definición las reglas tiene diversos objetivos. Por una parte, permite representar el hecho que ocurre en la realidad de que un conductor, aún cuando tiene condiciones para cambiarse de carril, no lo realiza. Por otra parte, su sentido es referente a la dinámica del modelo, ya que permite controlar el número de cambios de carril derivados de la discretización del tiempo. Además, esta probabilidad puede establecerse en función del tipo de vehículo; además de que influye en la reproducción de la inversión de uso de carril y ayuda a reducir el efecto ping-pong ¹.

Reglas de cambio al carril derecho.

- Paso 1. Inicializar.

Para cada vehículo n determinar sus vecinos f, lb, lf, rb, rf y hacer

$cl_n = listo$

- Paso 2. Determinar el cambio de carril

Criterio incentivo .

(cid1) Si $[(gap_{n,f} \geq d_{keep}(v_n, v_f)]$ y $[(gap_{n,rf} \geq d_{keep}(v_n, v_{rf})]$

¹El efecto ping-pong consiste en que un vehículo típicamente alterna entre carriles durante pasos de tiempo sucesivos (Maerivoet, 2006; Knospe, et.al., 1999; Rickert, et. al., 1996) e incluso puede ocurrir una y otra vez en un modelo asimétrico (Rickert, et. al., 1996).

Criterio de seguridad .

(csd1) Si $gap_{rb,n} \geq d_{dec}(v_{rb}, v_n)$
entonces ($cl_n = der$)

- Paso 3. Realizar cambio de carril

Si $cl_n = der$ entonces el vehículo n cambia de carril actual al carril derecho, con probabilidad p_{change} .

En la definición del modelo se trata de seguir las normas viales del tránsito vehicular en las carreteras mexicanas, que indican que el carril derecho debe ser preferido para conducir y que el rebase vehicular por la derecha se prohíbe. En la definición del nuevo modelo se considera la prohibición de rebase, en el sentido que un vehículo que se encuentra en el carril izquierdo no debe cambiarse al carril derecho con la finalidad de adelantar a su vehículo precedente, en un instante de tiempo determinado. Por lo tanto, los vehículos sobre el carril izquierdo regresan al carril derecho sólo si la distancia de seguimiento seguro de un vehículo con respecto al vehículo que le antecede, tanto en el carril izquierdo como en el carril derecho, es suficiente para antener su velocidad actual; lo cual se modela a través del criterio (cid1) de la regla de cambio. Además, como suele ocurrir en la realidad, un conductor no intenta regresar al carril derecho si sus condiciones para conducir empeoran.

En la definición de (cid1) se toman en cuenta las distancias de seguimiento seguro del modelo LAI, descritas en las ecuaciones 3.7, 3.8 y 3.9 del capítulo previo; es decir, se introducen distancias y velocidades relativas a los vehículos. En particular, debido a que la definición de la distancia de seguimiento seguro d_{keep} considera el peor escenario posible, las reglas de cambio garantiza que el rebase no ocurrirá, al menos en el instante de tiempo actual.

Con la consideración del factor aleatorio p_{change} en la regla de cambio al carril derecho, además de considerar que un conductor, aún cuando tiene condiciones adecuadas para cambiarse de carril, no siempre realiza el cambio, se modela el hecho de que un camión intenta regresar al carril derecho más frecuentemente que un automóvil, como en la realidad. Así, en el modelo se definen valores de probabilidad de cambio al carril derecho más altos para los camiones que para los automóviles.

Es importante mencionar que en todos los modelos existentes para la modelación del tráfico vehicular de varios carriles basados en AC, se prohíbe el paso de los vehículos lentos al carril de más a la izquierda. Esta prohibición la justifican mencionado el hecho que un camión que rebasa a otro camión va a forzar a todos los vehículos sobre el carril izquierdo a reducir su velocidad y producir un tapón vehicular (mejor conocido por el término del inglés *plug*), que puede no resolverse por un periodo de tiempo largo (Knospe, et.al., 1999). Knospe et al. (Knospe, et.al., 2002), mencionan que estos plugs pueden disolverse con efectos de anticipación, sin embargo, debido a que introducir anticipación en la reglas de cambio de cambio de carril no es una labor fácil, por simplicidad prohíben el paso de camiones al carril de más a la izquierda. Como uno de los objetivos del modelo que se propone es que el comportamiento que se simula de los vehículos y de los conductores sea lo más apegado

al comportamiento real, en este modelo multicarril no se prohíbe el paso de los camiones al carril de más a la izquierda. En su lugar sí se consideran efectos de anticipación en la definición de los criterios incentivos, tanto de las reglas de cambio al carril derecho como al carril izquierdo y también en los criterios de seguridad, en los que se considera la distancia relativa sucesor y no sólo la distancia absoluta como en todos modelos existentes.

Los parámetros del modelo que se propone para el tráfico vehicular de dos carriles son los mismos que los correspondientes al modelo LAI de un solo carril, descritos en el capítulo anterior y solamente se adiciona el parámetro p_{change} . Por lo que los parámetros son los siguientes: la velocidad máxima v_{max} , la velocidad lenta v_s , la longitud del vehículo l_s (en celdas), el decremento máximo de la velocidad en un paso de tiempo M , la probabilidad de desaceleración aleatoria R_s , las probabilidades R_0 y R_d y la probabilidad de cambio de carril p_{change} .

Aunque tal y como se describió, el modelo propuesto es adecuado para la consideración de distintos tipos de vehículos, con diferentes capacidades de aceleración y desaceleración, sin necesidad de modificarse, en los resultados de simulación que se describirán a continuación y como punto inicial de la investigación, sólo se consideraron dos tipos de vehículos, con distintas longitudes y velocidades máximas, pero la misma capacidad de aceleración y desaceleración.

Además se consideraron solamente dos carriles con condiciones de frontera periódica (anillo), es decir no se toman en cuenta rampas de acceso o salida, ni reparaciones o accidentes.

4.3. Análisis de simulación

En esta sección se presentan los resultados de simulación del modelo propuesto sobre una carretera circular de dos carriles y con condiciones de frontera periódica (anillo).

Las simulaciones se llevaron a cabo sobre una carretera de dos carriles con cada carril de longitud $L = 2 \cdot 10^4$ celdas, donde cada celda tiene una longitud de 2.5 m. Se consideraron dos tipos de vehículos, automóviles y camiones, con longitud l_s de 5.0 m y 10.0 m, respectivamente (2 y 4 celdas en unidades de autómatas, respectivamente). Además, para cada tipo de vehículo se consideraron velocidades máximas diferentes correspondientes a 108 km/hr (12 celdas/paso de tiempo) y 81 km/hr (9 celdas/paso de tiempo) para los automóviles y los camiones, respectivamente. El paso de tiempo t siempre se toma de 1 s, por lo que las transiciones son de $t \rightarrow t+1$, al igual que en el modelo LAI de un solo carril. Inicialmente, se realizan los cambios de carril, tal que primeramente se ejecutan los cambios del carril derecho al carril izquierdo y posteriormente los cambios del carril izquierdo al carril derecho. Una vez realizados los cambios de carril de todos los vehículos (movimientos transversales), las velocidades de los vehículos en cada carril se cambian de acuerdo a las reglas de actualización de la velocidad del modelo LAI, numeradas como S3a-S3d, y entonces todos los vehículos se mueven hacia adelante (movimiento longitudinal). Por lo que cada carril funciona en forma independiente, semejante al modelo LAI de un solo carril.

Para cada simulación, inicialmente se ocupa una fracción de celdas de cada carril, la cual varía del 1% al 100%, en incrementos de 1%. De esta fracción de celdas, que llamaremos ocupancia (occ), se ocupa un 10% de las mismas con camiones y el resto se ocupa con automóviles. De tal manera que de acuerdo a la definición de ocupancia dada en el capítulo 3 a través de la ecuación 4.1, el número total de celdas ocupadas entre los dos carriles para cada valor de la ocupancia es $L_{oc} = 2 * L * occ$. Por lo tanto, el número total de camiones y automóviles para cada ocupancia, denotados por N_c y N_a , respectivamente corresponde a

$$\begin{aligned} N_c &= (L_{oc} * 0.10)/4 \\ N_a &= (L_{oc} - (N_c * 4))/2 \end{aligned}$$

y el número total de vehículos es

$$N = N_c + N_a$$

Los N_c y N_a vehículos se distribuyen por partes iguales entre los dos carriles en posiciones aleatorias, con una velocidad inicial que toma un valor discreto entre 0 y v_{max} . Como el sistema es cerrado la densidad global permanecerá constante en el tiempo.

Para la simulación del modelo, en lugar de la densidad vehicular, se calcula la ocupancia vehicular (Pottmeier, 2007). Esto se debe a que la ocupancia vehicular es más adecuada cuando se consideran distintos tipos de vehículos con diferentes longitudes. De esta manera la ocupancia total se calcula utilizando la ecuación 4.1.

$$occ = \frac{\sum_{n=1}^N l_n}{L} \quad (4.1)$$

donde l_n es la longitud del n – *esimo* vehículo.

El valor del parámetro de probabilidad de cambio p_{change} se establece a 1.0 para el cambio del carril derecho al izquierdo, sin importar el tipo de vehículo; mientras que para el cambio del carril izquierdo al derecho, toma los valores de 0.8 y 0.1 para los camiones y los automóviles, respectivamente. Como se puede notar, para el cambio de carril hacia la izquierda no existe restricción y esto se debe a que las reglas de cambio en sí mismas son suficientes para simular el desempeño de cambio de carril semejante a como ocurre en la realidad (como ya se explicó antes). Sin embargo, como puede notarse para el cambio de carril a la derecha, la probabilidad de cambio de un camión es mucho más alta que la de un automóvil; la razón es con ello se busca de alguna representar el hecho de que en condiciones normales un camión rebasa e inmediatamente busca regresar al carril derecho mientras que un automóvil lo hace menos frecuentemente. Además, de los resultados de simulación, se encontró que con estos valores se reproducen bien diversos fenómenos encontrados empíricamente.

Además, para las simulaciones fue necesario hacer una pequeña modificación al modelo LAI en las reglas S3a y S3b, debido a que en el modelo LAI no se perturba en forma aleatoria la velocidad de un vehículo (a través del parámetro R_s), cuando éste se conduce con su máxima velocidad; lo cual no altera los resultados del modelo LAI, porque éste considera vehículos homogéneos con la misma longitud y velocidad máxima. Sin embargo, para el modelo de dos carriles, con vehículos heterogéneos, si no se perturba a los vehículos que conducen a su máxima velocidad permitida, se forman tapones vehiculares que tardan mucho tiempo en deshacerse. Esto se debe a que la velocidad de los camiones es menor a la de los automóviles, entonces es posible que dos camiones que se mueven lado a lado en los dos carriles con su máxima velocidad formen un tapón vehicular que se mantiene durante mucho tiempo. Por lo que fue necesario realizar una pequeña modificación al modelo LAI, con la finalidad de que un vehículo que conduce a su máxima velocidad pueda sufrir perturbaciones aleatorias en la misma. Adicionalmente, en las simulaciones se consideró el valor de la probabilidad de desaceleración aleatoria R_s en función del tipo de vehículo. De tal manera que para las simulaciones se establecieron valores de 0.1 y 0.05 para los camiones y los automóviles, respectivamente, en lugar del valor de 0.01 en (Larraga, et.al., 2010). Las modificaciones realizadas al modelo LAI se detallan en el apéndice A.

Cabe mencionar que en la realidad los tapones vehiculares en las carreteras de México sí se forman, pero en condiciones normales, no se mantienen en el tiempo. El modelo propuesto con la modificación del modelo LAI y los valores del parámetro R_s no evita que se formen los tapones vehiculares, pero su duración se reduce considerablemente, aproximadamente a 10 s y no duran eternamente como sucede en los modelos de AC existentes cuando permiten el paso de los camiones al carril de más a la izquierda.

En todos los resultados de simulación que se presentan en este trabajo se usaron los siguientes valores para los parámetros: $\Delta x = 2.5$ m, $R_d = 1.0$, $R_0 = 0.8$, $M = 2$ y $v_s = 3$ para todos los vehículos. Para los camiones $v_{max} = 9$, $l_s = 4$, $R_s = 0.1$ y $p_{change} = 1$ y 0.8 para el cambio de carril a la izquierda y derecha, respectivamente. Para los automóviles

$v_{max} = 12$, $l_s = 2$, $R_s = 0.05$ y $p_{change} = 1$ y 0.1 para el cambio de carril a la izquierda y derecha, respectivamente.

Cada simulación correspondiente a un valor de la ocupancia se lleva a cabo durante un periodo de $T = 67,500$ pasos de tiempo, de los cuales los primeros $65,000$ corresponden a un periodo de relajación para alcanzar un estado de equilibrio a partir del cual se miden los resultados. Además, para cada simulación se realizan 20 experimentos cuyos resultados se promedian. La razón para utilizar estos valores se explica en el apéndice C. A continuación se explican los resultados obtenidos de esta simulación.

Una forma conveniente de demostrar que el modelo reproduce el comportamiento del flujo de tráfico vehicular es graficar el diagrama fundamental, el cual indica la relación entre el flujo vehicular y la densidad (Larraga, et.al., 2005). En la figura 4.2 se muestra el diagrama fundamental resultante del modelo de dos carriles en comparación con el correspondiente al modelo LAI de un solo carril. Como se puede observar de la figura, el flujo promedio máximo por carril resultante del modelo propuesto (2301 veh/hr/carril) es ligeramente más alto que el flujo promedio para el modelo de un solo carril (2158 veh/hr), aún con la introducción de camiones. Además, la ocupancia donde este flujo máximo se alcanza (15% , equivalente a una densidad de 28.57 veh/km), la cual corresponde a la capacidad vehicular máxima de la carretera en condiciones de flujo libre, se recorre hacia la derecha en el modelo de varios carriles, como es de esperarse.

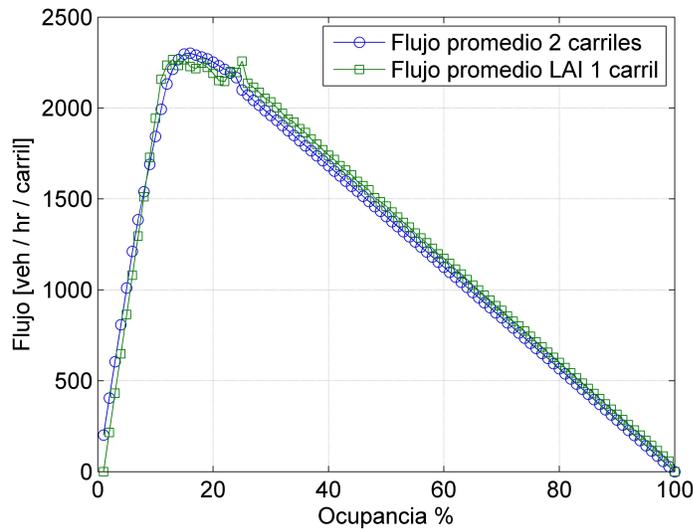


Figura 4.2: Flujo vehicular promedio por carril del sistema propuesto

En la figura 4.3 se muestra el diagrama fundamental resultante para cada carril en comparación con el correspondiente al flujo promedio. Esta figura ilustra la asimetría de las reglas de cambio de carril. En densidades pequeñas, donde la interacción vehicular es casi nula, el flujo en el carril derecho es más alto que en el carril izquierdo; debido a que los vehículos permanecen en el carril preferente y no tienen necesidad de cambiarse. Con el incremento de la densidad, este comportamiento cambia y los vehículos empiezan a cambiarse al carril izquierdo, por lo que la densidad vehicular y como consecuencia el flujo vehicular son mayores

sobre este carril y por lo tanto, el flujo máximo se alcanza más rápido en el carril izquierdo que en el carril derecho. Más allá de esa densidad crítica, el valor del flujo vehicular sobre el carril izquierdo continúa disminuyendo mientras que en el carril derecho se incrementa. Por lo tanto, el decaimiento del flujo vehicular (congestionamientos) se origina en el carril izquierdo. Este comportamiento corresponde con encuentros empíricos (ver sección 4.1).

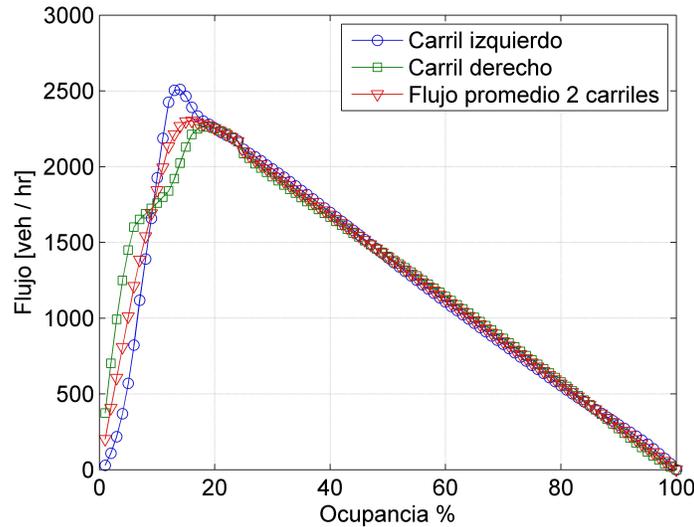


Figura 4.3: Comparación del flujo vehicular promediado de ambos carriles con el flujo vehicular del modelo LAI de un solo carril

La figura 4.4 muestra el diagrama fundamental resultante de medir el flujo vehicular local promediado cada minuto con respecto a la densidad vehicular. Para cada uno de los valores de la densidad, el flujo vehicular local J_{loc} y la velocidad local promedio v_{loc} , se obtienen colocando un detector virtual en una localidad específica de la carretera. Entonces la densidad espacial se obtiene a través de la relación hidrodinámica $J = \rho_{loc} \cdot v_{loc}$. De esta manera, cualquier densidad dada se relaciona a muchos puntos en el diagrama fundamental obtenido. Como se puede notar de la figura 4.4, pueden identificarse los tres estados de tráfico vehicular, el flujo libre, el flujo sincronizado y los estancamientos. La línea recta con pendiente positiva corresponde al flujo libre. Los estados sincronizados forman una región bidimensional en la mitad del diagrama, mientras que los vehículos estancados producen los puntos dispersos en la parte baja de la gráfica. Es importante notar que debido a que únicamente los vehículos en movimiento son los que pueden ser medidos por el detector, la velocidad local promedio en los congestionamientos es usualmente sobrestimada y por lo tanto, la densidad es subestimada. Además, de la figura 4.4 se aprecia que la ramificación correspondiente a los estancamientos se extiende aproximadamente hasta 19 veh/celda, que corresponde a 76 veh/km y de acuerdo a datos empíricos este valor es aproximado a 70 veh/km (Knospe, et al., 2004).

El diagrama fundamental puede describir las tendencias generales de los estados del tráfico vehicular. Sin embargo, no es suficiente para identificar con precisión los diferentes tipos de estados del tráfico vehicular (es decir, flujo libre, flujo sincronizado y estancamientos). De

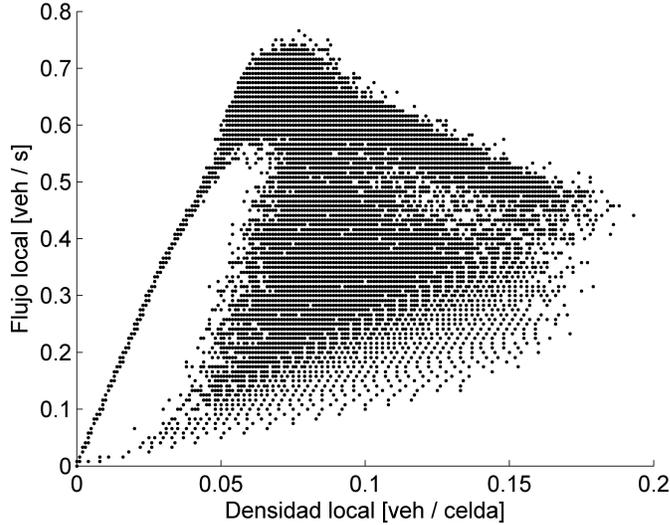


Figura 4.4: Diagrama fundamental que muestra el flujo vehicular promedio contra la densidad, obtenido en periodos de 1 minuto del modelo propuesto

esta manera, el diagrama espacio-temporal del modelo propuesto se estudia para diferentes densidades. Las figuras 4.5(a)-(c) muestran las características espacio temporales para las fases correspondientes al flujo libre, flujo sincronizado y flujo estancado, respectivamente, para el carril izquierdo (lado izquierdo) y derecho (lado derecho). Cada renglón horizontal de puntos representa las posiciones instantáneas de los vehículos moviéndose hacia adelante, mientras que los renglones de puntos sucesivos representan los mismos vehículos en pasos de tiempo sucesivos. La dirección del flujo vehicular es de la izquierda a la derecha y los pasos de tiempo evolucionan de arriba hacia abajo. Los puntos negros representan vehículos con $v = 0$. En el flujo sincronizado (figura 4.5(b)) la velocidad promedio es menor que la correspondiente al flujo libre, pero no hay vehículos parados. De la figura 4.5(c), que corresponde a la fase congestionada, pueden observarse ondas de paro (conocidas como stop and go), las cuales viajan en sentido contrario a la dirección del flujo vehicular. Para ilustrar la estructura de la fase sincronizada, en la figura 4.6 se muestran las distribuciones de velocidad con respecto a la densidad. De esta gráfica, puede notarse que efectivamente para densidades intermedias, efectivamente no hay vehículos parados y la distribución de velocidad es más amplia que en las densidades correspondientes a la fase de flujo libre; por lo que la velocidad promedio es más baja, pero no hay vehículos parados. Esto confirma que los puntos correspondientes al área sincronizada en el diagrama fundamental de la figura 4.4 no se atribuyen a los efectos promedio de fluctuaciones fuertes, sino que estos puntos son una consecuencia de la relación especial velocidad-espaciamiento, que se produce en la fase sincronizada.

Por otra parte, con la finalidad de comparar la influencia de los camiones en el comportamiento del sistema, en las figuras 4.7(a)-(b) se muestran las velocidades promedio por tipo de vehículo con respecto a la ocupancia, para el carril izquierdo y el carril derecho, respectivamente. En ambas gráficas se observa que hasta una cierta densidad crítica, el valor de la velocidad promedio de los camiones se mantiene casi constante. Además, dicha densidad

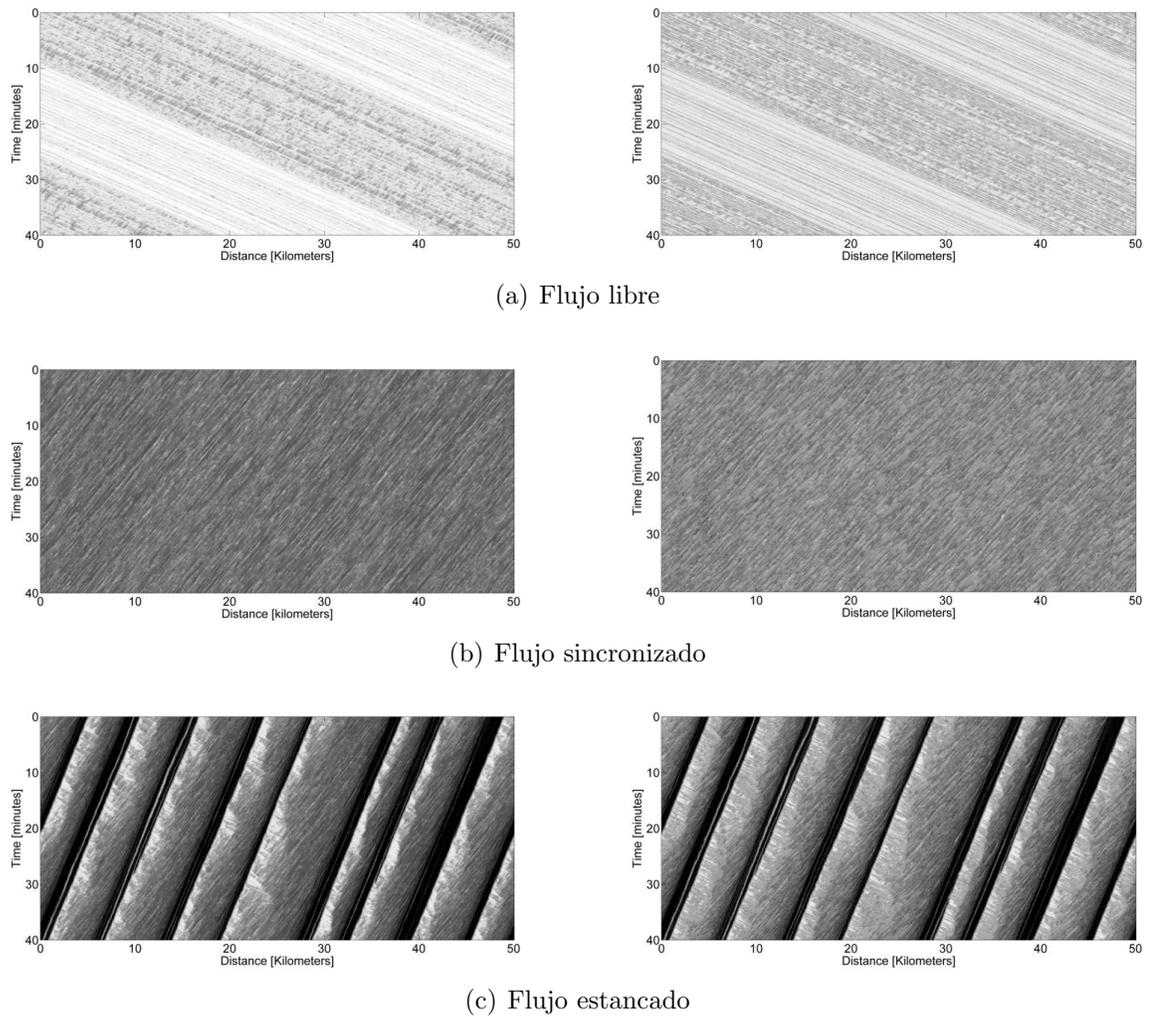


Figura 4.5: Diagrama espacio tiempo de las diferentes fases de tráfico vehicular, libre (a), sincronizado (b) y estancado (c) para los valores de densidad 19, 38 y 57 veh/km, respectivamente (10 %, 20 % y 30 % de ocupancia, respectivamente). Para cada figura, la imagen de la izquierda corresponde al carril izquierdo y la de la derecha corresponde al carril derecho

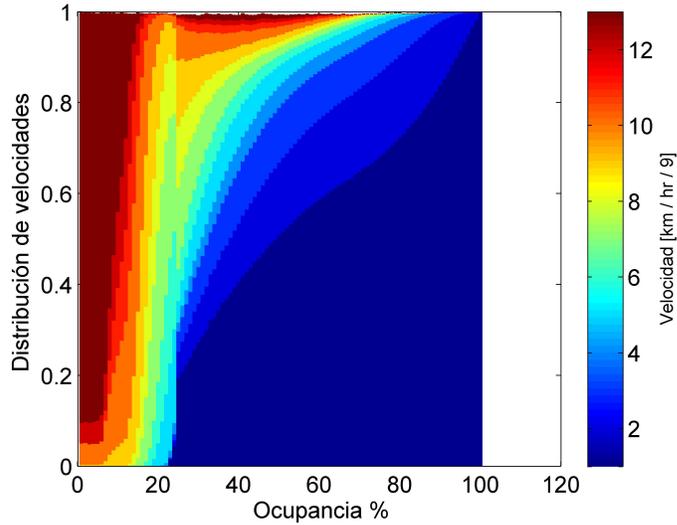


Figura 4.6: Distribución de la velocidad respecto a cada porcentaje de ocupancia. Las velocidades más bajas se representan en color azul, mientras que las velocidades más altas se representan en color rojo.

crítica corresponde a la densidad de flujo máximo de cada carril mostrados en la figura 4.3.

Lo que ocurre es que mientras la velocidad promedio de los automóviles sea más alta que la velocidad límite de los camiones, los camiones sienten ligeramente el incremento de la ocupancia; debido a que el espacio existente en la carretera es suficiente para que los camiones mantengan velocidades con valores cercanos a su velocidad límite; hasta que en una densidad crítica, donde el espacio entre vehículos se empieza a reducir y al mismo tiempo casi todo el espacio está siendo usado, la velocidad promedio de los automóviles decae significativamente hacia la velocidad límite de los camiones (aproximadamente 81km/hr) en un estado correlacionado y altamente coherente, en analogía al movimiento de un bloque sólido (Helbing, et.al., 1998). Esto produce el mínimo local que se observa en la diferencia de las curvas de las velocidades promedio de las figuras 4.7(a)-(b). Además, debido a que la velocidad de todos los vehículos es casi idéntica en este estado, la frecuencia de cambios de carril decae significativamente, como se puede observar en la figura 4.10.

Este estado no cambia hasta que la carretera completa se satura en una nueva densidad crítica. Entonces la velocidad de los vehículos decae significativamente para mantener distancias seguras. En este estado, la fase de tráfico de parar y seguir produce espacios que varían mucho, los cambios de carril de nuevo son posibles y el estado coherente se destruye. Aunque en (Helbing, et.al., 1998) utilizaron reglas de cambio de carril simétricas para realizar estas observaciones, este mismo comportamiento también fue observado empíricamente con reglas asimétricas en los Países Bajos y por lo tanto los resultados que se presentan en este trabajo de tesis coinciden cualitativamente con las observaciones empíricas, en las cuales, la diferencia de velocidades de los dos tipos de vehículos es más marcada en el carril izquierdo, de forma similar a las figuras 4.7(a) y 4.7(b).

Este estado sólido se forma espontáneamente a partir de la interacción de los vehículos.

Se sugiere que este estado sólido es altamente independiente del modelo de tráfico vehicular. Además este estado coherente del movimiento de los vehículos reduce considerablemente las principales causas de accidentes: diferencias de velocidades de los vehículos y cambios de carril. Esto también se asocia con el máximo desempeño de la carretera y se localiza justo antes de la transición al flujo de tráfico inestable. Entonces, en un nivel práctico, es deseable implementar reglas de tráfico y diseñar controles de carretera que conlleven a un movimiento en bloque sólido.

Particularmente, para la figura 4.7(a), correspondiente al carril izquierdo, debe tomarse en cuenta que sólo se consideran los experimentos válidos; es decir, aquellos en los cuales al menos existe un camión en el carril izquierdo durante un segundo del tiempo estable; esto se debe a que aún en tiempo estable de la simulación en densidades bajas, los camiones usualmente no tienen necesidad de cambiar al carril izquierdo y sólo eventualmente realizan este cambio.

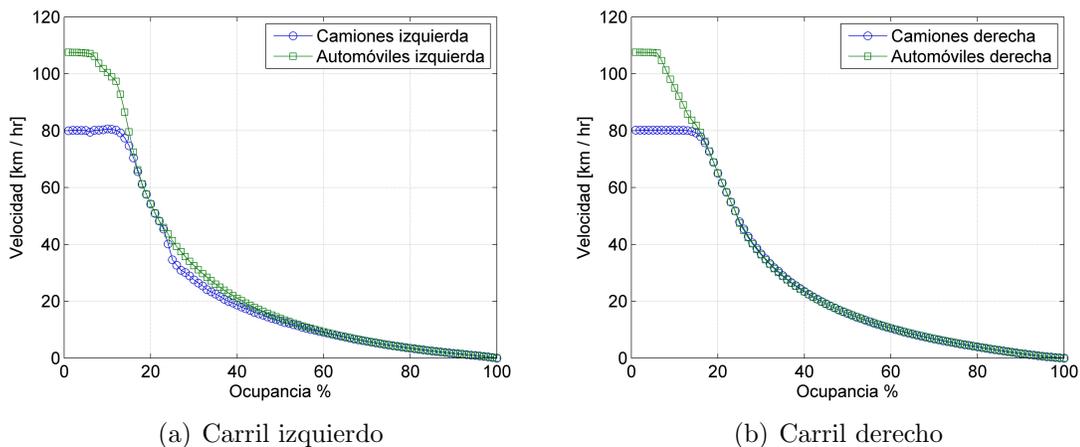


Figura 4.7: Diagrama de la velocidad promedio por tipo de vehículo y carril, con respecto a la ocupancia. Los diagramas correspondientes al carril izquierdo y al carril derecho se muestran en (a) y (b), respectivamente.

Otro de los fenómenos empíricos que un modelo multicarril debe ser capaz de reproducir es la inversión de uso de carril, que se observa en sistemas con reglas de cambio de carril asimétricas, como las del modelo propuesto (Knospe, et.al., 2002). En la figura 4.8, se muestra la gráfica de uso de carril con respecto a la ocupancia, resultante de la simulación del modelo propuesto. Como se observa de esta gráfica, en densidades pequeñas la preferencia del carril derecho domina, tal que la mayoría de los vehículos conducen en el carril derecho. Sin embargo, como una consecuencia de la prohibición de rebase por el carril derecho, implícita a través de la definición de las reglas de cambio de carril, con el incremento de la densidad más vehículos evitan conducir en el carril derecho y la inversión de carril se produce. La forma de la gráfica se asemeja mucho a la forma obtenida de datos empíricos de carreteras europeas (Helbing, et.al., 1999). El punto de inversión de la gráfica de uso de carril está determinado por las distancias de seguimiento seguro, que se establecen en las reglas para el regreso al carril derecho. De acuerdo a la figura 4.8, el punto de inversión se produce en una ocupancia

aproximada al 11 % (~ 21 veh/km), un poco antes de la ocupancia donde el flujo máximo se alcanza. Esto corresponde con los encuentros empíricos mencionados en la sección 4.1.

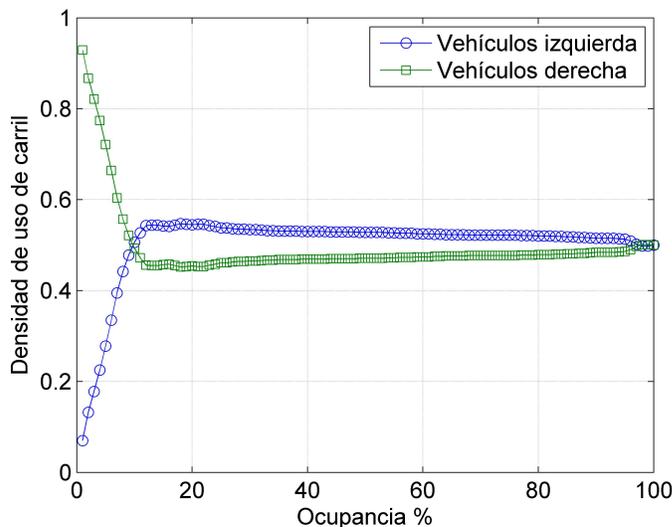


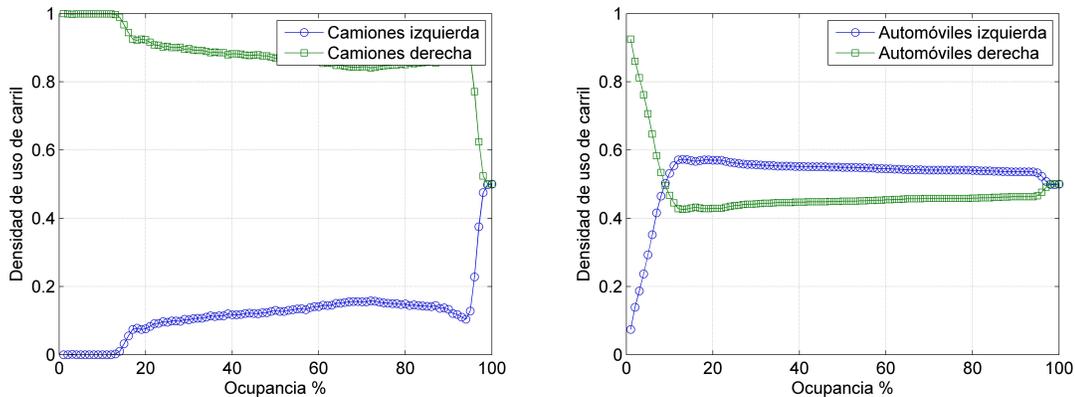
Figura 4.8: Densidad de uso de carril de los vehículos, donde se puede comparar el uso del carril izquierdo y derecho en el modelo propuesto.

La densidad de uso de carril de los automóviles y camiones de esta simulación se presenta en las figuras 4.9(a) y (b), respectivamente.

En la figura 4.9(a) se muestra el uso de carril con respecto a la densidad para los camiones, que se obtuvo mediante simulaciones del modelo heterogéneo propuesto. Note como los resultados muestran la *robustez* del modelo cuando se consideran vehículos lentos: independientemente del valor de la ocupancia, los camiones se concentran más en el carril derecho que en el izquierdo. En densidades pequeñas, donde los congestionamientos no existen, los camiones se concentran en el carril derecho, como pasa en el flujo vehicular de carreteras real. Con el incremento de la densidad, los camiones empiezan a cambiarse al carril izquierdo, pero a pesar de ello, el porcentaje de los camiones siempre es mayor en el carril derecho que en el carril izquierdo. Además, en la figura 4.9(b), correspondiente al uso de carril de los automóviles con respecto a la ocupancia, se observa que la inversión de uso de carril para los automóviles se sigue produciendo. Esto es un buen indicador de que se cumple uno de los objetivos del modelo: el flujo no se domina por la introducción de los vehículos lentos en el sistema, es decir, el porcentaje de vehículos lentos no se distribuye igualmente entre los carriles.

Además, un análisis profundo de las simulaciones indica que con el paso de los camiones al carril de más a la izquierda, no se evita la formación de tapones vehiculares, pero éstos no permanecen en el tiempo, su duración es muy corta (ver apéndice A). Este comportamiento corresponde con el que se observa eventualmente en las carreteras mexicanas, cuando los camiones ocupan el carril izquierdo generando que los vehículos sucesores adecuen su velocidad a la velocidad del camión durante un periodo de tiempo corto, hasta que el camión se regresa al carril derecho. Esta robustez del modelo propuesto al considerar vehículos lentos, se debe a la consideración de distancias y velocidades relativas en la definición de las reglas

de cambio de carril.



(a) Densidad de uso de carril de los camiones (b) Densidad de uso de carril de los automóviles

Figura 4.9: (a) Densidad de uso de carril de los camiones, (b) Densidad de uso de carril de los automóviles. En ambas figuras se puede comparar su uso del carril izquierdo y derecho.

Por otra parte, de acuerdo a datos empíricos, la habilidad para cambiar carriles debe incrementarse en función de la densidad, mostrar un máximo en la densidad del flujo máximo y entonces disminuir con el incremento de la densidad (Wagner, 1997). Sin embargo, los cambios de carril deben ser posibles todavía en densidades altas. Con el objetivo de verificar que el modelo propuesto reproduce este comportamiento, en la figura 4.10 se muestra la frecuencia de cambios de carril, por vehículo y por segundo, con respecto a la ocupancia resultante de simulación. Como puede notarse de la gráfica, la frecuencia máxima promedio de cambios se produce aproximadamente en una ocupancia de 7% (~ 13.33 veh/km), muy cerca del valor de la ocupancia donde flujo vehicular máximo se alcanza. Posteriormente, con el incremento de la ocupancia vehicular, la frecuencia de cambios disminuye, pero los cambios de carril aún son posibles en densidades altas. Por lo tanto, el modelo propuesto también es capaz de reproducir la dependencia de la densidad vehicular de los cambios de carril de la que se habló en los hechos empíricos de la sección 4.1.

Uno de los problemas que suele ocurrir en los modelos para el tráfico vehicular multicarril basados en AC, es el efecto llamado ping-pong. Este efecto consiste en que un vehículo alterna entre carriles durante pasos de tiempo sucesivos, e incluso puede ocurrir una y otra vez en un modelo asimétrico. De acuerdo a la literatura, una forma común de resolver este problema es establecer los cambios de carril en forma aleatoria (Hämäläinen, 2006; Knospe, et.al., 1999; Maerivoet, 2006; Rickert, et. al., 1996). Con la finalidad de determinar la ocurrencia del efecto ping-pong en el modelo propuesto, se hizo un análisis del mismo. Para este propósito se contabilizaron los cambios de carril ping-pong que ocurrían cada paso de tiempo, donde ping-pong se refiere a cambios de carril que ocurren durante pasos de tiempo subsecuentes (ver figura 4.11). Como puede notarse de los resultados que se muestran en esta gráfica, en comparación con los cambios de carril totales de la figura 4.10, sólo el 5% aproximadamente son cambios de carril de tipo ping-pong. Al igual que los cambios de carril totales, el máximo número de cambios de carril ping-pong ocurre cerca de la ocupancia de flujo máximo. La

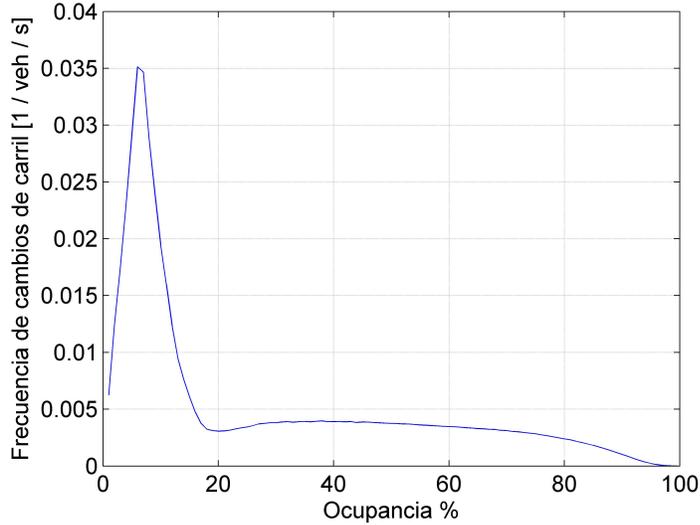


Figura 4.10: Frecuencia de cambios de carril por vehículo y por segundo, respecto a la ocupancia.

frecuencia máxima de cambios de tipo ping pong que se observa en la figura 4.11 parece razonable si se realiza la equivalencia en horas, al obtener 7.2 cambios ping pong/veh/hr.

Adicionalmente, se realizó un análisis en el que se catalogaron dos tipos de cambio ping pong, LRL y RLR (Rickert, et. al., 1996), los cuales se explican a continuación. El tipo izquierda-derecha-izquierda (LRL, por sus iniciales en inglés) indica que un vehículo que estaba conduciendo en el carril izquierdo en el tiempo t , en el tiempo $t + 1$ cambió al carril derecho y finalmente en el tiempo $t + 2$ regresó al carril izquierdo. De manera análoga, el tipo derecha-izquierda-derecha (RLR, por sus iniciales en inglés) indica que un vehículo que se encontraba conduciendo en el carril derecho en el tiempo t , en el tiempo $t + 1$ cambió al carril izquierdo y finalmente en el tiempo $t + 2$ regresó al carril derecho. En las figuras 4.12(a) y (b) se presentan los resultados de simulación obtenidos del modelo para los cambios de carril ping-pong LRL y RLR con respecto a la ocupancia, respectivamente. Se observa que la mayor presencia de cambios ping-pong, en comparación con la figura 4.11, es la del tipo RLR, lo cual indica que el modelo reproduce el hecho de la preferencia del carril derecho para conducir.

4.4. Comentarios del capítulo

En este capítulo se presentó un nuevo modelo para el tráfico vehicular de carreteras de dos carriles. El modelo extiende las reglas del modelo LAI (Larraga, et.al., 2010) de un solo carril, tal que los cambios de carril son posibles. De esta manera es propuesto un nuevo conjunto de reglas para el cambio de carril, las cuales introducen efectos de anticipación. La definición de reglas se basa en las normas viales de las carreteras en México, en principios de seguridad en ingeniería de transporte y en el comportamiento real de los conductores y los

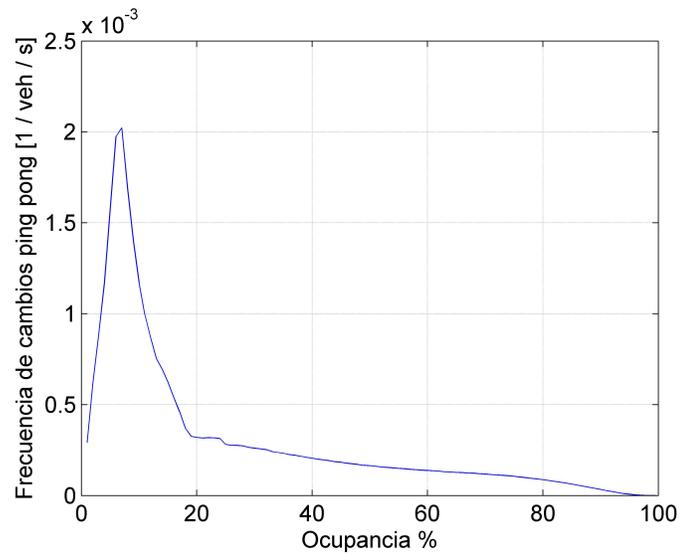
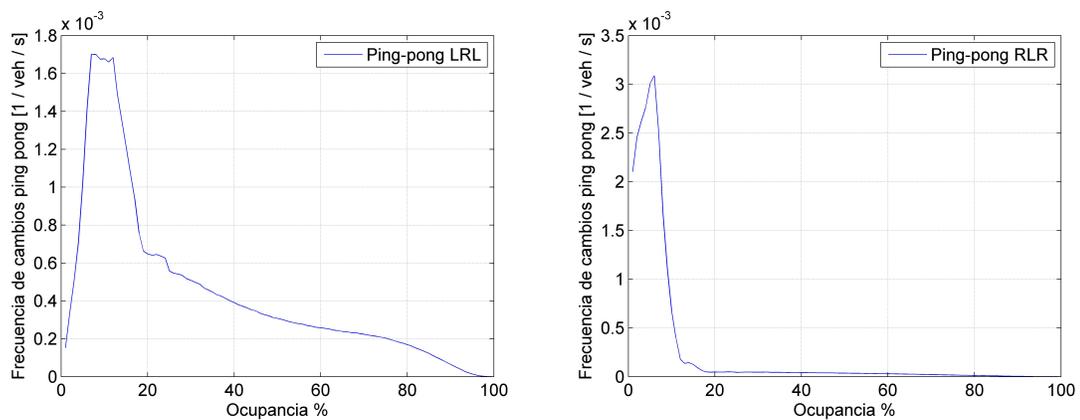


Figura 4.11: Frecuencia de cambios de carril tipo ping-pong por vehículo y por segundo, respecto a cada porcentaje de ocupancia.



(a) Frecuencia de cambios de carril tipo ping-pong LRL (b) Frecuencia de cambios de carril tipo ping-pong RLR

Figura 4.12: (a) Frecuencia de cambios de carril tipo ping-pong LRL, (b) Frecuencia de cambios de carril tipo ping-pong RLR. En ambas figuras se presenta la frecuencia de cambios de carril tipo ping-pong por vehículo y por segundo, respecto a cada porcentaje de ocupancia.

vehículos. Como resultado, las nuevas reglas para cambio de carril toman en cuenta distancias y velocidades relativas entre los vehículos para realizar los cambios de carril y no solamente distancias absolutas, como en los modelos existentes en la literatura. Además, el modelo toma en cuenta dos tipos de vehículos, camiones y automóviles, con valores de longitud y velocidad máxima diferentes.

Los resultados de simulación para un sistema de dos carriles con condiciones de frontera periódica y reglas de cambio de carril asimétricas indican que el modelo es capaz de producir diversos fenómenos que se han observado en la realidad, tales como la inversión de uso de carril, la dependencia de la densidad de los cambios de carril y el comportamiento del flujo vehicular acorde al observado en carreteras de varios carriles.

Aún más, todos los modelos existentes en literatura afirman que el permitir que los camiones se cambien al carril de más a la izquierda conlleva a que el flujo vehicular se domine por la presencia de los vehículos lentos y que una forma de solucionarlo es introducir efectos de anticipación en las reglas de cambio de carril, pero por simplicidad no lo hacen y simplemente lo prohíben. Los resultados de simulación mostrados en este capítulo para el modelo propuesto, a través de las gráficas de uso de carril, indican que aunque el modelo sí permite los cambios de carril de los camiones al carril de más a la izquierda, el flujo vehicular no se domina por la presencia de los mismos. De esta manera el modelo es robusto al considerar vehículos lentos.

Por otra parte, se logró reducir ampliamente uno de los problemas que presentan la mayoría de los modelos basados en AC, la frecuencia de cambios de carril denominados ping-pong.

Es importante mencionar que el nuevo modelo que se presentó en este capítulo, sólo incrementa en uno el número de parámetros con respecto al modelo de un solo carril. Además, las reglas de cambio de carril se pueden aplicar en paralelo a todos los vehículos, lo que lo hace adecuado para su uso como base de un simulador en tiempo real o en línea. De esta manera el nuevo modelo propuesto cumple con uno de los objetivos de esta tesis, el cual es preservar la simplicidad que caracteriza a los modelos basados en AC. Cabe mencionar que es posible implementar todo el modelo, incluyendo reglas de cambio de carril y la dinámica vehicular, utilizando cómputo paralelo; sin embargo, esto quedó fuera del alcance de este trabajo, ya que sólo se utilizó cómputo de alto desempeño para las simulaciones.

Finalmente, aunque en este trabajo no se realizó, es posible considerar distintos tipos de vehículos con diferente capacidad de frenado máxima, M , tal que un vehículo más grande y lento (como un camión) requiera una mayor distancia de seguridad para desacelerar, sin necesidad de modificar el modelo. También es posible adaptar el modelo para su uso en los Sistemas de Vehículos Automatizados con pequeñas modificaciones. Sin embargo, en este trabajo no se realizó y se deja como trabajo futuro.

En general, los resultados macroscópicos de este modelo multicarril son prometedores porque éstos son muy similares a los encontrados en la literatura y las reglas aseguran un comportamiento realista desde el punto de vista microscópico.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo de tesis se propuso un nuevo modelo basado en autómatas celulares (AC) para el tráfico vehicular de dos carriles con vehículos heterogéneos, el cual extiende el modelo LAI de tráfico vehicular de un solo carril (Larraga, et.al., 2010). El modelo propuesto toma en cuenta políticas de espaciamiento de los conductores normales y prácticas de ingeniería de transporte para garantizar que el desempeño de cambio de carril de los vehículos a nivel microscópico esté más en línea con el movimiento vehicular en las carreteras reales. Como resultado, las reacciones de los conductores se modelan con base las normas viales de las carreteras mexicanas y en un análisis de seguridad que determinan la acción más apropiada que debe tomar un conductor. Así, el modelo introduce un nuevo conjunto de reglas simples para cambiar de carril a los vehículos, el cual toma en cuenta el espaciamiento y la velocidad relativa de los mismos. Además, el modelo considera dos tipos de vehículos, automóviles y camiones, los cuales tienen valores diferentes de longitud y velocidad máxima.

Los resultados de simulación para un sistema de dos carriles con condiciones de frontera periódica y reglas de cambio de cambio de carril asimétricas indican que el modelo es capaz de reproducir diversos fenómenos que se han observado en la realidad, tales como la inversión de uso de carril, la dependencia de la densidad de los cambios de carril y el comportamiento del flujo vehicular acorde al observado en carreteras de varios carriles.

El modelo propuesto tiene algunas aportaciones que lo hacen diferente de otros modelos existentes en la literatura. Un punto importante es que, tanto en las reglas de cambio de carril hacia la izquierda, como en las reglas de cambio hacia la derecha se incluyen distancias y velocidades relativas, tanto para el vehículo precedente como para el vehículo sucesor, lo cual no existe en los modelos de la literatura por simplicidad en los mismos. Además, contrario a todos los modelos de AC para el tráfico vehicular multicarril existentes en la literatura, el nuevo modelo propuesto en esta trabajo de tesis permite el paso de los camiones al carril de la más a la izquierda para conducir, sin que el flujo vehicular se domine totalmente por los vehículos lentos y se formen tapones vehiculares que pueden permanecer en el tiempo o durar un periodo de tiempo muy largo que se aleja del comportamiento observado en flujo vehicular real. Aún más, el modelo reduce ampliamente la frecuencia de cambios de carril llamados ping-pong, uno de los problemas que presentan la mayoría de los modelos basados en AC. Esta reducción es consecuencia de la formulación de las reglas y se puede observar en los resultados de simulación, a través de las gráficas de frecuencia de cambio de carril de tipo ping-pong.

De esta manera, las reglas de cambio de carril definidas para el nuevo modelo propuesto en esta tesis no sólo aseguran un comportamiento realista desde el punto de vista microscópico, tanto de los vehículos como de los conductores; sino que además corrige diversos problemas encontrados en los modelos basados en AC y a la vez reproduce diversos fenómenos empíricos.

Es importante enfatizar que el nuevo modelo propuesto en esta tesis, sólo incrementa en uno el número de parámetros en comparación con el modelo LAI de un solo carril, el cual extiende para el tráfico de varios carriles. Además, las reglas del modelo, tanto para actualizar las velocidades de los vehículos como para realizar los cambios de carril, se pueden aplicar en paralelo, con lo que el modelo preserva la simplicidad computacional del modelo LAI para el tráfico de un solo carril, que caracteriza a los modelos de AC.

Cabe mencionar que es posible implementar todo el modelo, incluyendo reglas de cambio de carril y la dinámica vehicular, utilizando cómputo paralelo; sin embargo, esto quedó fuera del alcance de este trabajo, ya que sólo se utilizó cómputo de alto desempeño para las simulaciones.

Por otra parte, con el modelo propuesto en este trabajo de tesis es posible considerar distintas capacidades de frenado máximas, M , acordes al tipo de vehículo (camiones, automóviles) sin necesidad de modificar el modelo, tal que un camión, por ejemplo, tiene una capacidad de frenado menor que un automóvil y por lo tanto, requiere una distancia de seguimiento mayor para desacelerar. Debido al uso de tablas de búsqueda para las distancias de seguimiento seguro, la complejidad computacional no se incrementa. Además, el modelo puede usarse para simular carreteras con más de dos carriles con las mismas reglas de cambio de carril. Sin embargo, en esta trabajo de tesis no se realizó.

Trabajo Futuro

Como trabajo futuro, se propone llevar a cabo un análisis más profundo de los estados del flujo sincronizados mediante un sistema multicarril con condiciones de frontera abierta y rampas de acceso, que permitan en conjunto determinar la presencia de patrones sincronizados específicos, que se han observado empíricamente en embotellamientos. Además, diseñar el modelo propuesto usando cómputo paralelo, que sirva como base de un simulador en línea futuro, particularmente para su uso en México. Así, como extender el modelo propuesto en este trabajo para su uso en Sistemas de Carreteras Automatizados (Automated Highway Systems, AHS).

Otro rubro en el que se puede trabajar a futuro es agregar modos de manejo alternativos a algunos de los conductores para observar en que grado afectan a todo el sistema. Algunos de estos modos de manejo pueden ser conductores agresivos al cambiar de carril, agresivos al acercarse demasiado al vehículo de enfrente, ebrios, *abuelitas*, conductores que se detienen continuamente, una combinación de ellos, etc. Estos comportamientos en general implican la capacidad del sistema para representar accidentes, lo cual no es complicado en lo absoluto. También habría que designar de manera inicial cierto porcentaje de estos conductores y aplicar reglas diferentes para cada comportamiento; por ejemplo las abuelitas arrancan lento, tienen una velocidad máxima lenta y tienen demasiada precaución hacia el frente; los ebrios pueden respetar las reglas *perfectas* con cierta probabilidad, pero también pueden realizar su movimiento arbitrariamente. En este sentido, la adecuación del modelo para hacerlo más rea-

lista es completamente posible, aunque necesariamente hace el modelo un poco más complejo al agregar algunas reglas y probabilidades.

Además, este modelo sienta las bases para la elaboración un simulador que permita experimentar fácilmente en diseños carreteros y urbanos existentes, en los cuales se desee mejorar el desempeño del flujo vehicular o crear nuevos diseños antes de la construcción de los mismos, de tal manera que se puedan probar varias configuraciones antes de realizar inversiones millonarias y contraproducentes para los ciudadanos. Ejemplos de esto son algunos casos de estudio como entender cuál es la política más adecuada de cambio de carril al llegar a una desviación carretera donde todos los vehículos tienen un objetivo de antemano, o entender cuál es el efecto de utilizar ciertos mecanismos de control en un cruce, tales como una glorieta, un paso a desnivel, etc. Un análisis que se realizó en la vida real con otro modelo de tráfico vehicular ([Larraga, 2004](#)) y que a futuro se puede realizar con el nuevo modelo de manera más realista, sin necesidad de modificarlo, es una simulación de la carretera México-Cuernavaca, donde se aclaran las causas de los congestionamientos producidos en esta carretera en los días de asueto y sus posibles soluciones. En dicha simulación se presentó un análisis microscópico e independiente para cada sentido de la carretera, la cual se modeló como un sistema abierto con rampas de entrada, rampas de salida y casetas de cobro. Cualquier otra autopista mexicana se podría modelar de manera similar para su análisis.

Apéndice A

Modificaciones al modelo LAI

Los modelos de AC existentes para el tráfico vehicular multicarril, como (Knospe, et.al., 2002; Lee, et.al., 2004; Pottmeier, 2007), prohíben el cambio de vehículos lentos al carril extremo izquierdo. La razón para hacer esto es que la introducción de diferentes tipos de vehículos tiene algunos inconvenientes para los modelos basados en AC de dos carriles: es posible que dos vehículos lentos que se mueven lado a lado en los dos carriles formen un *tapón vehicular*, (mejor conocido por el término inglés *plug*), el cual bloquea el tráfico vehicular detrás de ellos (Chowdhury, et.al., 1997; Knospe, et.al., 1999). Estos tapones vehiculares son muy estables en el régimen del flujo libre y su disolución está determinada por la fluctuación de velocidades. Como resultado, el tiempo de vida de estos tapones vehiculares es muy grande y el flujo es dominado por los vehículos lentos. La anticipación reduce la formación de tapones vehiculares considerablemente (Knospe, et.al., 1999), pero aún así se presentan en los modelos. Para evitar la formación de tapones vehiculares en la mayoría de los modelos, las camiones se inicializan a la derecha y no se les permite el cambio de carril.

En este modelo, se consideran distancias y velocidades relativas en la definición de las reglas de cambio de carril y de movimiento longitudinal y con ello se reduce, más no se elimina la formación y el tiempo de vida estos tapones vehiculares.

Por lo tanto, para las simulaciones fue necesario hacer una pequeña modificación al modelo LAI en las reglas S3a y S3b, debido a que en el modelo LAI no se perturba en forma aleatoria la velocidad de un vehículo (a través del parámetro R_s), cuando éste se conduce con su máxima velocidad; lo cual no altera los resultados del modelo LAI, porque éste considera vehículos homogéneos con la misma longitud y velocidad máxima. Sin embargo, para el modelo de dos carriles, con vehículos heterogéneos, si no se perturba a los vehículos que conducen a su máxima velocidad permitida, se forman tapones vehiculares que tardan mucho tiempo en deshacerse. Adicionalmente, en las simulaciones se consideró el valor de la probabilidad de desaceleración aleatoria R_s en función del tipo de vehículo. De tal manera que para las simulaciones se establecieron valores de 0.1 y 0.05 para los camiones y los automóviles, respectivamente, en lugar del valor de 0.01 en (Larraga, et.al., 2010).

Entonces, se realizaron cambios en las reglas S3a y S3b del modelo LAI, quedando de la siguiente manera:

S3a : aceleración. Si $d_n(t) \geq d_{acc_n}$ AND $v_n(t) < v_{max}$, la velocidad del vehículo n es incrementada aleatoriamente en Δv con probabilidad (R_a), i.e.,

$$v_n(t + 1) = \begin{cases} v_n(t) + \Delta v, & \text{si randf() } \leq (R_a) \\ v_n(t), & \text{en otro caso} \end{cases}$$

donde randf() $\in [0, 1]$ denota un número uniformemente aleatorio (específicamente para el vehículo n al tiempo t)

S3b : desaceleración aleatoria. Si $(d_{acc_n} > d_n(t) \geq d_{keep_n})$ OR $(d_n(t) \geq d_{acc_n}$ AND $v_n(t) = v_{max}$), la velocidad del vehículo n disminuye con probabilidad R_s , i.e.,

$$v_n(t + 1) = \begin{cases} \max(v_n(t) - \Delta v, 0), & \text{if randf() } \leq (R_s) \\ v_n(t), & \text{en otro caso} \end{cases}$$

De esta manera, el paso *S3b* ahora define el comportamiento en una situación que antes se definía en el paso *S3a* en vano, cuando $(d_n(t) \geq d_{acc_n}$ AND $v_n(t) = v_{max})$ y permite la desaceleración aleatoria en este caso.

Cabe mencionar que en la realidad los tapones vehiculares en las carreteras de México sí se forman, pero en condiciones normales, no se mantienen en el tiempo. El modelo propuesto con la modificación del modelo LAI y los valores del parámetro R_s no evita que se formen los tapones vehiculares, pero su duración se reduce considerablemente, aproximadamente a 10 s y no duran eternamente como sucede en los modelos de AC existentes cuando permiten el paso de los camiones al carril de más a la izquierda.

Para entender más claramente el beneficio de estas modificaciones, a continuación se muestra un fragmento de una simulación donde se aplican las mismas. En esta simulación, antes del paso de tiempo número 30 ya se había formado un tapón vehicular, pero en breve y debido a ambas modificaciones, comienza un proceso para deshacer este tapón vehicular.

```

Tiempo30
-----C9 9 9 9 -----C9 9 9 9 -----
-A8 8 - - - - -A9 9 - - - - -A9 9 - - - - -C9 9 9 9 -----C9 9 9 9 -
Tiempo31
-----A8 8 - - - - -C9 9 9 9 -----C9 9 9 9 -----
-A9 9 - - - - -A9 9 - - - - -A9 9 - - - - -C9 9 9 9 -----
Tiempo32
8 -----A9 9 - - - - -C9 9 9 9 -----C9 9 9 9 -----
-----A9 9 - - - - -A9 9 - - - - -A9 9 - - - - -C9 9 9 9 -----
Tiempo33
-----A9 9 - - - - -Aa a - - - - -C9 9 9 9 -----C8 8 8 8 -----
-----A9 9 - - - - -A9 9 - - - - -A9 9 - - - - -C9 9 9 9 -----
Tiempo34
a a -----Aa a - - - - -A9 9 - - - - -C8 8 8 8 -----C7 7 7 7 -----Aa a -----
-----C9 9 9 9 -----A9 9 - - - - -Aa a - - - - -C9 9 9 9 -----

```

El fragmento de simulación en cuestión se muestra con una secuencia de caracteres, que a su vez representa los dos carriles, en un fragmento del espacio y del tiempo, en particular los tiempos del 30 al 34. Las celdas se representan con un guión (-) si la celda está vacía o con un número hexadecimal que representa la velocidad del vehículo en cada una de las celdas que ocupa. Además, para clarificar esta representación, entre celda y celda existe un espacio en blanco o bien una letra que identifica el tipo de vehículo, C para camiones y A para automóviles, la cual se ubica en la defensa trasera de cada vehículo.

Se puede observar que desde antes de paso de tiempo número 30 había un tapón vehicular creado por un par de camiones a su máxima velocidad (9 celdas/ paso de tiempo), el cual no permitía pasar a algunos autos que podrían aumentar su velocidad si no fuera por este tapón vehicular. Esto ocurre sin mayor cambio al frente del convoy durante varios pasos de tiempo, pero gracias a la desaceleración aleatoria del camión que viajaba en el carril izquierdo en los pasos de tiempo 33 y 34, se comienza a crear un paso para los vehículos que seguían este par de camiones.

Así, se tienen las dos modificaciones, en primera instancia las modificaciones a los pasos S3a y S3b del modelo LAI y en segunda instancia, las probabilidades de desaceleración aleatoria diferentes para cada tipo de vehículo. Una vez realizadas estas dos adecuaciones, se procedió al ajuste de parámetros con reglas experimentales, como se describe en el apéndice **B** para llegar a la definición definitiva del modelo.

Apéndice B

Sintonización de los parámetros del modelo

En esta sección se describirán de manera general los pasos que se siguieron en el ajuste del modelo, para finalmente definir las reglas de cambio de carril descritas en la sección 4.2 y los parámetros más adecuados para las mismas.

Se considera que es muy importante una explicación a este respecto debido a que gran parte del trabajo de este proyecto de tesis consistió en la sintonización de las reglas y parámetros para definir un modelo realista de tráfico vehicular. Además, la experiencia adquirida en la sintonización resulta fundamental para desarrollar una nueva extensión de este proyecto de investigación.

En esta sección se tratarán dos temas: ajuste de parámetros con reglas experimentales y ajuste de parámetros con las reglas finales.

B.1. Ajuste de parámetros con reglas experimentales

Una parte importante de la sintonización consistió en definir las reglas de cambio de carril para el nuevo modelo, lo cual se llevó a cabo mediante la prueba de varias reglas y parámetros que parecían razonables en su momento para lograr los objetivos de este trabajo de tesis.

Las reglas de cambio de carril, así como sus variables y parámetros, ya han sido descritas en la sección 4.2. Con base en dicha definición, a continuación la explicación es mucho más concreta.

Desde el primer momento, la regla incentiva de cambio de carril hacia la izquierda, al igual que la regla general de seguridad, se diseñaron muy bien y por lo tanto se mantuvieron muy estables en todo el proceso de ajuste del modelo, a pesar de las continuas revisiones. Al parecer, estas reglas presentan muy buenos resultados y modelan un comportamiento realista de los conductores. Por el contrario, la regla incentiva para el cambio hacia el carril derecho resultó más complicada de definir, ya que en muchos de los experimentos no se lograban buenos resultados a pesar de que la regla parecía adecuada en un principio.

En particular se trabajó con 5 reglas incentivas de cambio de carril hacia la derecha en calidad de experimentales y una de ellas resultó ser la mejor. A continuación se numeran las 4 reglas que no fueron seleccionadas y el trabajo que se realizó con ellas de manera muy

general, para explicar la regla seleccionada en la siguiente subsección.

Criterio incentivo .

- 1.-Si $[(\text{tipo}=\text{camión}) \text{ y } (gap_{n,f} \geq d_{keep}(v_n, v_f)) \text{ y } (gap_{n,r,f} \geq d_{keep}(v_n, v_r, f))] \text{ o } [(\text{tipo}=\text{auto}) \text{ y } (gap_{n,r,f} \geq d_{acc}(v_n, v_r, f))]$
- 2.-Si $[(\text{tipo}=\text{camión}) \text{ y } (gap_{n,r,f} \geq d_{keep}(v_n, v_r, f))] \text{ o } [(\text{tipo}=\text{auto}) \text{ y } (gap_{n,r,f} \geq d_{acc}(v_n, v_r, f))]$
- 3.-Si $gap_{n,r,f} \geq d_{keep}(v_n, v_r, f)$
- 4.-Si $gap_{n,r,f} \geq d_{acc}(v_n, v_r, f)$

Estas cuatro reglas, con las cuales se realizó parte de la sintonización del modelo, son similares a las definitivas que se explicaron en la sección 4.2, pero cada una de ellas tiene características y comportamientos diferentes en la simulación, como es natural. Además de las reglas, un parámetro muy importante para la simulación del modelo propuesto son las probabilidades de cambio de carril p_{change} , las cuales pueden cambiar completamente el comportamiento de los vehículos en el sistema. En la tabla B.1 se presentan las probabilidades de cambio que se analizaron con más detalle con cada una de las reglas experimentales. Cabe mencionar que cada uno de los experimentos que aparecen en la tabla tomó entre 2 y 15 horas de ejecución, dependiendo de las herramientas de cómputo de alto rendimiento que estuvieron disponibles en cada ejecución.

Algunas otras reglas y probabilidades también se consideraron, pero en un análisis previo y más pequeño, se observaron pocas probabilidades de éxito con estas combinaciones, a diferencia de las que se analizaron con más detalle, las cuales tenían mejores probabilidades de reproducir el flujo de tráfico vehicular de manera más realista.

En la tabla B.1 se puede observar que se benefició a la exploración de probabilidades con la regla 4, debido a que casi cualquier combinación de probabilidades de cambio puede reproducir los fenómenos del tráfico vehicular de manera adecuada, a diferencia de las reglas 1 y 2, las cuales promueven en gran medida que los camiones sólo circulen por el carril derecho y la regla 3, en la cual en varias de sus combinaciones no reproducen la inversión de uso de carril, fenómeno del cual se habló en la sección 4.1.

Como se mencionó, la regla 4 logra reproducir las observaciones empíricas del tráfico vehicular (ver sección 4.1), en particular con la combinación de probabilidades marcada con un asterisco (*). Sin embargo, la regla 4 presenta un problema inherente al comportamiento microscópico que representa, es decir que no es una regla realista para hacer un cambio de carril a la derecha. La regla 4 indica que un cambio de carril sólo ocurre cuando un automovilista que viaja por el carril izquierdo observa en el carril derecho un espacio igual o más grande que el que necesita para acelerar; sin embargo, esto es muy conservador, ya que en realidad el cambio ocurre generalmente con un espacio suficiente para mantener su velocidad, de tal manera que el conductor sólo respeta las reglas de manejo sin obtener ningún beneficio en cuanto a velocidad, pero procurando al mismo tiempo no perder el beneficio de velocidad que buscó algunos pasos de tiempo atrás, al cambiar al carril izquierdo.

Como resultado de estas observaciones, posteriormente se buscó una nueva regla incentiva que fundamentalmente tuviera un comportamiento microscópico más acorde a la realidad y

Regla	Probabilidad de cambio a la izquierda para camiones	Probabilidad de cambio a la izquierda para autos	Probabilidad de cambio a la derecha para camiones	Probabilidad de cambio a la derecha para autos
1	0.1	1	0.8	0.2
1	0.1	1	0.8	0.4
1	0.1	1	1	0.2
1	0.1	1	1	0.4
2	0.1	1	0.8	0.2
2	0.1	1	0.8	0.4
2	0.1	1	1	0.2
2	0.1	1	1	0.4
3	0.1	1	0.8	0.2
3	0.1	1	0.8	0.4
3	0.1	1	1	0.2
3	0.1	1	1	0.4
4	0.1	1	0.8	0.2
4	0.2	1	0.8	0.2
4	0.3	1	0.8	0.2
4*	0.4	1	0.8	0.2
4	0.5	1	0.8	0.2
4	0.1	1	0.8	0.4
4	0.2	1	0.8	0.4
4	0.3	1	0.8	0.4
4	0.4	1	0.8	0.4
4	0.5	1	0.8	0.4
4	0.1	1	1	0.2
4	0.2	1	1	0.2
4	0.3	1	1	0.2
4	0.4	1	1	0.2
4	0.5	1	1	0.2
4	0.1	1	1	0.4
4	0.2	1	1	0.4
4	0.3	1	1	0.4
4	0.4	1	1	0.4

Tabla B.1: Reglas y probabilidades de cambio experimentales

además reprodujera las observaciones empíricas del tráfico vehicular (ver sección 4.1). Dicho proceso se describe en la siguiente sección.

B.2. Ajuste de parámetros con las reglas definitivas

Después del estudio de las reglas experimentales, con lo que se concluyó que se debía utilizar una regla incentiva para el cambio de carril a la derecha más acorde a la realidad, se eligió precisamente la misma regla incentiva que se mencionó en la sección 4.2, la cual se menciona a continuación nuevamente y para darle continuidad a la numeración de reglas experimentales, también será nombrada como regla 5.

Criterio incentivo .

(cid1) Si $[(gap_{n,f} \geq d_{keep}(v_n, v_f)]$ y $[(gap_{n,r,f} \geq d_{keep}(v_n, v_{r,f})]$

En la definición del modelo se trata de seguir las normas viales del tránsito vehicular en las carreteras mexicanas, que indican que el carril derecho debe ser preferido para conducir y que el rebase vehicular por la derecha se prohíbe. En la definición del nuevo modelo se considera la prohibición de rebase, en el sentido que un vehículo que se encuentra en el carril izquierdo no debe cambiarse al carril derecho con la finalidad de adelantar a su vehículo precedente, en un instante de tiempo determinado. Por lo tanto, los vehículos sobre el carril izquierdo regresan al carril derecho sólo si la distancia de seguimiento seguro de un vehículo con respecto al vehículo que le antecede, tanto en el carril izquierdo como en el carril derecho, es suficiente para antener su velocidad actual; lo cual se modela a través del criterio (cid1) de la regla de cambio. Además, como suele ocurrir en la realidad, un conductor no intenta regresar al carril derecho si sus condiciones para conducir empeoran.

En la definición de (cid1) se toman en cuenta las distancias de seguimiento seguro del modelo LAI, descritas en las ecuaciones 3.7, 3.8 y 3.9 del capítulo previo; es decir, se introducen distancias y velocidades relativas a los vehículos. En particular, debido a que la definición de la distancia de seguimiento seguro d_{keep} considera el peor escenario posible, las reglas de cambio garantiza que el rebase no ocurrirá, al menos en el instante de tiempo actual.

Como se mencionó, una vez que los cambios han satisfecho las condiciones incentivas y de seguridad, se aplica la probabilidad de cambio p_{change} según el carril destino y el tipo de vehículo que haya sido definida. Precisamente para definir estas probabilidades, se realizó un proceso de sintonización al igual que con las reglas experimentales. En la tabla B.2 se presentan cronológicamente las probabilidades de cambio que se analizaron con las reglas definitivas del nuevo modelo, eligiendo las mejores combinaciones (marcadas con un asterisco *) por etapas. Cabe mencionar que cada uno de los experimentos que aparecen en la tabla tomó entre 2 y 15 horas de ejecución, dependiendo de las herramientas de cómputo de alto rendimiento que estuvieron disponibles en cada ejecución.

La primera etapa consistió en probar las mismas combinaciones básicas de las reglas experimentales. La razón de probar estas probabilidades en primera instancia, es que en un análisis previo a simulación, parecían corresponder con la realidad y en el peor de los casos podían

Regla	Probabilidad de cambio a la izquierda para camiones	Probabilidad de cambio a la izquierda para autos	Probabilidad de cambio a la derecha para camiones	Probabilidad de cambio a la derecha para autos
5* (etapa 1)	0.1	1	0.8	0.2
5 (etapa 1)	0.1	1	0.8	0.4
5 (etapa 1)	0.1	1	1	0.2
5 (etapa 1)	0.1	1	1	0.4
5 (etapa 2)	0.2	1	0.8	0.2
5 (etapa 2)	0.4	1	0.8	0.2
5 (etapa 2)	0.5	1	0.8	0.2
5 (etapa 2)	0.7	1	0.8	0.2
5* (etapa 2)	1	1	0.8	0.2
5* (etapa 3)	1	1	0.8	0.1
5 (etapa 3)	1	1	0.8	0.3
5 (etapa 3)	1	1	0.8	0.5
5 (etapa 3)	1	1	0.8	0.6
5 (etapa 3)	1	1	0.8	0.7
5 (etapa 4)	1	1	0.2	0.1
5 (etapa 4)	1	1	0.4	0.1
5 (etapa 4)	1	1	0.6	0.1

Tabla B.2: Probabilidades de cambio con los que se experimentó para aplicarlos a las reglas definitivas del nuevo modelo

ayudar a encontrar un mejor curso de acción. Al finalizar la primera etapa se concluyó que sólo 2 de los 4 resultados de las combinaciones probadas correspondían aproximadamente con los hechos empíricos (ver sección 4.1), mientras que los otros 2 tenían diferencias importantes, sobre todo en lo que respecta en la inversión de uso de carril. Se eligió la mejor combinación de probabilidades para continuar ajustándola en las etapas restantes.

Al finalizar la segunda etapa se concluyó que la probabilidad de las camiones para cambiar a la izquierda es poco relevante para los resultados generales de la simulación, además de que las reglas por sí mismas logran modelar bien este comportamiento, de tal manera que esta probabilidad se considera completa o igual a uno. Al finalizar la tercera etapa se concluyó que la probabilidad de los autos para cambiar a la derecha es muy relevante para los resultados generales de la simulación, de manera que se buscó un el valor más adecuado y el elegido fue de 0.1. Al finalizar la cuarta etapa se concluyó que la probabilidad de los camiones para cambiar a la derecha es medianamente relevante para los resultados generales de la simulación, de manera que se buscó el mejor valor y el elegido fue de 0.8 (curiosamente permaneció la mejor combinación de la etapa 3).

El valor del parámetro de probabilidad de cambio p_{change} se estableció a 1.0 para el cambio del carril derecho al izquierdo, sin importar el tipo de vehículo; mientras que para el cambio del carril izquierdo al derecho, toma los valores de 0.8 y 0.1 para los camiones y los automóviles, respectivamente. Como se puede notar, para el cambio de carril hacia la izquierda no existe restricción y esto se debe a que las reglas de cambio en sí mismas son suficientes para simular el desempeño de cambio de carril semejante a como ocurre en la realidad (como ya se explicó antes). Sin embargo, como puede notarse para el cambio de carril a la derecha, la probabilidad de cambio de un camión es mucho más alta que la de un automóvil; la razón es con ello se busca de alguna representar el hecho de que en condiciones normales un camión rebasa e inmediatamente busca regresar al carril derecho mientras que un automóvil lo hace menos frecuentemente. Además, de los resultados de simulación, se encontró que con estos valores se reproducen bien diversos fenómenos encontrados empíricamente.

Finalmente, al encontrar estas reglas de cambio de carril y las probabilidades de cambio, que en conjunto son acordes a la realidad por sí mismos y además en la simulación ofrecen resultados que corresponden con los hechos empíricos descritos en la literatura (ver sección 4.1), terminó el proceso de sintonización del modelo propuesto. Los valores finales de todos los parámetros y los resultados de las simulaciones que utilizan el conjunto de reglas de este nuevo modelo, también se pueden encontrar en las secciones 4.2 y 4.3.

Apéndice C

Estabilidad del sistema

Para realizar el análisis del modelo, el comportamiento de éste debe ser estable y para ello es necesario ejecutar primero las simulaciones durante un tiempo de transición, para posteriormente tomar en cuenta únicamente los resultados del tiempo estable al realizar las mediciones. Al explicar los resultados del sistema, se consideró un tiempo de transición de 65,000 pasos de tiempo y 2,500 pasos de tiempo estable. Después de algunos experimentos con el modelo propuesto, se encontró que este era un tiempo de transición razonable.

Los experimentos para encontrar el tiempo de transición consistieron en el análisis de la velocidad de 20 experimentos con los mismos parámetros iniciales, pero diferentes posiciones iniciales de los vehículos, para observar el momento en que la velocidad se estabilizara. Se experimentó en todas las ocupancias y aquí se presenta una de ellas, 26%, la cual es interesante para este tipo de análisis por ser susceptible a la metaestabilidad, es decir sensibilidad a condiciones iniciales ([Schadschneider, et. al., 2011](#)). Esto se puede observar en las figuras [C.1](#), [C.2](#) y [C.3](#), en las cuales cada una de las líneas representa la velocidad promedio de uno de los 20 experimentos en el tiempo, excepto la línea negra que representa su promedio. En la figura [C.1](#) se representa la velocidad promedio de ambos carriles, en la figura [C.2](#) se representa la velocidad promedio del carril izquierdo y en la figura [C.3](#) se representa la velocidad promedio del carril derecho.

Se puede observar que los primeros pasos de tiempo, cada uno de los experimentos se comporta de manera muy diferente y el promedio es muy cambiante. Cerca de los 65,000 pasos de tiempo aún puede ocurrir que los experimentos se comporten de manera diferente debido a la metaestabilidad, pero a diferencia de los primeros pasos de tiempo, todos los experimentos tienen una velocidad estable y por lo tanto el promedio de los 20 experimentos también es estable, con lo cual ya se pueden realizar mediciones promediadas de manera confiable. Con los resultados de estabilidad en todas las ocupancias, similares a los que aquí se presentan, se establecieron los valores de un tiempo de transición de 65,000 pasos de tiempo y 2,500 pasos de tiempo estable para realizar mediciones.

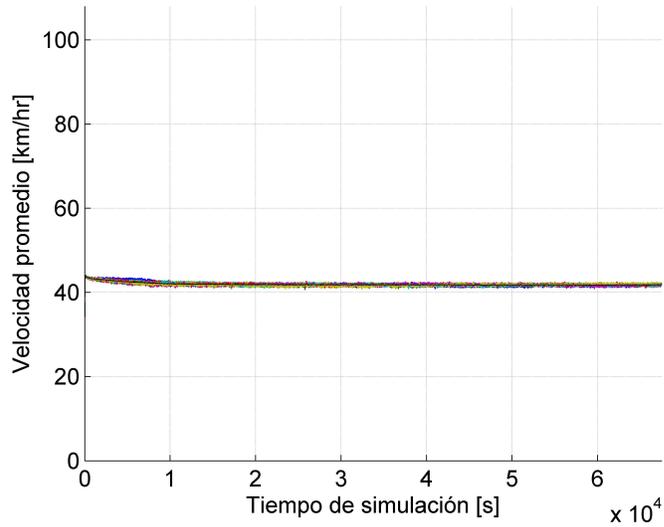


Figura C.1: Diagrama de la velocidad promedio del sistema en el tiempo, para cualquier tipo de vehículo, con 26 por ciento de ocupancia. En este diagrama se puede comparar el comportamiento en diferentes experimentos. El promedio de todos ellos es la línea negra al centro de las demás

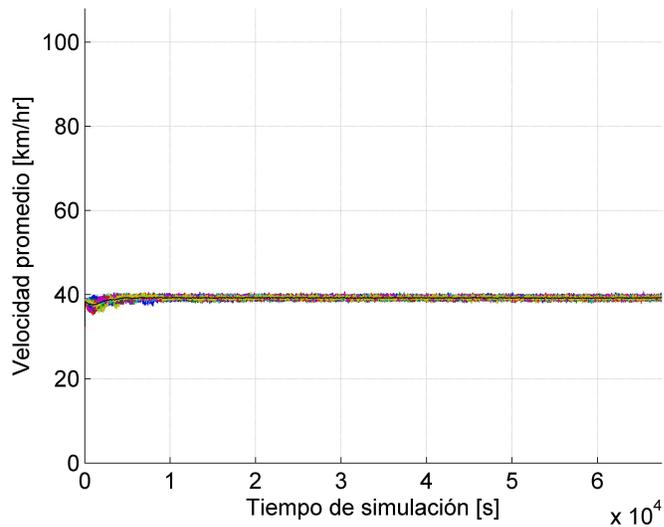


Figura C.2: Diagrama de la velocidad promedio del sistema en carril izquierdo, para cualquier tipo de vehículo, con 26 por ciento de ocupancia. En este diagrama se puede comparar el comportamiento en diferentes experimentos. El promedio de todos ellos es la línea negra al centro de las demás

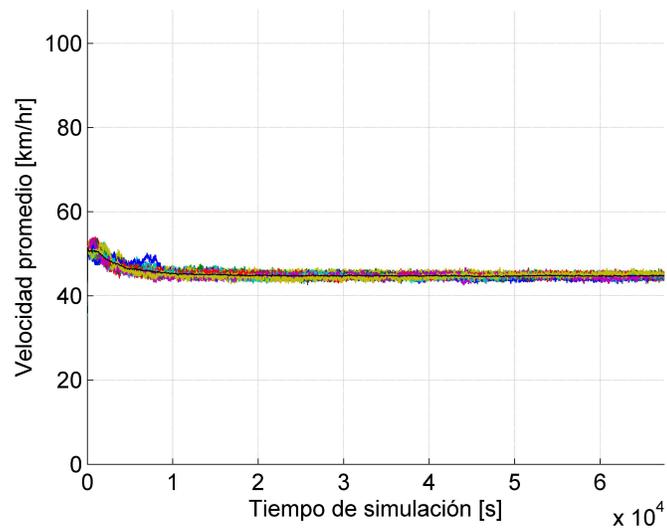


Figura C.3: Diagrama de la velocidad promedio del carril derecho, para cualquier tipo de vehículo, con 26 por ciento de ocupancia. En este diagrama se puede comparar el comportamiento en diferentes experimentos. El promedio de todos ellos es la línea negra al centro de las demás

Bibliografía

- Alvarez, L., Horowitz, R. (1999) Veh. Syst. Dyn. 32, 23–56.
- Baldwin, J., Shelah, S., (2000), *On the classifiability of cellular automata*, Theoretical Computer Science, 230, 117–129.
- Bando, M., et.al., (1994), *Structure stability on congestion in traffic dynamics*, Jpn. J. Ind. Appl. Math. II, 203.
- Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A. and Sugiyama, Y. (1995), *Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation*, Physical Review E, volume 51, pages 1035–1042.
- R. Barlovic, L. Santen, A. Schadschneider and M. Schreckenberg (1998), *Metastable states in cellular automata for traffic flow*, Eur. Phys. Journal B, Theoretische Physik/FB 10, Springer Berlin / Heidelberg, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, 47048 Duisburg, Germany DE, volume 5 number 4 pages 793–800
- Berlekamp, E., Conway, J., Guy, R., (1982), *Winning ways for your mathematical plays*, 2, 817–850, Academic Press, New York.
- Brackstone, M., McDonald, M. (1999), *Car-following: a historical review*, Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, volume 2, number 4, pages 181 - 196
- Broucke, M., Varaiya, P., (1996), *A theory of traffic flow in automated highway systems*, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 4, Issue 4, 181–210.
- Burks, A., (1970), *Essays on Cellular Automata*, University of Illinois Press, Urbana, Illinois.
- Carbaugh, J.; Godbole, D.; Sengupta, R. (1997), *Tools for safety analysis of vehicle automation systems*, Proceedings of the 1997 American Control Conference, vol.3, 2041 - 2045.
- Cattaneo, G., Fornenti, E., Margara, L., Mauri, G., (1999), *On the dynamical behavior of chaotic cellular automata*, Theoretical Computer Science, 217, 31–51.
- Chang-Fu, T., (2007), *Extended speed gradient model for traffic flow on two-lane freeways*, Chinese Phys. 16 1570
- Chowdhury, D., Wolf, D.E., Schreckenberg, M. (1997), *Particle hopping models for two-lane traffic with two kinds of vehicles: Effects of lane-changing rules*, Physica A 235, 417.

-
- Chowdhury, D., Santen, L., Schadschneider, A. (2000), *Statistical physics of vehicular traffic and some related systems* Phys. Rep., volume 329: pages 199-329.
- Chowdhury, D., Santen, L., Schadschneider, A., (2000), *Simulation of vehicular traffic: a statistical physics perspective*, Computers Science and Engineering, Computer Simulation, 2(5), 80-87
- Chowdhury, D., Nishinari, K., Schadschneider, A., (2005), *Phys. Life Rev.* 2, 318
- Chowdhury, D., Nishinari, K., Santen, L., Schadschneider, A. (2008) *Stochastic Transport in Complex Systems: From Molecules to Vehicles*, Elsevier.
- Corning, P. A. (2003), *Nature's Magic: Synergy in Evolution and the Fate of Humankind*, Cambridge University Press.
- Center for Parallel Computing, (1995) *Cooperative Research Project "Verkehrsverbund NRW"* c/o University of Cologne, Germany. See <http://www.zpr.uni-koeln.de/GroupBachem/VERKEHR.PG>
- Cremer, M., Ludwig, J., (1986), *A fast simulation model for traffic flow on basis of boolean operations*, Mathematics and Computers in Simulation, 28, 297-303
- Culik, K., II, Hurd, L., Yu, S., (1990), *Computation theoretic aspects of cellular automata*, Physica D, 45, 357-378.
- Ermentrout, G., Edelstein-Keshet, L., (1993), *Cellular automata approaches to biological modeling*, Journal of Theoretical Biology, 160, 97-133.
- Fredkin, E., Toffoli, T., (1982), *Conservative Logic*, International Journal of Theoretical Physics, 21, 219-253.
- Frisch, U., Hasslacher, B., Pomeau, Y., (1986), *Lattice-gas automata for the Navier-Stokes equation*, Physical Review Letters, 56, 1505-1508.
- M. Fukui and Y. Ishibashi (1996), *Traffic flow in 1D cellular automaton model including cars moving with high speed*, J. Phys. Soc. Jpn. volume 65 number 6 pages 1868-1870.
- Gang-Len, Ch., Yang-Ming, K. (1991), *Trans. Res. A* 25, 375.
- Xin-Gang Li, et. al. (2006) *A realistic two-lane cellular automata traffic model considering aggressive lane-changing behavior of fast vehicle*, Physica A 367 479-486
- Gardner, M., (1970), *The fantastic combinations of Jhon Conway's new solitaire game life*, Scientific American, 222, 120-123.
- Gardner, M., (1971), *On cellular automata, self-reproduction, the Garden of Eden and the game life*, Scientific American, 224, 112-117.

- Gartner, N., Mahmassani, H., Messer, C., Lieu, H., Cunard R., Rathy A., (1987), *Traffic Flow Theory: A State-of-the-Art-Report*, monograph, published by Transportation Research Board Committee on Traffic Flow Theory and Characteristic.
- Gerlough, D.L., (1956), in proceedings of the 35th Annual Meeting edited by Burggrat, F. and Ward, E.M., Highway Research Board, Washington, D.C., 543
- Gershenson, C. (2005), *Self-organizing traffic lights*, Complex Systems 16 (1): 29–53.
- Gershenson, C. (2007), *Design and Control of Self-organizing Systems*, CopIt ArXives.
- P.S., Gipps. (1986), *A model for the structure of lane changing decisions*, Transportation Research B, 20B(5):403-414.
- Gipps, P.G. (1981), *A behavioural car-following model for computer simulation*, Transportation Research B, Volume 15, Issue 2, Pages 105-111.
- Godbole, D. N. and Lygeros, J. (1994), *Longitudinal control of the lead car of platoon*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, volume 43, number 4, pages 1125–1135.
- Gutowitz Howard (1991), *Cellular Automata, Theory and Experiment*, MIT Press.
- Hall, F.L., Allen, B.J., Gunter, M.A., (1986), Transportation Research A 20, 197
- Hall, F.L., Lam, T.N. (1988) Trans. Res. A 22, 45
- Hämäläinen Arto (2006), *Studies of traffic situations using cellular automata*, Doctor Dissertation, Helsinki University of Technology.
- D. Helbing, et.al. (1998), *Coherent moving states in highway traffic*, Nature, 396: 738-740.
- D. Helbing and M. Schreckenberg (1999), *Cellular automata simulating experimental properties of traffic flow*, Phys. Rev. E, American Physical Society, volume 59 number 3 pages R2505-R2508.
- Helbing, D., Hennecke, A., Treiber, M., (1999a), *Phase diagram of traffic states in the presence of inhomogeneities*, Physical Review Letters 82 (21), 4360-4363.
- Helbing, D. (2001), *Traffic and related self-driven many-particle systems*, Rev. Mod. Phys., American Physical Society, 73-4:1067.
- Helbing, D., Treiber, M. (2002a) *Critical discussion of synchronized flow* Cooperative Transportation Dynamics 1, 2.1-2.24 (Internet journal).
- Hernandez Encinas, L., et. al., (2002), *Aplicaciones de los autómatas celulares a la generación de bits*, Bol. Soc. Esp. Mat. Apl. no. 21, 65-87.
- Heylighen, F. and Campbell, D. T. (1995), *Selection of organization at the social level: Obstacles and facilitators of metasystem transitions*, World Futures: the Journal of General Evolution 45: 181–212.

-
- Hoogendoorn, et. al., (2001), *State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering June 1, 2001 vol. 215 no. 4 283-303
- C.C. Hsu, Z.S. Lin, Y.C. Chiou, L.W. Lan (2007), J. EASTS 7 2246
- R. Jiang, et.al. (2001), *Full velocity difference model for a car-following theory*, Phys. Rev. E 64, 017101.
- R. Jiang and Q.S. Wu (2005), *First order phase transition from free flow to synchronized flow in a cellular automata model*, School of Engineering Science, University of Science and Technology of China Hefei 230026 P.R. China, Springer Berlin / Heidelberg, Eur. Phys. J. B volume 46 number 4 pages 581-584.
- Kerner, B.S., Rehborn, H. (1996), Phys. Rev. E 52:R1297.
- B.S. Kerner, S.L. Klenov and D.E. Wolf (2002), *Cellular automata approach to three-phase traffic theory*, J. Phys. A volume 35 number 47 pages 9971–10014.
- B.S. Kerner (2002a), *Empirical features of congested patterns at highway bottlenecks*, Transportation Research Record 1802, 145-154.
- Kerner, B.S., Klenov, S.L. (2002b), *A microscopic model for phase transitions in traffic flow*, Journal of Physics A 35 (3) L31-L43.
- Kerner, B.S. (2004) *The Physics of Traffic*, Springer.
- Kerner, B.S. (2005), *Microscopic three-phase traffic theory and its applications for freeway traffic control* In: Mahmassani, H.S. (Ed.), Proceedings of the 16th International Symposium on Transportation and Traffic Theory. Elsevier, Amsterdam, pp. 181–203.
- Knospe, W., Santen, L., Schadschneider, A., Schreckenberg, M. (1999), *Disorder effects in cellular automata for two lane traffic*, Physica A, 265: 614-633.
- Knospe, W., Santen, L., Schadschneider, A., Schreckenberg, M. (2000), *Towards a realistic microscopic description of highway traffic*, J. Phys. A, volume 33 number 48 pages L477-L485.
- W. Knospe et. al. (2002), *A realistic two-lane traffic model for highway traffic*. J. Phys. A: Math. Gen. 35 3369 doi: 10.1088/0305-4470/35/15/302
- Knospe, W., Santen, L., Schadschneider, A., Schreckenberg, M. (2004), *Empirical test for cellular automaton models*, Phys. Rev. E 70, 016115.
- Koshi, M., Iwasaki, M., Ohkura, I. (1983), *Overview on vehicular flow characteristics*, Proc. 8th International Symposium on Transportation and Traffic Theory (Toronto), University of Toronto Press, 1983, pp. 403–426.

- S. Krauss, P. Wagner (1997), *Metastable states in a microscopic model of traffic flow*, *Phy. Rev. E* 55 5597
- L. W. Lan, Y.C. Chiou, Z. S. Lin, C.C. Hsu, *Physica A*, 388-18 (2009) 3917-3930
- M.E. Lárraga (2001) *Un autómata celular probabilista para la simulación del tránsito de automóviles automatizados*, Tesis de maestría.
- M.E. Lárraga, J.A. del Rio, A. Schadschneider (2004) *New kind of phase separation in a CA traffic model with anticipation*, *J.Phys. A* volume 37 pages 3769-3782
- M.E.Lárraga,(2004), *Un modelo de autómatas celulares para el tránsito vehicular en carreteras*, Tesis doctoral.
- M.E. Lárraga, J. A. del Rio, and L. Alvarez (2005), *Cellular automata for one-lane traffic flow modeling*, *Transp. Res. C*, volume 13 number 1 pages 63-74.
- M.E. Larraga, L. Alvarez-Icaza (2010) *Cellular automaton model for traffic flow based on safe driving policies and human reactions*, *Physica A*, volume 389, number 23, pages 5425–5438, doi:10.1016/j.physa.2010.08.020.
- Lárraga, M.E., Alvarez-Icaza, L. (2010), *Journal of Cellular Automata*, 2010. Vol 5, Issue 6, pp. 421-429
- M.E. Lárraga, (2008) *Modelación y simulación del tráfico vehicular como medio para disminuir los congestionamientos vehiculares*, *Ingeniería Civil, CICM*, Núm. 474 AÑO LVI-II, 48-51.
- M.E. Lárraga,(2010), *Aplicación de autómatas celulares para describir el tráfico vehicular con restricciones de manejo y vehiculares reales*, Proyecto de Investigación.
- H.K. Lee, R. Barlovic, M. Schreckenberg, D. Kim (2004), *Mechanical Restriction versus Human Overreaction Triggering Congested Traffic States*, *Phys. Rev. Lett.* 92 p. 238702
- Leutzbach, W., Busch, F. (1984), *Spurwechselforgänge auf dreispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen*, Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe (en Alemán).
- X.B. Li, Q.S. Wu and R. Jiang (2001), *Cellular automaton model considering the velocity effect of a car on the successive car.*, *Phys. Rev. E* volume 64, p. 066128-1–066128-4.
- Lighthill M.J., et.al., (1955), *On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads*, *Proc. R. Soc. Lond. A* 229 317.
- Maerivoet,S.,De Moor,B.,(2005), *Cellular automata models of road traffic*,*Phys.Rep.* 419,1-64.
- Maerivoet,S. (2006). *Modelling traffic on motorways: state of the art, numerical data analysis and dynamic traffic assignment Dissertation.*
- Maes, P. (1994), *Modeling adaptive autonomous agents*, *Artificial Life* 1: 135–162.

-
- Margara, L.,(1995), *Cellular Automata and Chaos*, Ph.D. Thesis.
- Michod, R. E. (2003), Cooperation and conflict mediation during the origin of multicellularity. In *Genetic and Cultural Evolution of Cooperation*, P. Hammerstein, (Ed.). MIT Press, Cambridge, MA, Chapter 16, pp. 261–307.
- K. Nagel, M. Schreckenberg (1992), *A cellular automaton model for freeway traffic*, J. Physique I 2, 2221-2229
- Nagel, K., (1996), *Particle hopping models and Traffic flow theory*, Physical Review E., 53, 4655-4672.
- Nagel, K., Wolf, DE., Wgner, P., Simon, P. (1998) *Two-lane traffic rules for cellular automata: A systematic approach* Phys. Rev. E, volume 58(2), pages 1425-1437.
- Nagatani, T. (1993) *Self-organization and phase transition in traffic flow model for a two lane roadway* Journal of Physics A: Mathematical and General, volume 26: page 781.
- Nagatani, T. (1994), *Traffic jam and shock formation in stochastic traffic-flow model of a two-lane roadway* Journal of the Physical Society of Japan, volume 63:page 52.
- Nagatani, T. (1996), *T. Kinetics of Segregation in a Two-lane Highway Traffic Flow*,J.Phys. A 29, 6531-6542.
- Von Neumann, (1966), *Theory of Self Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Illinois. Edited and completed by A.W. Burks
- Newell G.F. (2002) *Memoirs on highway traffic flow theory in the 1950's* Oper. Res. 50 , 173.
- Paveri-Fontana, S.L. (1975), *On Boltzmann-like treatments for traffic flow: a critical review of the basic model and an alternative proposal for dilute traffic analysis*, Trans. Res. 9, 225.
- Payne, H.J., (1971), *Models of freeway traffic and control*, In: Mathematical Models of Public Systems, Simulation Council Proceedings, pp. 51-61.
- Payne, H.J., (1979), *A critical review of a macroscopic freeway model*, In: Engineering Foundation Conference on Research Directions in Computer Control of Urban Traffic Systems, pp. 251-265.
- Perrier,J.-Y.,Sipper,M.,Zahnd,J.,(1996),*Toward a viable, self-reproducing universal computer*, Physica D., 97, 335-352.
- Pipes, L.A.,(1953),*An operational analysis of traffic dynamics*, J. Appl. Phys. 24, 274.
- Pottmeier.A. (2007), *Realistic Cellular Automaton Model for Synchronized Two-Lane Traffic*. Dissertation.
- Prigogine.I.,Andrews,F.C. (1960), *A Boltzmann-like approach for traffic flow*, Oper. Res. 8, 789.

- Prigogine, I., Herman, R. (1971), *Kinetic Theory of Vehicular Traffic*, American Elsevier, New York, 978-0444000828.
- Rickert, et. al., (1996), *Two lane traffic simulations using cellular automata*, *Physica A* 231 (1996) 534-550.
- del Río, J.A., Vázquez, F., Sánchez, P., (1988) *On the states of thermodynamic equilibrium*, *Revista Mexicana de la Física*, 34, 670
- del Río, J.A., Lárraga, M.E. (2005), American Institute of Physics. Proceeding Conference Statistical Physics and beyond: 2nd Mexican Meeting on Mathematical and experimental physics, Vol. 757, Issue 1, pp. 190-199
- J.A. del Río, M.E. Lárraga (2007) *Transient situations in traffic flow: Modelling the Mexico City Cuernavaca Highway*
- Rothery, RW. (1992) *Car following models*. In: Gartner N, Messer CJ, Rathi AK (eds) *Traffic Flow Theory*. Transportation Research Board, Special Report 165.
- Schadschneider, A., Pöschel, T., Kühne, R., Schreckenberg, M., Wolf, (2007), *Traffic and granular flow '05*, Springer.
- Schadschneider, A., et. al., (2011), *Stochastic transport in complex systems*, Elsevier, Great Britain.
- Schmittmann, B., et. al., (1995), *Statistical Mechanics of Driven Diffusive Systems*, In: Domb, C., Lebowitz, J.I. (eds.), *Phase Transitions and Critical Phenomena*, vol. 17. Academic Press, London.
- Schweitzer, F. (2003), *Brownian Agents and Active Particles*, *Collective Dynamics in the Natural and Social Sciences*. Springer Series in Synergetics. Springer, Berlin.
- Schönhof, M., Helbing, D. (2007), *Empirical features of congested traffic states and their implications for traffic modeling* *Transportation Science* 41 (2), 135–166.
- Schönhof, M., Helbing, D. (2009), *Criticism of three-phase traffic theory*, *Transportation Research Part B* 43, 784-797.
- Seck Tuoh Mora Juan Carlos (1997), *Autómatas Celulares Lineales Reversibles*, Tesis, <http://delta.cs.cinvestav.mx/mcintosh/oldweb/tesis/seck/tesis.html>
- Simon, P., Gutowitz, H. (1998), *A cellular automaton model for bi-directional traffic*, *Physical Review E*, volume 57(2):pages 2441-2444.
- Smith, A., (1969), *Cellular Automata Theory*, Technical Report 2, Stanford Electronic Lab, Stanford University.

-
- Smith, L., Beckman, R., Anson, D., Nagel, K., and Williams, (1995), *M. TRANSIMS: Transportation analysis and simulation system*, Proceedings of the 5th National Transportation Planning Methods Applications Conference, Seattle.
- Smulders, S. (1990), *Control of Freeway Traffic Flow by Variable Speed Signs*, Transportation Research B 24, 111-132.
- Sparmann, U. (1978), *Spurwechselvorgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen*, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 263 (en Alemán).
- Sugiyama, Y., Nakayama, A., Fukui, M., Hasebe, K., Kikuchi, M., Nishinari, K., Tadaki, S., Yukawa, S. (2005) In Hoogendoorn S, Luding S, Bovy PHL, Schreckenberg, M., Wolf, DE., (eds) *Traffic and Granular Flow '03*. Springer.
- Swaroop, D., Rajagopal, K. R. (1999) *Intelligent Cruise Control Systems and Traffic Flow Stability*, Transportation Research Part C, 7, 329-352
- Ten Haaf, W., Bikker, H., and Adriaanse, D. J. (2002). *Fundamentals of Business Engineering and Management, A Systems Approach to People and Organisations*, Delft University Press.
- Toffoli, T., (1977), *Cellular Automata Mechanics*, Technical Report (208), Computation Communication, Science Dept., The University of Michigan.
- Toffoli, T., (1984), *Cellular automata as an alternative to (rather than an approximation of) differential equations in modeling physics*, *physica D*, 10, 117-127
- Toffoli, T., Margolus, P., (1987), *Cellular Automata Machines*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- National Infrastructure Simulation and Analysis Center, *Transportation Analysis Simulation System* <http://www.sandia.gov/nisac/transims.html>, 2011.
- Treiber, M., et al., (2000). *Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations*, *Phys. Rev. E* 62 1805.
- Treiber, M., et al (2010), *Three-phase traffic theory and two-phase models with a fundamental diagram in the light of empirical stylized effects*, Transportation Research Part B 44 983-1000
- Treiterer, J. (1975), Ohio State Technical Report No. PB 246 094.
- Ulam, S. (1970). *On some mathematical problems connected with pattern of growth of figures* Essays on Cellular Automata, University of Illinois Press, Ed. A.W. Burks.
- Verkehrslage in NRW* <http://www.autobahn.nrw.de/>, 2011.
- Wagner, et. al. (1997). *Realistic multi-lane traffic rules for cellular automata*, *Physica A: Volume 234*. Doi: 10.1016/S0378-4371(96)00308-1.

- R. Wang and H.J. Ruskin (2002), *Comp. Phys. Comm.* 147 570
- R. Wang and H.J. Ruskin (2006), *Int. J. Mod. Phys. C* 17 (3).
- Weimar, J.R., (1997), *Simulation with Cellular Automata*, Logos-Verlag Press, Berlín.
- Wiedemann, R., (1974), *Simulation des Straßenverkehrsflusses*, Schriftenreihe des IfV, 8, 1974. Institut für Verkehrswesen. Universität Karlsruhe. (En alemán)
- Wolfram, S., (1983), *Cellular Automata*, *Science* 9, Los Álamos, 2-21.
- Wolfram, S., (1984), *Universality and Complexity in Cellular Automata*, *Physica D*, 10, 1-35.
- Wolfram, S., (1986), *Theory and Applications of Cellular Automata*, World Scientific Press, Singapore.
- Wolfram, S. (2002), *A new kind of science*, Wolfram Media, Inc., 1280 páginas.
- Wooldridge, M. and Jennings, N.R. (1995), *Intelligent agents: Theory and practice*, *The Knowledge Engineering Review* 10 (2): 115–152.
- Wooldridge, M. (2002), *An Introduction to MultiAgent Systems*, John Wiley and Sons, Chichester, England.