



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN

**MODELO PARA EL ANÁLISIS DEL TRÁFICO VEHICULAR EN CONVERGENCIAS
MEDIANTE AUTÓMATAS CELULARES**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS (COMPUTACIÓN)**

PRESENTA

ROBERTO FERNANDO HUERTA TREJO

TUTOR PRINCIPAL

**DRA. MARÍA ELENA LÁRRAGA RAMÍREZ
IIMAS-UNAM**

MÉXICO D. F. AGOSTO DE 2014



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.

Agradecimientos

Agradezco a todos y cada uno de mis sinodales por haberme brindado su confianza y por haber enriquecido este trabajo de tesis. Me enseñaron que sin importar los grados académicos y sin dejar de crecer en el ámbito científico, debe prevalecer la empatía y el valor como seres humanos.

De manera especial, agradezco a mi tutora por todo su aporte profesional y personal para llevar a buen puerto la investigación correspondiente a esta tesis. A través de usted tuve un impresionante acercamiento al mundo de la investigación científica, sin el cual este trabajo no habría sido posible.

No omito agradecer a las instituciones que confiaron en mí para la realización y conclusión de mis estudios de maestría. Primeramente la UNAM, mi alma mater, esta magnífica institución de la que estoy inmensamente orgulloso de formar parte. Con este trabajo de tesis se cierra un ciclo de mi vida como estudiante universitario, misma que comenzó en el bachillerato y que fue enriquecida gracias a las oportunidades que brinda esta noble institución. Así mismo, agradezco al proyecto DGAPA UNAM IN104913 por el apoyo brindado para la realización de esta tesis, y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca CVU- 419502 que me otorgó para la realización de mis estudios de maestría.

Por otra parte, quiero agradecer a mis papás, quienes no sólo me dieron la vida, sino que de tan diversas formas me siguen brindando valiosas enseñanzas para afrontarla. Gracias mamá por todo tu amor, tu apoyo y el ejemplo de vida que me has dado. Gracias papá por enseñarme a trabajar duro y hacerme valer por mí mismo para superarme. Dentro de este mismo ámbito se encuentran mis hermanos y las familias que han formado, de ustedes tengo muy claros ejemplos de grandes profesionales que superan cualquier meta que se proponen. Gracias Ame por mostrarme que es posible equilibrar la vida profesional sin abandonar a quienes amas. Gracias Arturo por demostrarme que siempre es posible seguir superándose y que es muy importante seguir teniendo metas. Gracias Blanca por enseñarme a tener la mente abierta y darle auténtica valía a las personas que nos rodean. Gracias Arturo Robles por creer en mí. Gracias Ewok por recordarme lo que significa la inocencia y la capacidad de asombro que sólo un niño (ahora adolescente) con tan buen corazón como tú puede tener.

Finalmente pero no menos importante, gracias Vero, tú me impulsaste a iniciar este viaje lleno de retos llamado maestría, me alentaste cuando sentía que ya no podía más y me sigues animando a concluirlo. Gracias por tu amor, tu paciencia, tu ánimo y por mostrarme que hay que ser constante en el esfuerzo para cosechar los mejores resultados.

Contenido

Resumen	3
Introducción.....	4
1. Tráfico vehicular y conceptos relacionados.....	7
1.1 Modelación de Sistemas Complejos.....	7
1.2 Autómatas Celulares.....	9
1.2.1 Definición formal	9
1.2.2 Condiciones de frontera.....	11
1.2.3 Aplicaciones en simulación computacional.....	11
1.3 Conceptos relacionados al tráfico vehicular	12
1.3.1 El tráfico vehicular como Sistema Complejo	12
1.3.2 Variables básicas.....	13
1.3.3 El diagrama fundamental.....	14
1.3.4 Fases del flujo vehicular	14
1.3.5 Convergencia de vías.....	15
1.3.6 Clasificación de los modelos	22
2 Modelación de Tráfico Vehicular con Autómatas Celulares, Estado del Arte	25
2.1 Modelo NaSch.....	25
2.2 Modelos LAI	27
2.2.1 Modelo para un solo carril.....	27
2.2.2 Modelo multicarril.....	32
2.3 Modelación de rampas y otros trabajos relacionados	36
3 Modelo basado en AC para convergencias en vías de varios carriles con rampa de acceso	39
3.1 Consideraciones Previas.....	39
3.2 Modelación de una rampa de acceso sin un mecanismo de control	40
3.2.1 Descripción del modelo	41
3.2.2 Simulación y análisis de resultados del modelo propuesto para rampas sin mecanismos especiales de control.....	48
3.3 Modelación de una rampa de acceso con semáforo de control de tiempo fijo	59

3.3.1	Descripción del modelo	59
3.3.2	Simulación y análisis de resultados del modelo propuesto para rampas con semáforo de control de tiempo fijo	65
3.4	Análisis del desempeño del modelo sin la regla <i>slow to start</i> en la rampa.....	73
4	Conclusiones.....	81
	Resumen de Aportaciones	82
	Trabajo futuro	83
	Apéndice A. Implementación mediante cómputo paralelo del modelo LAI y su análisis de eficiencia.....	84
	Referencias	93
	Índice de Tablas y Figuras	96

Resumen

En este trabajo se propone un modelo nuevo para el estudio de tráfico vehicular en una carretera de dos carriles con reglas de cambio de carril asimétricas y una rampa de acceso de un solo carril mediante autómatas celulares. El modelo toma en cuenta las restricciones mecánicas de los vehículos (capacidades de aceleración/desaceleración) y características del conductor en la definición de la dinámica vehicular. De tal manera que los efectos de anticipación de la velocidad y la inclusión de distancias y velocidades relativas entre los vehículos para la toma de decisión del conductor, se transfieren a la definición de las reglas para manejar y controlar el acceso a la vía principal desde la rampa. El objetivo a través del nuevo modelo es analizar el uso del espacio de la carretera cuando se incorporan vehículos a través de una rampa de acceso, mediante la definición de un proceso de ingreso de los vehículos a la vía principal más adecuado y real. De tal manera que el modelo pueda servir para evaluar el desempeño de estrategias de control de acceso a rampas. Para este propósito, el proceso de ingreso a la vía principal se formula en términos de aceleraciones y desaceleraciones longitudinales de los vehículos, de tal forma que en la definición la toma de decisión de un conductor para ingresar a la vía principal no sólo se toma en cuenta su propia ventaja, sino también ventajas de los otros conductores asociados con el proceso mediante las distancias de seguimiento seguro existentes entre los vehículos. Por lo tanto, las desaceleraciones irreales y los accidentes como consecuencia del acceso de un vehículo a la vía principal se evitan con el nuevo modelo.

Dos escenarios son definidos. El primero se refiere a una rampa de acceso a una vía de dos carriles sin establecer un mecanismo de control para el acceso de los vehículos a la vía principal, es decir un vehículo ingresa siempre que las condiciones espaciales y de seguridad lo permitan. El segundo escenario considera el acceso controlado de vehículos de una rampa a una vía principal a través de un semáforo de tiempo fijo. Resultados de simulación sobre una vía de dos carriles con condiciones de frontera abierta con reglas de cambio de carril asimétricas y una rampa de entrada de un carril, indican que el modelo que se propone en este trabajo de tesis es adecuado para representar y analizar el desempeño del flujo vehicular real. El modelo podría servir para evaluar el desempeño de las estrategias de control de rampas de acceso.

Introducción

En la última década se ha producido, en prácticamente todos los campos del quehacer científico, una importante transformación conceptual y metodológica ligada estrechamente al estudio de los llamados fenómenos no-lineales, cuyo análisis se engloba parcialmente dentro de las llamadas ciencias de la complejidad o de los sistemas complejos. Los sistemas complejos están formados por un conjunto grande de componentes individuales que interactúan entre sí y que pueden modificar sus estados internos como producto de tales interacciones. Tales sistemas pueden ser estructuralmente simples, aunque tal simplicidad no impide que exhiban comportamientos dinámicos diversos y no triviales [1]. Diversas propiedades espacio-temporales de los sistemas complejos, llamadas propiedades emergentes, surgen espontáneamente a partir de interacciones entre los elementos constituyentes, en escalas de tiempo y longitud considerablemente mayores que las escalas en las que ocurren dichas interacciones. Es esta capacidad de generar un comportamiento complejo a través de reglas sencillas e interacciones entre elementos simples, lo que ha llevado a mirar a este tipo de sistemas como un modelo computacional en el tratamiento de problemas no lineales, toda vez que hay fenómenos que exhiben este mismo comportamiento y en los que las entradas de información se pueden dar a lo largo del mismo proceso, dando lugar a numerosas aplicaciones en todos los ámbitos de la naturaleza.

La invención de computadoras digitales rápidas y el desarrollo de la teoría de sistemas dinámicos, trajo aparejada la redefinición o creación de entidades matemáticas nuevas, que son de gran utilidad para el estudio de fenómenos discretos que ocurren en el espacio de los sistemas complejos mediante el uso de la simulación computacional. Ejemplo de ellos son los Autómatas Celulares (AC). Profundamente arraigados en la investigación básica en Matemáticas y Ciencias de la Computación, los AC se reconocen como un paradigma de modelado intuitivo para los Sistemas Complejos. Los AC son modelos matemáticos útiles para representar el desempeño de los fenómenos dinámicos complejos. Básicamente, un sistema dinámico se caracteriza por tener un espacio de estados y una ley de evolución, las cuales también son características esenciales de los AC [2]. Los AC proporcionan un modelo básico para los sistemas complejos generados por conjuntos de reglas simples. En este tipo de modelos, el tiempo y el estado son discretos y por lo tanto, su representación es siempre entera y de dimensión finita. Mientras que en cada paso en una simulación está dominada por las interacciones locales, con el tiempo puede surgir comportamiento macroscópico complejo. La observación de este comportamiento emergente a largo plazo debido a las reglas simples, fáciles de entender y computacionalmente eficientes de los AC, ha llevado a intentos de modelar sistemas complejos mas allá del ámbito inicial de las aplicaciones para las que fueron creados (Física, Ciencias de la Computación y Matemáticas). De tal manera, que los AC se han convertido en excelentes herramientas de trabajo arduo en muy diferentes disciplinas, como la epidemiología, la inmunología, la sociología, el crecimiento urbano, finanzas, transporte, etc.

Este trabajo de tesis se enfoca sobre la modelación y el estudio de uno de tales sistemas complejos: el tráfico vehicular. El tráfico vehicular es el fenómeno causado por el flujo de vehículos en una vía, calle o autopista. Una adecuada auscultación del tráfico vehicular en una red vial resulta fundamental para su operación, mantenimiento y desarrollo. En años recientes, la mayoría de las ciudades industrializadas han empezado a ver los límites del crecimiento del tráfico vehicular. La demanda del tráfico vehicular en áreas metropolitanas ha excedido ampliamente la capacidad vehicular de sus vías, produciendo un decremento en la seguridad promedio

y un incremento en las pérdidas económicas y la contaminación ambiental debido a los tiempos de viaje más largos en estos sistemas congestionados. Las soluciones típicas, tal como la expansión de los sistemas de transporte o el mejoramiento de las carreteras, ya no funcionan correctamente debido a diversas razones sociales físicas y económicas. Actualmente, las soluciones se orientan a un mejor manejo de los sistemas existentes. Por lo que el desarrollo de modelos con la finalidad de entender el desempeño complejo del tráfico vehicular y determinar los mecanismos que conllevan a su comportamiento para proponer alternativas orientadas a mejorar el desempeño de las vías es ya una constante.

Particularmente, la modelación con AC, basada en microsimulación computacional, ha ganado gran importancia como un medio para entender, analizar, evaluar y manejar el tráfico vehicular; ya que puede reproducir una gran variedad de fenómenos que ocurren en el tráfico vehicular real. En los últimos años, la modelación y descripción del desempeño complejo del tráfico vehicular a través de los AC ha llegado a ser muy fructífera, debido a su relativa simplicidad y flexibilidad. En este tipo de modelos, la dinámica, tanto de los vehículos como de los conductores, se puede implementar en la forma de reglas locales, lo que permite se puedan considerar aspectos del desempeño de los individuos más complejos (como los referentes a desempeños del conductor y aspectos psicológicos), en una forma natural y computacionalmente eficiente. Esta interacción local permite así, capturar dinámicas a un nivel de detalle microscópico (basado en el desempeño de cada uno de los individuos del sistema) y propagarlas a un nivel de detalle macroscópico, con lo que es posible reproducir diversos fenómenos que ocurren en la realidad para su entendimiento y análisis. Esta es una gran ventaja para la modelación de sistemas, como el tráfico vehicular, con una gran cantidad de agentes cuyas interacciones no se basan en fuerzas físicas. De esta manera, los modelos para tráfico 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. En particular, los modelos de AC forman la base para el pronóstico de tráfico a través de la simulación en línea; es decir, simulación que interactúa en tiempo real con el sistema físico.

El primer modelo reconocido internacionalmente para simular el desempeño del tráfico vehicular es el modelo de Nagel y Schreckenberg [2] (modelo NaSch). A partir de ahí se han desarrollado un gran cantidad de modelos resultado de modificar el modelo NaSch con la finalidad de estudiar situaciones de tráfico más complejas. La mayoría de los modelos se han enfocado en reproducir ciertos fenómenos que la literatura de tráfico dice que ocurren en la realidad, sin importar que el desempeño de los vehículos y de los conductores se aleje de la realidad. O bien, los que intentan considerar dicho desempeño de una manera más real, han aumentado la cantidad de los parámetros que definen los modelos y la complejidad de la dinámica que define el desempeño del sistema, causando un decremento de la simpleza original de los modelos basados en AC. El reto de los modelos basados en AC para tráfico vehicular, es lograr un equilibrio entre fidelidad (representación del desempeño real de los vehículos y los conductores), el nivel de detalle (resolución) y la escala que permita preservar la simplicidad que caracteriza a los modelos de AC y que a la vez sean computacionalmente paralelizables.

Uno de los puntos de interés cuando se modela tráfico vehicular son los embotellamientos que se originan en los puntos donde confluyen dos o más vías, llamados convergencias, tal es el caso de las rampas de acceso a una vía principal. Aunque ya se han desarrollado modelos basados en AC considerando rampas de acceso, estos preservan las limitaciones establecidas por el modelo NaSch: aceleraciones y desaceleraciones sin un valor límite, que se alejan del desempeño real de los vehículos y conductores y desaceleraciones abruptas. Además, que raramente existen en la literatura modelos que traten con el control del flujo en las rampa de acceso.

En este trabajo se propone un modelo nuevo para modelar el tráfico vehicular en una carretera de dos carriles con reglas de cambio de carril asimétricas y una rampa de acceso de un solo carril mediante AC. El modelo extiende un modelo realista propuesto recientemente para simular el tráfico vehicular de varios carriles, el cual toma en cuenta las restricciones mecánicas de los vehículos (capacidades de aceleración/desaceleración) y características del conductor en la definición de la dinámica vehicular. De tal manera que los efectos de anticipación de la velocidad y la inclusión de distancias y velocidades relativas entre los vehículos para la toma de decisión del conductor, se transfieren a la definición de las reglas para manejar y controlar el acceso a la vía principal desde la rampa de acceso. El objetivo a través del nuevo modelo es analizar el uso del espacio de la

carretera cuando se incorporan vehículos a través de una rampa de acceso, mediante la definición de un proceso de ingreso de los vehículos a la vía principal más adecuado y real. De tal manera que el modelo pueda servir para evaluar el desempeño de estrategias de control de acceso a rampas. Para este propósito, el proceso de ingreso a la vía principal se formula en términos de aceleraciones y desaceleraciones longitudinales de los vehículos, del tal manera que en la definición la toma de decisión de un conductor para ingresar a la vía principal no sólo se toma en cuenta su propia ventaja, sino también ventajas de los otros conductores asociados con el proceso mediante las distancias de seguimiento seguro existentes entre los vehículos. Por lo tanto, las desaceleraciones irreales y los accidentes como consecuencia del acceso de un vehículo a la vía principal se evitan con el nuevo modelo.

Dos escenarios son definidos. El primero se refiere a una rampa de acceso a una vía de dos carriles sin establecer un mecanismo de control para el acceso de los vehículos a la vía principal, es decir un vehículo ingresa siempre que las condiciones espaciales y de seguridad lo permitan. El segundo escenario considera el acceso controlado de vehículos de una rampa a una vía principal a través de un semáforo de tiempo fijo. Resultados de simulación sobre una vía de dos carriles con condiciones de frontera abierta con reglas de cambio de carril asimétricas y una rampa de entrada de un carril, indican que el modelo que se propone en este trabajo de tesis es adecuado para representar y analizar el desempeño del flujo vehicular real.

El resto del trabajo de tesis se presenta organizado de la siguiente manera. En el capítulo 1 se presentan conceptos fundamentales referentes al tema tratado como son la modelación de sistemas complejos, los autómatas celulares y el estudio del tráfico vehicular.

En el capítulo 2 se abordan los modelos basados en AC que han servido como base para la formulación del modelo propuesto. Además, se presenta una breve descripción de otros modelos que forman parte del estado del arte de la modelación de tráfico vehicular, principalmente los enfocados a la modelación de rampas de acceso con AC.

En el capítulo 3 se definirá un modelo nuevo para el tráfico vehicular heterogéneo en una carretera de dos carriles con reglas de cambio de carril asimétricas y una rampa de acceso de un solo carril mediante AC, el cual hereda las consideraciones de anticipación de la velocidad y la incorporación de aceleraciones y desaceleraciones de los vehículos con un valor límite semejante al de los vehículos reales. Se presentarán resultados de simulación cada uno de los escenarios considerados, con los que se mostrara que el modelo que se propone en este trabajo de tesis es adecuado para representar y analizar el desempeño del flujo vehicular real y que el modelo podría servir para evaluar el desempeño de las estrategias de control de rampas de acceso.

Finalmente se expondrán las conclusiones de este trabajo, incluyendo un resumen de las aportaciones contenidas y las ideas que han surgido como trabajo futuro en la realización de la investigación correspondiente a esta tesis.

De forma adicional, se incluye un apéndice donde se presenta una aproximación realizada para implementar el modelo que se ha tomado como base en forma paralela con lenguaje C y MPI (Message Passing Interface), además se darán resultados del análisis de eficiencia de la implementación realizada con el objetivo de establecer las bases de la implementación en paralelo que podrían emplearse para el modelo propuesto.

Por último se presentarán las referencias de este trabajo de tesis en orden de aparición y el índice de las figuras incluidas en este documento.

1. Tráfico vehicular y conceptos relacionados.

La vida cotidiana rebosa de fenómenos que parecen caóticos, como el tráfico vehicular, los sismos, erupciones volcánicas, el clima, los movimientos en la bolsa de valores y por supuesto el tráfico vehicular. Aunque, en realidad se ciñen a reglas estrictas pero difíciles de desentrañar. Su estructura es tan compleja, con tanta cantidad de variables implicadas, que parece imposible hacer una predicción a un futuro siquiera relativamente cercano, especialmente si se siguen métodos tradicionales que parten del reduccionismo.

El reduccionismo era el paradigma dominante en la ciencia en el siglo pasado. Cuando un científico se enfrentaba al estudio de un sistema, la herramienta tradicional a utilizar consistía en reducir este sistema a sus partes constituyentes, de forma tal que al estudiarlas y comprenderlas, la comprensión del comportamiento de todo el sistema se obtenía a partir de entender el comportamiento de sus partes e integrar el sistema de forma que la suma de la comprensión del comportamiento de sus partes llevaba a la comprensión del comportamiento de todo el sistema. En este paradigma, la metáfora de la ciencia era la de un edificio que se va construyendo sobre bases sólidas (partículas elementales, la célula como unidad de lo biológico, la familia como unidad de la sociedad, etc.) y donde se puede llegar a un conocimiento total.

Sin embargo, al abordar el estudio de un sistema complejo este procedimiento de investigación falla debido a la imposibilidad de reducir el sistema a la mera suma de sus partes sin “destruirlo”. De esta forma, la metáfora científica actual es la de la red o la de un entramado donde todo está interconectado, el estudio de los sistemas se aborda desde un punto de vista diferente, donde para comprender al todo se necesita comprender sus partes constituyentes, pero a su vez, para entender estas partes constituyentes se necesita tener una visión de conjunto de todo el sistema [4].

Por lo anterior, en el presente capítulo se buscará dar una introducción a los sistemas complejos y su estudio a través de simulación computacional basada en autómatas celulares. Así mismo, se revisarán conceptos referentes al análisis de uno de tales sistemas complejos: el tráfico vehicular.

1.1 Modelación de Sistemas Complejos

Los Sistemas Complejos aún no cuentan con una definición clara y precisa. Este hecho está en consonancia con la propia identidad “compleja” de estos sistemas. Diferentes investigadores, desde sus propios dominios del saber, tienen formas de decir y aportar a la clasificación de estos sistemas, de forma que los Sistemas Complejos se colocan en el centro de un diálogo de donde cada especialista aporta, desde su postura científica, una unidad de conocimiento sobre estos objetos de estudio. Así, estos sistemas demandan para su comprensión y estudio un abordaje multidisciplinario, tanto de teorías a elaborar como de herramientas a utilizar.

Sin embargo, aun cuando no se tiene una definición precisa de éstos sistemas, en general se pueden acotar a partir de ciertas características. Por lo cual puede decirse que existen sistemas que se componen de múltiples partes que interactúan de alguna forma para crear un comportamiento que no es derivable directamente de las

características individuales de sus componentes. Esto es, algunas de las características principales del sistema emergen exclusivamente a partir de las interacciones de sus elementos. A éstos se les conoce como sistemas complejos, donde para comprender al todo se necesita comprender sus partes constituyentes, pero a su vez, para entender estas partes constituyentes se necesita tener una visión de conjunto de todo el sistema [4]. De esta forma son varios los autores que plantean que en los estudios científicos basados en este nuevo paradigma sólo se pretenden hacer descripciones aproximadas del sistema a tratar.

Una vez visto lo anterior es posible enumerar las características principales de este tipo de sistemas:

- Un Sistema Complejo está compuesto por varias partes interconectadas cuyos vínculos contienen información adicional, es decir, como resultado de las interacciones entre sus elementos surgen propiedades nuevas que no pueden explicarse a partir de las propiedades de los elementos aislados. Dichas propiedades se denominan propiedades emergentes.
- El comportamiento del sistema surge a partir de la auto-organización de sus componentes, sin que esta organización esté controlada ni dirigida por ningún ente exterior al sistema. Es decir, cada Sistema Complejo emerge a partir de sus partes y fluctúa hasta quedar fuertemente estabilizado. Esto lo logra a partir de retroalimentaciones positivas y negativas que atenúan cualquier modificación provocada por el medio externo. El sistema reacciona ante agresiones externas que pretendan modificar su estructura.
- Para describir un Sistema Complejo hace falta no solo conocer el funcionamiento de las partes sino conocer cómo se relacionan entre sí. Esta propiedad se resume en la ya conocida frase “El todo es más que la suma de las partes”: la información contenida en el sistema en conjunto es superior a la suma de la información de cada parte analizada individualmente. No podemos entender el todo sin conocer las partes, pero no podemos entender las partes sin conocer al todo.
- Los componentes básicos de estos sistemas (células, hormigas, individuos, poblaciones, empresas,...) perciben su entorno y responden a cambios en él de forma potencialmente diferente. Los agentes de un Sistema Complejo son autónomos.
- Los sistemas complejos son también adaptativos: el comportamiento de los componentes básicos del sistema puede evolucionar en el tiempo, dando lugar a una cierta capacidad de respuesta frente a cambios en el entorno. Los agentes de un Sistema Complejo pueden “aprender” de forma diferenciada dando lugar a asimetrías en el sistema.
- Su comportamiento no es predecible a partir de conocer el comportamiento de sus elementos constituyentes individualmente. Esta es la propiedad de “No linealidad” de los Sistemas Complejos.

Como ejemplo de este tipo de sistemas tenemos el clima de nuestro planeta, donde para predecir si en una región determinada habrá lluvia el día de hoy, es necesario considerar las interacciones que hay entre las corrientes de viento, las corrientes marítimas, la humedad existente en dicha región, su altitud, etc. Siendo sólo mediante el estudio de las interacciones de todos esos factores lo que nos permite tener una aproximación al comportamiento del clima. Otro ejemplo de este tipo de sistemas son los procesos de aprendizaje humano, donde no basta con estudiar las neuronas de forma individual, sino que es preciso estudiar las relaciones entre ellas para acercarnos a analizar cómo funciona nuestro cerebro.

La complejidad de la mayoría de los sistemas del mundo real se relaciona ampliamente a su naturaleza estocástica y las interacciones (en diferentes niveles) entre sus factores y variables principales. El entendimiento y conocimiento acerca de un sistema del mundo real es así fundamental. Para este propósito, históricamente, una de las formas más adecuadas para analizar, entender y manejar el desempeño de los sistemas complejos del mundo real es la modelación y simulación computacional. La modelación computacional es un elemento integrador indispensable para realizar la predicción científica de muchos sistemas complejos en ciencias e ingeniería y del mundo real. En nuestros días, 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, tal que la matemática clásica no resulta suficiente en ocasiones para expresar todos los fenómenos que ocurrirán en el sistema.

Actualmente, el procesamiento de información y el estudio de sistemas complejos juegan un papel fundamental en el entendimiento de fenómenos no-lineales a cualquier escala. Por otro lado, la teoría de la computación juega un rol indispensable para describir, a través de un procedimiento efectivo, un fenómeno en particular. En la intersección, la manera de procesar dicha información y la complejidad derivada de ello es objeto de estudio, y también lo es ahora la forma en que hemos cambiado la manera de ver los sistemas complejos para considerarlos como modelos de computación por sí mismos convirtiéndonos de observadores a modeladores de sistemas complejos, haciéndolos procesar información como otro dispositivo de computación [5] .

Los Autómatas Celulares (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. Es por ello que a continuación se presenta una introducción a los AC.

1.2 Autómatas Celulares

Los primeros AC rigurosamente establecidos se debieron a Von Neumann [6] y Ulman [7] . Si bien es verdad que durante cerca de 30 años fueron considerados como una especie de curiosidad matemática sin aplicaciones, en la actualidad y fundamentalmente gracias a los trabajos de Wolfram [8] [2] [9] , se están convirtiendo en una de las herramientas imprescindibles en el estudio de múltiples fenómenos naturales a través de microsimulación.

La microsimulación se refiere al tipo de modelación computacional que se enfoca en la interacción de las unidades individuales tales como personas y vehículos. Cada unidad se trata como una entidad autónoma y la interacción entre las unidades varía en función de los parámetros que se definen. Dentro de estos modelos microscópicos, los modelos basados en AC han ganado mucho auge en los últimos años como puede apreciarse en las referencias [10] [11] [12] [13] [14] .

Los AC son sistemas dinámicos discretos en espacio, tiempo y variables de estado, lo que permite simulaciones muy rápidas. Sin embargo, debido al advenimiento de equipo de cómputo cada día más potente, la razón principal para realizar investigaciones basadas en modelos de AC es el hecho que basan su dinámica en reglas intuitivas y locales. Esta característica permite simular por ejemplo, las decisiones que los conductores de vehículos toman basados en su situación actual, la relación con sus vecinos, sus metas, etc., e incluir aspectos de comportamiento del conductor (psicológicos, por ejemplo) en forma muy simple (en comparación con modelos continuos). A continuación se introduce una descripción más formal de los AC.

1.2.1 Definición formal

Se denomina autómata celular d -dimensional a una colección de células dispuestas uniformemente según un espacio de d dimensiones, las cuales tienen interacciones locales. De acuerdo a Wolfram, cada célula posee un estado específico, el cual toma de un valor discreto de un conjunto finito de k estados, que evoluciona sincrónicamente con el paso discreto del tiempo, de acuerdo a un conjunto de reglas [8] [9] . El valor de una celda está influido por los estados de sus células vecinas. (Toffoli, et.al.) [15] [8] .

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.

Formalmente, los autómatas celulares unidimensionales se pueden definir como una cuaterna (L, S, N, Φ) (Cattaneo, et.al., 1999)[16], 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, en lo subsecuente, 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) [17] [18].

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). Por lo que a efectos prácticos en simulación tradicionalmente se trabaja con AC finitos.

1.2.2 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 del espacio celular. Estas condiciones determinan las vecindades en los bordes (fronteras) de la malla. Se suelen considerar dos casos de fronteras: bordes periódicos y bordes absorbentes (Hernández, et. al., 2002)[17], mismos que 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).

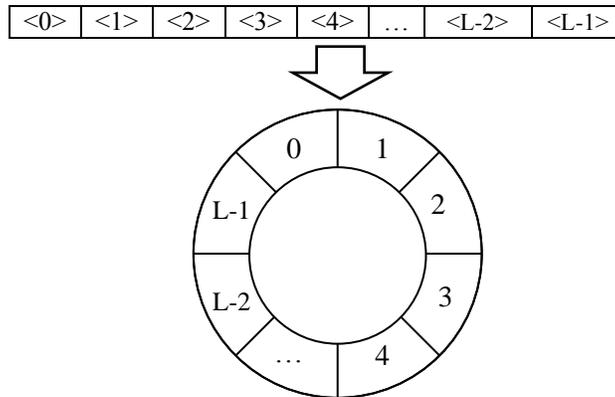


Figura 1.3 AC unidimensional con condiciones de frontera periódica, donde la primera celda es vecina de la última

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:

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

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

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 unidimensional con condiciones de frontera absorbentes

1.2.3 Aplicaciones en simulación computacional

Existen diversos campos de aplicación de los AC, no obstante dentro del contexto de la simulación computacional de sistemas complejos, 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, 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) [18] [19] [9].

En particular, en su aplicación al tráfico vehicular como sistema complejo, 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 AC pueden ser vistos como sistemas computacionales cuya información de los procesos de evolución es contenida en sus configuraciones iniciales. Los AC son también usados para la simulación de

sistemas en computadoras digitales. En particular, los AC son idóneos para proponer modelos de sistemas complejos y posteriormente analizar su comportamiento mediante simulación a gran escala o en línea, como el tránsito vehicular.

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, a continuación se introduce el problema del tráfico vehicular, algunos conceptos relacionados y antecedentes referentes a la modelación del tráfico vehicular basada en AC.

1.3 Conceptos relacionados al tráfico vehicular

Existe un sistema complejo conocido, vivido y frecuentemente padecido por los habitantes de los países industrializados: el tráfico vehicular. Éste y los congestionamientos que de él se derivan se han vuelto un problema tanto económico como social y ambiental para los países industrializados, puesto que incrementa los índices de contaminación, aumenta el número de accidentes en las calles y dispara los tiempos de traslado, deteriorando con ello la calidad de vida de los habitantes de éstos países. Así mismo, la capacidad de las vías existentes ha sido sobrepasada, por lo que se requiere que se tenga un uso más eficiente de las mismas, sin embargo el probar nuevos mecanismos para ello muchas veces no es factible directamente en las vías, por lo que se requieren alternativas para tal fin. Así, se ha trabajado con modelos de AC para realizar microsimulación de tráfico vehicular desde hace algunos años. En este segundo capítulo se revisarán algunos elementos básicos del estudio del tráfico vehicular, así como de su modelación computacional.

1.3.1 El tráfico vehicular como Sistema Complejo

Al movimiento de vehículos a través de una vialidad (calle, avenida o autopista) se le conoce como tráfico vehicular, o bien, como tránsito vehicular. Siendo este un fenómeno complejo que ha llamado la atención de científicos desde inicios del siglo XX, pues con la producción en serie de vehículos automotores fue inevitable que hacia 1930 comenzaran a observarse las repercusiones del aumento del número de vehículos que circulaban por las calles de los países industrializados de la época. Motivando ello a comenzar a realizar estudios sobre el comportamiento del tráfico como un sistema de interés aun cuando no se tenían ni de lejos los congestionamientos viales que observamos en la actualidad.

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.

Así, el tráfico vehicular ha llegado a ser uno de los problemas económicos, sociales y ambientales más serios que enfrentan los países industrializados, como México. Esto se debe a que la demanda vehicular ha sobrepasado la capacidad de las vías existentes, lo que conlleva a un incremento de los índices de congestión vehicular y por lo tanto, de la contaminación ambiental, el número de accidentes y de los tiempos requeridos para trasladarse hacia un destino; deteriorando además la calidad de vida. Por lo que una auscultación adecuada del tráfico vehicular de una red de transporte resulta fundamental para su operación, mantenimiento y desarrollo. Es por ello que en los últimos años se han desarrollado diversos modelos con la finalidad de entender más ampliamente el desempeño complejo del tráfico vehicular y de esta manera, incrementar la capacidad vehicular de las vías y proponer soluciones orientadas a mejorar el manejo de los sistemas viales existentes. Sin embargo, antes de llevar a cabo cualquier solución se requiere evaluar todos los aspectos de los sistemas de transporte y su desempeño. La modelación y simulación computacional como medio para evaluar, planear y controlar sistemas de tráfico vehicular ha ganado considerable importancia en los últimos años. Particularmente, la microsimulación se está usando como un medio para simular y evaluar las acciones gubernamentales para

resolver los problemas ocasionados por los congestionamientos vehiculares antes de su implementación final. Para ello es necesario tener claros ciertos conceptos que se presentan en la siguiente sección, mismos que permiten estudiar este fenómeno.

1.3.2 Variables básicas

La adecuada auscultación del tráfico vehicular de una red es un elemento indispensable para planear las actividades por realizar, tanto de mantenimiento como de operación y crecimiento para tal red, conforme a las necesidades que se observen en la red. En el caso de la infraestructura, facilita la asignación de tráfico vehicular en los nuevos segmentos propuestos, al mismo tiempo que permite una correcta definición de sus características geométricas y estructurales.

Es por lo anterior que históricamente ha sido necesario establecer diversos términos, variables y modelos para potencializar el estudio formal de las vías de transporte. Así, en la presente sección y sus subsecciones, se definirán brevemente dichos elementos que serán empleados cuando se realice el análisis de resultados de esta tesis.

A pesar de que existe una gran cantidad de factores involucrados en una modelación de tráfico vehicular, tales como señalización, velocidades permitidas, incorporaciones, bloqueos, etc., existen tres variables que son de suma relevancia debido a que permiten caracterizar el comportamiento del tráfico.

Dichas variables son el flujo, la densidad y la velocidad.

- El **flujo** (J) se define como el número de vehículos que atraviesan un punto establecido en la vía en un periodo de tiempo determinado. Típicamente es dado en número de vehículos por hora [veh/h].
- La **densidad** (ρ) expresa el número de vehículos existentes por unidad de longitud de vía en un tiempo dado. Comúnmente es dado en vehículos por kilómetro [veh/km].
- La **velocidad** (v) se toma como el cambio de posición de un vehículo por unidad de tiempo. Normalmente será referido en kilómetros por hora [km/h]. Es muy común que se considere la velocidad promedio, que sencillamente se obtiene promediando la velocidad de todos y cada uno de los vehículos dentro de un segmento de vía determinado.

Para la recolección de datos que permitan medir las variables de interés, en múltiples puntos de una carretera se recolectan datos empíricos automáticamente mediante bucles inductivos (*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.

Así, el flujo J está dado por el número de vehículos $N(t)$ pasando por el detector en un paso de tiempo t , es decir

$$J = \frac{1}{t} N(t) \quad (1.5)$$

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 (*headway*).

Sin embargo, la determinación de la densidad ρ es más compleja debido a 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 base a eventos y por lo tanto, solamente los vehículos en movimiento pueden ser detectados.

Para solventar el problema 1) se utiliza la relación hidrodinámica dada en la siguiente ecuación.

$$J = v\rho \quad (1.6)$$

Con lo cual se puede obtener la densidad ρ a partir de un flujo medido J y una velocidad promedio v . Es importante resaltar que la velocidad promedio normalmente es sobre-estimada debido a que los vehículos lentos o detenidos no son detectados por los sensores, y por lo tanto la densidad es subestimada.

1.3.3 El diagrama fundamental

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 dada por la ecuación 2.2, se pueden establecer las relaciones $v(\rho)$ o $v(J)$. La última evita los problemas al mediar la densidad, por lo que es usada frecuentemente en la ingeniería de tráfico.

Frecuentemente los datos son promediados sobre intervalos de tiempo de 1 a 5 minutos para obtener series de tiempo. Sin embargo, para entender la estructura microscópica se necesita información que no esté promediada y que permita distinguir entre vehículos (*single-vehicle data*), por lo que también suele almacenarse tal información siempre considerando sólo un cierto número de vehículos que resulte particularmente de interés puesto que realizar esta operación es costoso.

1.3.4 Fases del flujo vehicular

A partir del diagrama fundamental y con apoyo de observaciones espacio-temporales, dentro del ámbito de ingeniería de transporte es relevante considerar que pueden distinguirse tres fases del flujo vehicular (Kerner, et.al., 2004)[20], aunque algunos puntos permanecen en controversia (Helbing, et.al., 2002a)[21]. Dichas fases son las siguientes:

Flujo libre: En esta fase las interacciones entre vehículos son escasas. 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 en la Figura 1.5 (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.

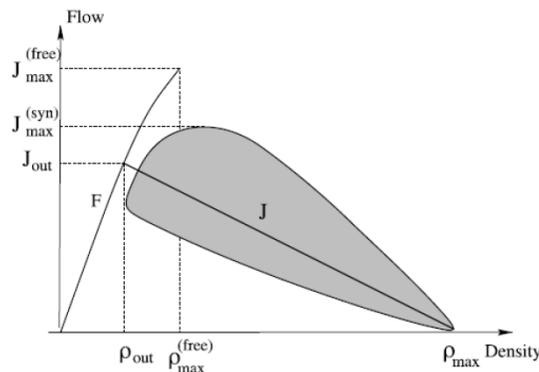


Figura 1.5 Esquema del diagrama fundamental. F denota la rama de flujo libre y la línea de congestiónamiento J es determinada por las propiedades de los congestiónamientos en movimiento

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 $v_{jam} \approx 15\text{km/h}$. Otras propiedades características de los congestionamientos en movimiento son su densidad y el flujo de salida J_{out} , el cual no depende del flujo de entrada al congestionamiento. 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.

Flujo sincronizado: En el flujo sincronizado 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 anterior). 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.

Hasta aquí se han descrito sólo las propiedades más importantes de las fases de flujo de tráfico. En (Kerner, et.al., 2004) [20] 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)[22] [23] 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 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.

Dentro de las redes de transporte existen puntos en los cuáles se ha observado que suelen originarse un gran número de embotellamientos, unos de tales lugares son las uniones de dos vías también, conocidas como convergencias, en estos puntos los vehículos que provienen de dos o más vías confluyen en uno sólo, por lo que la capacidad de la vía se ve reducida originando que, para ciertas densidades, se ve afectada la velocidad de circulación. En la sección siguiente se hace un estudio de la operación de las convergencias desde el punto de vista de la dinámica vehicular y las interacciones que se dan entre los vehículos que circulan por ellas.

1.3.5 Convergencia de vías

Como se mencionó al finalizar la sección anterior, las convergencias son las uniones de dos o más vías en las carreteras y son de importancia porque en ellas se producen muchos de los embotellamientos de las redes de transporte [22]. En las páginas siguientes se revisan algunos de los fundamentos de este tipo de elementos que son un punto de crucial interés para el modelo que se plantea en este trabajo de tesis.

1.3.5.1 Estructura de una convergencia vehicular

Al estudiar las convergencias se observa que existen tres zonas claramente diferenciadas respecto a la interacción que puede haber entre los vehículos que componen en flujo en cada vía. Considérese el caso en el que dos vías vehiculares A y B confluyen de tal forma que terminan formando una sola vía C en la que se une el flujo total de ambas vías como en la Figura 1.6

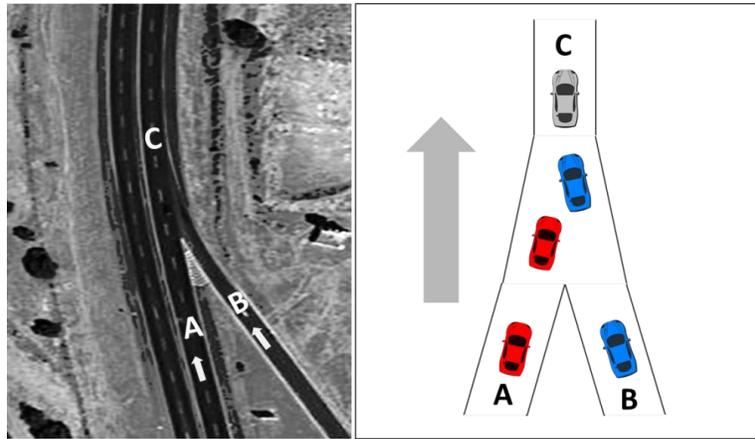


Figura 1.6 Esquemización de una convergencia en carretera. La imagen satelital corresponde a la autopista México Pachuca de cuota Km 47

- Hasta antes de que entren en contacto ambas vías, no hay interacción entre los vehículos que circulan una vía con los que circulan por la otra. Esto es, los vehículos no son afectados por la convergencia de forma directa debido a que los vehículos que circulan por la vía A no pueden cambiarse a la vía B ni viceversa. A tal zona se le llamará **BF (Before Merge)**.
- A partir de un punto determinado, al que se le denominará **start** los autos de los flujos A y B comienzan a interactuar de tal forma que tales flujos se mezclan hasta formar un solo flujo a partir del punto denominado **end**. Esta zona será denominada **Merge**.
- Después del punto **end** comienza la zona llamada **AM (After Merge)** en la que los autos se mueven todos dentro de un mismo flujo que circula sobre la vía C sin verse afectados por la convergencia.

Lo anterior se aprecia en la Figura 1.7 que servirá como base para analizar los diferentes casos estudiados en el presente trabajo.

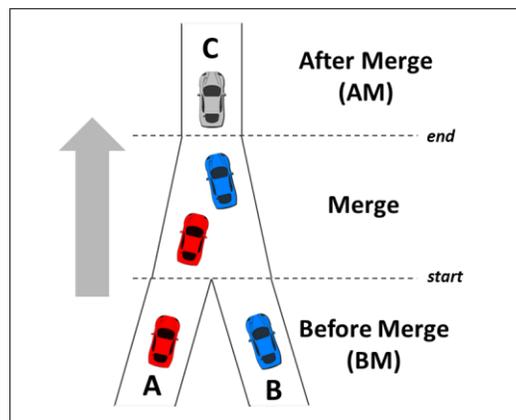


Figura 1.7 Diagrama que ilustra las 3 zonas principales de una convergencia. De abajo hacia arriba se tiene primero la zona donde no hay interacción directa entre las vías que convergerán (Before Merge), posteriormente existe una zona donde se realiza propiamente la unión de los flujos vehiculares de ambas vías (Merge) y finalmente se tiene la zona donde se tiene un único flujo posterior a la unión (After Merge)

Hasta ahora se han visto elementos comunes a todas las convergencias, pero de acuerdo a la reglamentación vial, en base a la prioridad de paso, existen diferentes tipos de uniones, mismos que son tema de la sección siguiente.

1.3.5.2 Tipos de convergencias.

Con base en el trabajo de Yo-Sub Han y Sang-Ki Ko [24] y bajo consideración de las carreteras mexicanas y su reglamentación, se tienen tres casos principales que son:

- i) Rampas de acceso. Como se observa en la figura siguiente, son los puntos donde se ingresa a las vías rápidas, de tal forma que los vehículos en la vía principal tienen derecho de vía (preferencia de paso). Así, puede corresponder a entronques donde se tiene una vía principal a la que se incorporan vehículos desde una vía secundaria. Sin embargo, como es un punto donde se incorporan más autos a la vía principal, el flujo de dicha vía se ve afectado pudiendo originar embotellamientos.

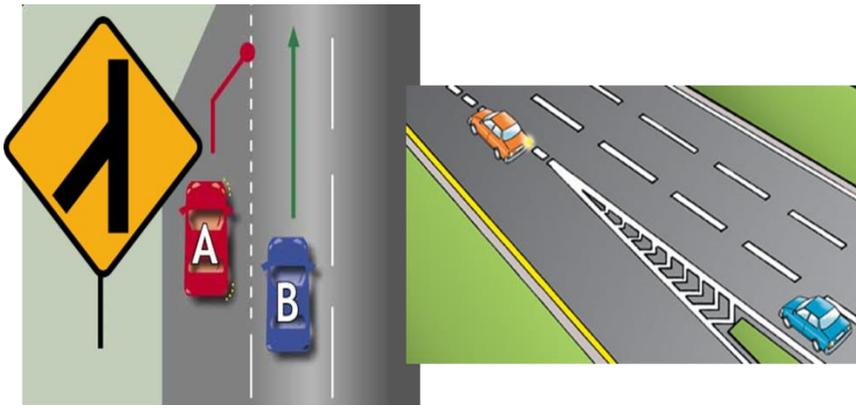


Figura 1.8 Rampa de acceso. Como puede observarse, se ejemplifica una convergencia donde el flujo de una vía se incorpora hacia la izquierda al flujo de otra vía mediante una rampa de acceso. El señalamiento vial mostrado corresponde al utilizado por la SCT para e

- ii) Entronques de vías con la misma prioridad de paso. En este caso se tienen dos vías que convergen sin que exista una preferencia preestablecida para los vehículos que atraviesan dicho punto. A pesar de que este tipo de convergencia no es muy común en nuestras carreteras, sí está presente en varias vías rápidas de las ciudades.



Figura 1.9 Entronque de la autopista de cuota México-Cuernavaca con la carretera a Cuautla. Ambas carreteras se unen en este punto sin que se tenga prioridad de paso (derecho de vía) establecido.

- iii) Reducción de carriles. Son los puntos donde, dentro de una misma vía, dos o más carriles pasan a formar un solo carril. Al reducirse el número de carriles se tiende a originar embotellamientos debido a que se reduce la superficie por la que pueden circular los vehículos.

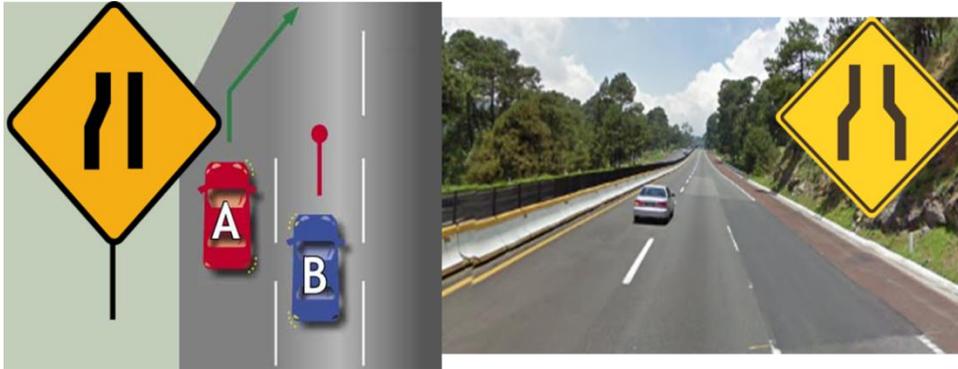


Figura 1.10 Reducción de carriles. El señalamiento de la izquierda representa la reducción de carril a la izquierda, mientras que la fotografía representa la unión de los dos carriles del lado derecho en uno solo. Ambos señalamientos viales mostrados corresponde a los utilizados por la SCT para este tipo de convergencia en las carreteras de México.

En este trabajo se estudiarán las convergencias correspondientes a rampas de acceso, para ello a continuación se analizará con un poco más de detalle la forma de operación y control de tales tipos de convergencias.

1.3.5.3 Control de rampas de acceso (ramp metering)

El control de rampas de acceso (ramp metering) puede ser definido como un método por el cual el tráfico que busca ingresar a una autopista muy demandada, es controlado en el punto de ingreso mediante señales de tráfico [25].

Dicho control tiene como objetivo maximizar la capacidad de la carretera evitando que se congestione al grado de interrumpir el continuo movimiento de los vehículos, esto es busca:

- Controlar el número de vehículos a los que se les permite el acceso a la carretera.
- Reducir la demanda de la carretera.
- Romper los pelotones de vehículos que se forman antes (aguas arriba) de las convergencias.

Lo anterior trae consigo las siguientes ventajas:

- Mejora el funcionamiento del sistema. Dado que reduce los congestionamientos en la carretera, disminuye los retrasos para los vehículos que circulan por ella.
- Mejora la seguridad. Debido a que se controla el ritmo con el que se incorporan los vehículos a la carretera, las incorporaciones se vuelven más suaves y ordenadas, reduciendo el riesgo de accidentes originados por las reacciones repentinas de los conductores.
- Reduce el tiempo de uso de los vehículos y con ello reduce la emisión de contaminantes. Como hay menos congestionamientos y retrasos en los autos que circulan por la autopista, el tiempo que se necesita

mantener encendido el auto disminuye, reduciendo la cantidad de emisiones contaminantes derivadas del uso del auto. Además reduce el desgaste que sufren los autos pues éstos son utilizados menos tiempo.

Sin embargo, la utilización de mecanismos de control de rampas de acceso también puede conllevar ciertas desventajas:

- Se necesita la instalación de más señalamientos de tráfico. Dependiendo el tipo de control de acceso que se emplee, puede ser necesaria la colocación de semáforos, sensores, señalamientos visuales, entre otros. Esto incrementa tanto el tiempo como el costo de los mantenimientos que se necesita realizar a la autopista.
- Aunque es claro que el flujo que circula por la autopista principal a la que se accede mediante la rampa es beneficiado, el flujo vehicular que se encuentra en la vía que alimenta a tal rampa puede verse afectado debido a la operación de los mecanismos de control que pudiesen originar la formación de pelotones en tal vía.

1.3.5.3.1 Estrategias generales de control de rampas de acceso.

Como puede ser apreciado, las ventajas y desventajas que ofrecen las rampas de acceso dependen de la forma en la que funcionen, por lo que son necesarias mediciones que se realizan mediante sensores colocados apropiadamente en la autopista. Los resultados de dichas mediciones están íntimamente ligados a la manera en la que se busca controlar las rampas, puesto que como será visto a continuación, existen diversas estrategias que pueden seguirse para realizar el control de las rampas [25] [26] .

Para una rampa de acceso a una carretera con un solo carril que no cuenta con mecanismos de control, la capacidad estimada de ingreso es de entre 1800 a 2200 vehículos por hora ([veh/h]). Sin embargo al emplear mecanismos de control se reduce tal tasa de ingreso, puesto que precisamente lo que se busca es controlar la cantidad de vehículos a los que se les permite ingresar [25] .

A continuación se presentan tres estrategias mediante semáforos que se emplean para carreteras de este tipo.

Un solo carril y un solo auto por cada luz verde (*Single-Lane One Car per Green*).

Esta estrategia permite que ingrese solamente un auto a la autopista cada vez que la luz del semáforo sea verde.

Sus principales características son:

- La longitud de la luz verde más la amarilla es establecida para asegurar el tiempo suficiente para que un vehículo cruce la línea de detención. La longitud del intervalo de la luz roja debe ser suficiente para asegurar que el vehículo se detiene por completo antes de proceder.
- La duración (longitud) típica más pequeña del ciclo completo del semáforo es de 4 segundos con 1 segundo en verde, 1 segundo en amarillo y 2 segundos en rojo. Con ello se tiene una capacidad de 900 [veh/h].
- Un ciclo típico más precavido es de alrededor de 4.5 segundos, para ello se incrementa el tiempo en rojo a 2.5 segundos, esto produce una capacidad de ingreso de 800 [veh/h].

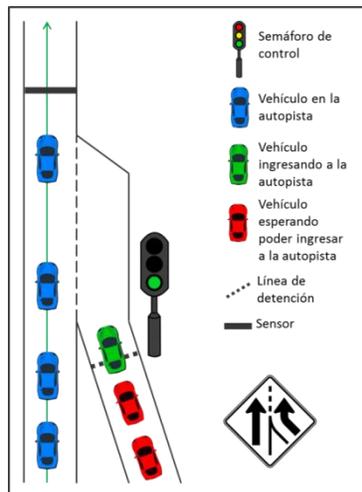


Figura 1.11 Single-Lane One Car per Green.

Un solo carril y múltiples autos por cada luz verde (*Single-Lane Multiple Cars per Green*).

También es conocida como ingreso por pelotón (*platoon metering*) o ingreso en masa (*bulk metering*). En este caso se permite que dos o más vehículos ingresen a la autopista durante cada luz verde. Lo más común es que se permita ingresar dos autos por cada luz verde.

Lo más destacable respecto a esta estrategia es que:

- Aunque puede permitirse ingresar 3 o más vehículos, si se hace se rompe con el objetivo de romper los pelotones que se forman antes de la convergencia sobre la carretera.
- Contrariamente a lo que pudiera pensarse, esta estrategia no produce un aumento drástico de la capacidad respecto a cuándo se permite pasar solamente un auto por cada luz verde. Esto se debe a que esta estrategia requiere duraciones mayores de la luz verde y de la amarilla, resultando en una mayor duración de la longitud total de cada ciclo y consecuentemente, se tiene un menor número de ciclos por cada hora.
- Cuando se permite el paso de dos autos se requiere un ciclo con longitud de entre 6 y 6.5 segundos, dando como resultado una capacidad de ingreso de entre 1100 y 1200 [veh/h]. Esto ilustra que el aumento del número de vehículos que pasan en cada luz verde no varía linealmente la capacidad de ingreso [25].

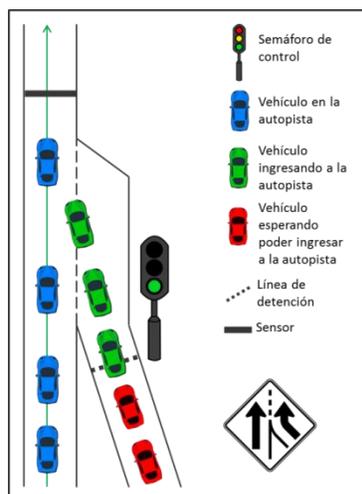


Figura 1.12 Single-Lane Multiple Cars per Green

Rampa de doble carril (*Dual-Lane Metering*).

Como su nombre lo indica, se requiere de una rampa de acceso que cuente con dos carriles, mismos que se unen formando uno solo cuando se encuentran en el área de ingreso a la autopista como se muestra en la figura siguiente.

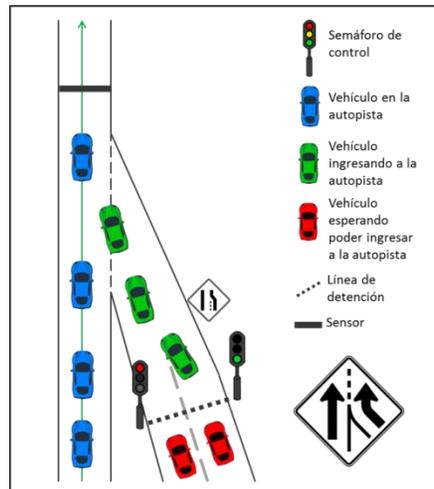


Figura 1.13 Dual-Lane Metering.

En esta estrategia se tiene que:

- Cada carril de la rampa tiene su propio semáforo.
- Se sincronizan los ciclos de ambos semáforos de tal forma que nunca estén en verde simultáneamente.
- Las indicaciones verdes están programadas para permitir un avance constante entre los vehículos de ambos carriles. Con ello se alcanzan capacidades de ingreso de entre 1600 y 1700 [veh/h].
- Además, al tener dos carriles se cuenta con una mayor superficie para vehículos formados en la rampa, por lo que se incrementa la capacidad de autos en espera de ingresar a la carretera.

Hasta aquí se han explicado diferentes estrategias aplicables de manera general a las autopistas, en las cuáles se mencionan algunos tiempos fijos de duración de las luces de los semáforos, pero existe la posibilidad de que dichos tiempos varíen en función de las condiciones actuales de la carretera como se verá a continuación.

Tipos de sistemas para control de rampas de acceso.

A partir de la manera en que se establecen los ciclos de los semáforos de control, existen dos tipos de sistemas diferentes para realizar el control de las rampas de acceso: los fijos y los responsivos.

Sistemas con tiempos fijos (preestablecidos).

En estos sistemas se fija el tiempo de duración de cada luz con base en estudios estadísticos previos de tal forma que se cumpla con una tasa promedio deseada de ingresos a la carretera.

Sus características más notables son:

- Es la forma más simple y económica de realizar control de rampas de acceso tanto a nivel de construcción como de instalación.
- Como su sistema de tiempos está pre-programado, difícilmente funcionará adecuadamente ante condiciones de tráfico eventuales tales como colisiones.

- Es necesario monitorear periódicamente el tráfico para determinar cuándo cambian las condiciones del tráfico de tal suerte que sea necesario realizar ajustes a los tiempos.
- Si se requiere realizar cambios es necesario reprogramar todo el sistema, lo que lo vuelve poco flexible.

Sistemas responsivos al tráfico (adaptativos).

En estos sistemas, los tiempos de las luces de los semáforos se seleccionan con base en mediciones en tiempo real de las variables de tráfico que indican la relación actual entre la capacidad de aguas arriba y aguas debajo de la vía principal.

Las características principales de este tipo de sistema son:

- Este sistema utiliza detectores de lazo para autopistas u otros sistemas de monitoreo para calcular o seleccionar la estrategia más indicada para el control de la rampa en base a las condiciones actuales de la autopista.
- En general se considera que este tipo de sistema es de cinco a diez por ciento mejor que los de tiempos fijos.
- Requiere la instalación de un mayor número de sensores y una mayor infraestructura para operar adecuadamente, por lo que son tradicionalmente considerados como costosos.

Estos sistemas pueden hacerse sensibles al tráfico actual ya sea a nivel local o en todo el sistema como se verá a continuación.

Sensibles al tráfico local.

Son rampas en las que el control se realiza únicamente con los datos que corresponden a algunos metros antes y después de la rampa en cuestión, sin considerar datos de otras rampas ni de otros puntos de la carretera. Por ello, sólo se puede garantizar que se mejora el tráfico en un punto específico de la carretera que es el punto donde se sitúa la rampa.

Se utilizan cuando se desea controlar sólo una rampa de acceso, generalmente esto ocurre porque es la única que resulta crítica para el sistema. También pueden ser usadas cuando se desea tener redundancia en el control de ciertas rampas en caso de que el sistema de control general de la red deje de funcionar.

Sensibles al tráfico global.

Para mejorar los resultados de las rampas con control sensible al tráfico local, se han hecho modificaciones que permiten considerar las condiciones de tráfico en múltiples puntos de la carretera para controlar una o más rampas. Así mismo es posible considerar la situación de tráfico que se tiene en las demás vías que alimentan a la rampa controlada.

Es por lo anterior que son útiles para garantizar las condiciones de tráfico de segmentos completos de la carretera y no sólo de puntos específicos como las que son sensibles al tráfico local.

Típicamente requieren sistemas de comunicación más complejos y costosos que el de los otros tipos de rampas, por lo que su uso no ha sido tan extendido.

1.3.6 Clasificación de los modelos

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 siempre producen los resultados esperados. Esto es porque es muy complicado encontrar una solución analítica buena, y aun 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 1.14, 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 1.14, derecha). Estos modelos son por lo general discretos (finitos y contables) en espacio, en tiempo o en ambos.

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

1.3.6.1 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 [28].

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. 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 [29]. 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 y a las teorías de gas-cinético.

1.3.6.2 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 [29]. 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. 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

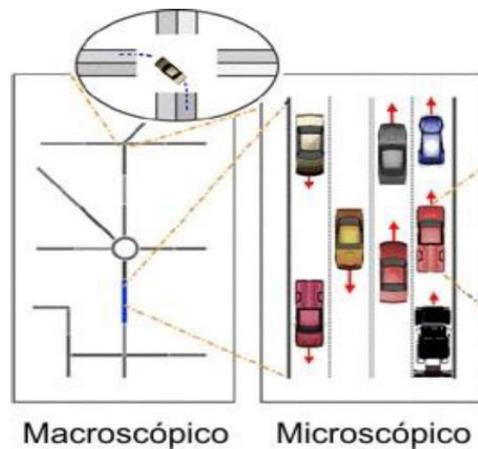


Figura 1.14 Clasificación de los modelos de tráfico vehicular con base en el nivel de detalle.

Otra caracterización se basa en las propiedades usadas para describir un sistema de vehículos, es decir, el espacio, tiempo y variable de estado (por ejemplo, la velocidad). Cada uno de estos pueden ser o bien discretos (es decir, un número entero) o continuos (es decir, un número real). El tiempo discreto es usualmente realizado a través de un cambio paralelo o síncrono, donde todas las partículas o sitios se mueven al mismo tiempo. Esto introduce una escala de tiempo que puede usarse para calibrar los modelos. Los modelos que son discretos en todas las variables se llaman usualmente autómatas celulares. Las interacciones entre los vehículos se pueden implementar en al menos dos formas: En una aproximación basada en reglas los conductores hacen decisiones con base en el comportamiento en su situación actual, su vecindad, las metas, etc. Estas reglas son por lo tanto motivadas frecuentemente por psicología. En contraste, los modelos basados en fuerzas especifican interacciones directamente sobre el nivel de ecuaciones de movimiento, similar a la mecánica clásica aunque las no son necesariamente físicas. Ejemplos típicos son los modelos de seguimiento del vehículo (car-following) y los modelos hidrodinámicos [28] [29] [30]

La dinámica de los vehículos puede o bien ser determinística o estocástica. En el primer caso el desempeño en tiempos futuros es completamente determinado por el del pasado. En los modelos estocásticos, el desempeño se controla por probabilidades y los agentes pueden reaccionar de manera diferente ante la misma situación. Las reglas de desempeño estocástico conducen normalmente a una representación más real del desempeño actual. Finalmente se puede distinguir los modelos de acuerdo a su fidelidad, la cual refiere el realismo aparente de la aproximación. Los modelos de fidelidad alta capturan la complejidad de la toma de decisiones, las acciones, etc.; que reproduce el desempeño del conductor en una forma real. En contraste, en los modelos más simples, los vehículos (conductores se representan por partículas sin inteligencia alguna. Por lo tanto, se debe distinguir entre modelar, que implica la identificación de los mecanismos fundamentales responsables del fenómeno observado e imitación, que es la reproducción de los fenómenos sin alguna característica adicional.

Una vez que se han introducido los conceptos fundamentales para el entendimiento de este trabajo de tesis, el siguiente capítulo describe el estado del arte de la modelación de tráfico vehicular basada en AC

2 Modelación de Tráfico Vehicular con Autómatas Celulares, Estado del Arte

Desde hace algunos años se han empleado modelos basados en AC para entender, analizar, diagnosticar y predecir el comportamiento de los vehículos al circular por una vía, incluyendo elementos que con otros modelos resultan difíciles de incorporar, tales como aspectos psicológicos de los conductores [31] [32]. Para ello, se ha aprovechado el hecho de que los AC se basan en reglas locales por lo que se puede reproducir el efecto de las interacciones locales de manera eficiente y natural.

La propuesta inicial de modelos de AC para modelar el tránsito vehicular es de Gerlough [33] y ha sido extendido por Cremer [34] y colaboradores.

A continuación se abordarán los modelos que han servido como fundamento para el modelo desarrollado en esta tesis.

2.1 Modelo NaSch

Se conoce como modelo NaSch al primer modelo que aprovechó los AC para simulación de tráfico. Fue propuesto en 1992 por Kai Nagel y Michael Schreckenberg, quienes emplearon un AC probabilista capaz de reproducir muchas de las características del tráfico vehicular en carreteras. (Nagel, et.al., 1992) [3].

El modelo consiste de N vehículos moviéndose en una sola dirección sobre una red unidimensional de L celdas con condiciones de frontera periódicas. Como puede apreciarse en la figura siguiente, la longitud típica de una celda (Δx) es de 7.5 [m] que corresponde al espacio típico ocupado por un vehículo en un estancamiento, esto es la longitud de un vehículo más la distancia al vehículo precedente. Por otra parte, el gap (el espaciamiento entre vehículos) es el número de celdas vacías que los separan (Figura 2.1).

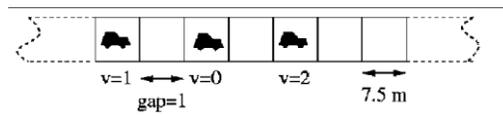


Figura 2.1 Ejemplo de una sección de calle representada mediante el modelo NaSch

Cada celda puede estar vacía u ocupada por exactamente un vehículo que viaja con una velocidad discreta v que toma valores $v = 0, 1, 2, \dots, v_{max}$. Siendo v_{max} la velocidad discreta límite considerada en el modelo, que originalmente tiene un valor discreto de 5 y que es equivalente a 135km/h.

Dado que se trabaja tanto con espacio como tiempo discreto, se emplean unidades acordes a ello, expresándose

la distancia d como un número de celdas y la velocidad v como el número de celdas que se desplaza un vehículo en un paso tiempo. Además, cada paso de tiempo (Δt) corresponde a 1 segundo, por lo que cuando se realizan comparaciones del tipo $v < d/\Delta t$ suele omitirse Δt , quedando simplemente como $v < d$.

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, $d_i := x_p - x_i - l$ denota la distancia (número de celdas vacías) enfrente del vehículo en la posición x_i .

En cuanto a la evolución del autómata, esto es la transición de estado en cada paso de tiempo $t \rightarrow t + 1$, es decir, el cambio de velocidad y posición de los vehículos, está definido mediante el siguiente conjunto de reglas, mismas que se aplican a los N vehículos del sistema mediante una dinámica paralela.

R1: Aceleración

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

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

R2: Desaceleración

Si $d_i < v_i$ la velocidad del vehículo i se reduce a d_i . Así, 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:

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

R4: Movimiento del vehículo

Tras la aplicación de las reglas R1 a R3, se tiene calculada una nueva velocidad v_i por lo que se procede a que cada vehículo i se mueve hacia adelante de conforme a su nueva velocidad:

$$x_i \rightarrow x_i + v_i$$

En síntesis, la regla R1 refleja la tendencia general de los conductores a conducir tan rápido como sea posible sin exceder la velocidad máxima límite. Por su parte la regla R2 es responsable de evitar colisiones entre los vehículos. A su vez, 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 congestionamientos.

Los parámetros del modelo son: la velocidad máxima v_{max} , el parámetro de desaceleración R y la densidad global ρ . Así mismo, se establece un estricto orden en la aplicación de las reglas de transición por lo que un cambio en el orden de éstas cambiaría las propiedades del modelo, esto es, las reglas no se pueden conmutar.

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. Debido a ello, se han desarrollado diversas modificaciones o extensiones del mismo (tratados por A. Schadschneider, et. al. [32] y ejemplificados en las referencias [35] [36] [37]). Sin embargo, la mayoría de estos modelos se han sido orientados a reproducir los fenómenos particulares que ocurren en el tráfico vehicular y raramente han considerado una velocidad de desaceleración limitada. Lo que es más, 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 [32] [38].

No obstante, en el año 2010 se propone un nuevo modelo basado en AC en el que se introduce 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 (nombrado LAI por las iniciales de los apellidos de sus autores) y su extensión a varios carriles serán tratados a continuación, ya que es esencial para los modelos que se proponen en este trabajo de tesis.

2.2 Modelos LAI

2.2.1 Modelo para un solo carril

Lárraga y Álvarez-Icaza propusieron un nuevo modelo de AC para el flujo de tráfico vehicular de un carril [39] [40], siendo una de las principales aportaciones el hecho de que incorpora parámetros para incluir las reacciones de conductores, además algunos de los parámetros requeridos pueden ser pre-calculados por lo que el tiempo de procesamiento mejora respecto a otros modelos. Las reglas del modelo toman en cuenta el espaciamiento vehicular y las velocidades relativas entre dos vehículos e incorpora capacidades de aceleración/desaceleración vehicular con un valor límite que se establece con base en el desempeño de los vehículos reales tomando en consideración aspectos de ingeniería de transporte. Así, el modelo corrige los desempeños de aceleración y desaceleración irreales, reflejando más fielmente el desempeño real de conductores y de sus vehículos, siendo esa su principal característica [41].

Además, el modelo es capaz de reproducir la mayoría de los hallazgos empíricos reportados en la bibliografía, incluyendo los tres estados del flujo de tráfico vehicular, la velocidad de salida del frente de un congestionamiento y diferentes patrones de tráfico congestionado inducidos por un sistema con condiciones de frontera abierta con una rampa de entrada.

Las dinámicas para el modelo 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 solo 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.

De manera análoga al modelo NaSch, en el modelo LAI se asume que los vehículos se mueven en una sola dirección, de aquí en adelante se considerará que 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, sin embargo es importante notar que en este modelo los vehículos pueden ocupar más de una celda. La velocidad de cada vehículo puede tomar uno de los $(v_{max} + 1)$ valores enteros permitidos $v = 0, 1, \dots, v_{max}$. Por simplicidad, solo se considera un tipo de vehículo y por lo tanto, la misma velocidad máxima es empleada en todos los vehículos. De igual forma se considera una misma capacidad máxima de frenado (M)

Manteniendo la simplicidad computacional de los modelos de AC, este modelo introduce un conjunto de reglas para actualizar la velocidad de los vehículos, mediante la incorporación de tres umbrales importantes que determinan las distancias de seguimiento seguro que deben existir entre un vehículo y su predecesor para acelerar (d_{acc}), desacelerar (d_{dec}) o mantener su velocidad (d_{keep}) en el siguiente paso de tiempo; cuyos valores pueden tenerse precalculados en tablas de tal forma que no se comprometa la eficiencia computacional del modelo. Para la definición de estos umbrales de seguridad, el modelo toma en cuenta el espaciamiento existente entre dos vehículos (el vehículo $\langle n \rangle$ y el vehículo de enfrente $\langle n+1 \rangle$), su velocidad relativa y capacidades de aceleración/desaceleración con un valor límite acorde al comportamiento de los vehículos en la realidad.

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 seguimiento se definen por las siguientes ecuaciones:

$$d_{acc} = \max(0, \sum_{i=0}^{(v_n(t)+\Delta v)_{divM}} [(v_n(t) + \Delta v) - i * M] - \sum_{i=0}^{(v_{n+1}(t)-M)_{divM}} [(v_{n+1}(t) - M) - i * M]) \quad (2.1)$$

$$d_{keep} = \max(0, \sum_{i=0}^{(v_n(t))_{divM}} [v_n(t) - i * M] - \sum_{i=0}^{(v_{n+1}(t)-M)_{divM}} [(v_{n+1}(t) - M) - i * M]) \quad (2.2)$$

$$d_{dec} = \max(0, \sum_{i=0}^{(v_n(t)-\Delta v)_{divM}} [(v_n(t) - \Delta v) - i * M] - \sum_{i=0}^{(v_{n+1}(t)-M)_{divM}} [(v_{n+1}(t) - M) - i * M]) \quad (2.3)$$

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 (2.1), (2.2) y (2.3) 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 dichas ecuaciones 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 (2.1), (2.2) y (2.3) 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.

Es importante resaltar que para un tamaño de celda dado, todos los cálculos envueltos en las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3) pueden ser ejecutados fuera de línea. Tras realizar dichos cálculos, 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.

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

S1: Distancias seguras. Obtener el valor para

$$\begin{aligned} d_{dec_n} &= d_{dec}(t, v_n(t), v_{n+1}(t)), \\ d_{acc_n} &= d_{acc}(t, v_n(t), v_{n+1}(t)) \\ d_{keep_n} &= d_{keep}(t, v_n(t), v_{n+1}(t)) \end{aligned}$$

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

$$R_a = \min(R_d, R_0 + v_n(t) \cdot (R_d - R_0)/v_s) \quad (2.4)$$

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 $d_n(t) > d_{acc_n}$, la velocidad del vehículo n es incrementada aleatoriamente en Δv con probabilidad R_a

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

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

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

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

S3c: Desaceleración. Si $d_{keep_n} > d_n(t) > d_{dec_n}$ 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. 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 $\Delta x = 2.5$.

La regla S1 es el punto inicial de este modelo de AC donde se realiza el cálculo de las tres distancias de seguimiento seguro mencionadas anteriormente y que están determinadas por las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3), las cuales permiten un manejo seguro.

En el paso S2 se 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 la velocidad umbral lenta (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. El parámetro estocástico $R_a (< 1)$ 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 siguiente). Entonces la regla S2 alternativamente sugiere que los vehículos que salen del frente de un congestionamiento aceleraran suavemente y entonces, el comportamiento de los vehículos en esta situación se reproduce: un conductor frecuentemente 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 .

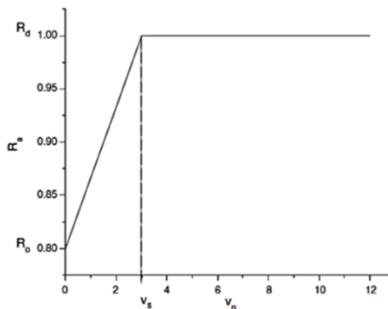


Figura 2.2 El parámetro estocástico R_a interpola linealmente entre R_0 y R_d si v_n es más pequeña que la velocidad lenta v_s

La regla S3a postula que todos los conductores se esfuerzan por alcanzar la máxima velocidad cuando les es posible. Así mismo, 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 de las fluctuaciones de tráfico vehicular resultantes del factor humano en forma estocástica (parámetro R_a , definido en la ecuación 2.4, en el paso S2). El factor estocástico dado por el parámetro R_a , involucra una aceleración retardada como función de la velocidad de los vehículos, la cual afecta el comportamiento de los vehículos detenidos (como la regla arranque lento o *slow-to-start*), así como también afecta los vehículos en movimiento. Así, 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 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.

Por su parte la regla S3b refleja el hecho de que los conductores intentarán mantener su velocidad si ellos perciben la distancia con el vehículo de enfrente como segura. Así mismo, 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 con lo cual se evita la aplicación de un frenado doble.

Mediante la regla S3c se reproduce el fenómeno de que el conductor aplique desaceleración moderada cuando percibe que el espacio que separa a su vehículo del de enfrente llega a ser relativamente pequeño. Es importante notar 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 . Con lo cual son evitadas las desaceleraciones abruptas.

A través de la regla S3d se tratan los casos de desaceleración de emergencia para evitar colisiones (cuando un conductor percibe que el vehículo de enfrente desacelera súbitamente o que el vehículo al que se aproxima está detenido). 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 permite a los conductores reaccionar a un frenado de emergencia del vehículo conductor (vehículo de enfrente) 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 conforme a la literatura de ingeniería de transporte [41] [42] [43]) y será alcanzado en un paso de tiempo. Entonces el parámetro M tomará valores de $M = 5/\Delta x$.

Las reglas de S3a a S3d están diseñadas para actualizar la velocidad de los vehículos mientras que la regla S4 actualiza la posición. Por lo que, la actualización del estado se divide en 2 etapas, primero la velocidad y segunda la posición.

Es apropiado resaltar que el parámetro M puede tomar diferentes valores de acuerdo al tipo de vehículo considerado (autos, autobuses, etc.) sin la necesidad de modificar el modelo, con lo cual pueden ser considerados vehículos con diferentes capacidades de frenado. 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.

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.

Finalmente, 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 2.1 junto a 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 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 2.1 Descripción de los parámetros y variables del modelo LAI para un solo carril.

Hasta ahora se ha tratado el modelo LAI considerando un solo carril con vehículos homogéneos, esto es con la misma longitud y la misma capacidad de frenado. A pesar de haber mostrado muy alentadores resultados, si se busca tener un modelo que permita estudiar fenómenos más complejos de las redes reales de transporte, es necesaria la extensión del modelo para considerar elementos adicionales. Por ello, en años recientes se trabajó en incorporar la consideración de vehículos heterogéneos y vías con varios carriles dando origen al modelo LAI multicarril, que es el tema que se tratará en la siguiente sección.

2.2.2 Modelo multicarril

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 [44] ; Helbing, et.al., 1998 [45] ; Knospe, et.al., 1999 [46]). Otro elemento a tomar en cuenta 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 este fenómeno (Gang, et.al., 2006) [47] .

Tomando en consideración lo anterior, se propuso una extensión del modelo LAI que trabaja sobre vías de varios carriles y vehículos heterogéneos (H. Guzmán, et. al. 2012 [48] y [49]). Este nuevo modelo hereda las cualidades del modelo LAI de un solo carril, para lo cual en las reglas de cambio de carril se incluyen distancias y velocidades relativas tanto para el vehículo precedente como para el vehículo sucesor, siendo este un gran aporte ya que no existían otros modelos en la literatura que lo llevaran a cabo. Otra innovación de este modelo es que 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.

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.

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.

Particularmente, este modelo se basa en las normas de vialidad para las carreteras en México, donde se identifican dos mecanismos que conducen a una asimetría entre los carriles en las carreteras:

- (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.

En la siguiente tabla y la figura correspondiente se establecen las variables relevantes para las reglas de cambio de carril:

Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción
n	Vehículo en estudio	$d_{keep}(v_n, v_f)$, $d_{acc}(v_n, v_f)$	Distancias de seguimiento seguro para mantener velocidad y acelerar, respecto a las velocidades de los vehículos n y f .
f	Vehículo que se encuentra enfrente del vehículo n en el mismo carril	$d_{keep}(v_n, v_f)$, $d_{acc}(v_n, v_f)$	Distancias de seguimiento seguro para mantener velocidad y acelerar, respecto a las velocidades de los vehículos n y f .
lb	Vehículo que se encuentra a la izquierda y atrás del vehículo n	$d_{keep}(v_n, v_{rf})$	Distancia de seguimiento seguro para mantener velocidad, respecto a las velocidades de los vehículos n y rf .
lf	Vehículo que se encuentra a la izquierda y adelante del vehículo n	$d_{dec}(v_{lb}, v_n)$	Distancia de seguimiento seguro para desacelerar, respecto a las velocidades de los vehículos lb y n .
rb	Vehículo que se encuentra a la derecha y atrás del vehículo n	$d_{dec}(v_{rb}, v_n)$	Distancia de seguimiento seguro para desacelerar, respecto a las velocidades de los vehículos rb y n .
rf	Vehículo que se encuentra a la derecha y adelante del vehículo n	$gap_{n,f}$	Distancia espacial entre los vehículos n y f
v_{max}	Velocidad máxima permitida	$gap_{n,lf}$	Distancia espacial entre los vehículos n y lf
$v_n, v_f, v_{lb}, v_{lf}, v_{rb}, v_{rf}$	Velocidad de los vehículos n, f, lb, lf, rb y rf , respectivamente	$gap_{nr,f}$	Distancia espacial entre los vehículos n y 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)	$gap_{lb,n}$	Distancia espacial entre los vehículos lb y n
p_{change}	Probabilidad del cambio de carril. Este valor es diferente para cada tipo de vehículo y carril destino	$gap_{rb,n}$	Distancia espacial entre los vehículos rb y n

Tabla 2.2 Descripción de las variables y parámetros del modelo LAI para varios carriles.

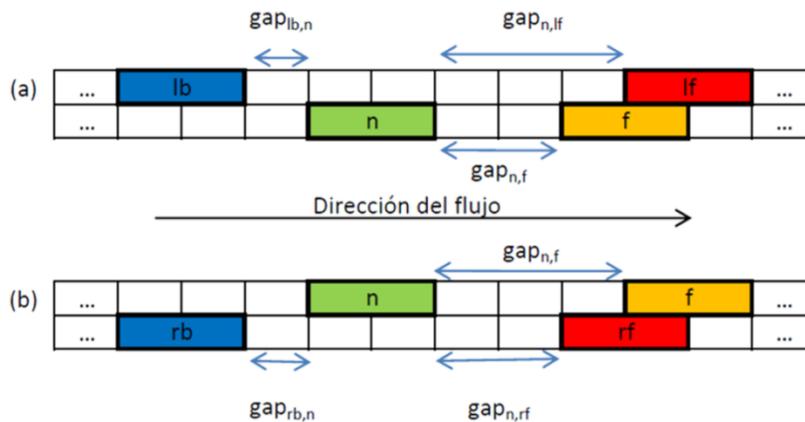


Figura 2.3 Vecinos de un vehículo n considerados en un cambio de carril. (a) Un vehículo que va a cambiar a la izquierda, debe considerar el vecino de enfrente f , el vecino de enfrente a la izquierda lf y el vecino de atrás a la izquierda lb . (b) Un vehículo que va a cambiar a la derecha, debe considerar el vecino de enfrente f , el vecino de enfrente a la derecha rf y el vecino de atrás a la derecha rb

Para operar el cambio al carril izquierdo se realizan los siguientes pasos:

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

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

Criterio de seguridad.

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

entonces $cl_n = izq$

Paso 3. Realizar el cambio de carril

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

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 únicamente 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).

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, aun 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. Esta probabilidad puede establecerse en función del tipo de vehículo; además de que influye en la reproducción del fenómeno de inversión de uso de carril y ayuda a reducir el efecto ping-pong

A su vez, para el cambio al carril derecho se realizan los siguientes pasos:

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

Criterio de seguridad.

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

entonces $cl_n = der$

Paso 3. Realizar el cambio de carril

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

Bajo las reglas anteriores, 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 mantener 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 para un solo carril que fueron descritas previamente. En particular, debido a que la definición de la distancia de seguimiento seguro d_{keep} considera el peor escenario posible, la regla 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, aun 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 precisamente p_{change} el único parámetro que se adicionó al modelo LAI de un carril para obtener esta extensión para múltiples carriles, por lo que los parámetros del modelo son los que se resumen en la tabla mostrada a continuación.

Parámetro	Descripción
v_{max}	Velocidad máxima
v_s	Velocidad lenta
l_s	Longitud del vehículo (en celdas)
M	Disminución máxima de velocidad en un paso de tiempo
R_s	Probabilidad de frenado aleatorio
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
p_{change}	Parámetro estocástico que determina la probabilidad de realizar o no un cambio de carril

Tabla 2.3 Descripción de los parámetros del modelo LAI para múltiples carriles

En el modelo LAI de un solo carril 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. 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 original, 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

Cabe destacar que esta extensión del modelo LAI preserva la simplicidad que caracteriza a los modelos basados en AC, hecho que aunado a que las reglas de la dinámica vehicular son aplicables de forma paralela a cada vehículo, hace que sea posible implementar todo el modelo utilizando cómputo paralelo. Para tal efecto puede consultarse el apéndice A.

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 [49]. No obstante, en la búsqueda de obtener un modelo que sirva como base para estudiar redes de carreteras completas, es indispensable considerar elementos donde convergen dos o más carreteras. Por tal motivo, en la sección siguiente se hará una breve revisión de las principales características de algunos modelos existentes que abordan la modelación de convergencias.

2.3 Modelación de rampas y otros trabajos relacionados.

Dentro del tráfico, un cuello de botella es una sección de vía con una capacidad vehicular drásticamente reducida respecto a otras secciones de la misma vía. De tal manera que, los cuellos de botella son conocidos por ser la razón de la mayoría de las interferencias en el tráfico de las carreteras, tal es el caso de las congestiones que se forman aguas arriba de, por ejemplo, las rampas de acceso o de las reducciones de carril. Por lo tanto, el análisis del tráfico en estos cuellos de botella especialmente en una rampa de entrada es de sumo interés [50]. Como se mencionó en el apartado 1.3.3 de este documento, las características complejas que se pueden ver en el tráfico del mundo real en la proximidad de una rampa de entrada son importantes para comprender la manera en que este conocimiento se puede aplicar para estudiar el comportamiento del tráfico donde confluyen dos vías, además de potencializar el aumento de la eficiencia de las rampas de acceso, por ejemplo por medio de procedimientos de control de rampas de acceso (*ramp metering*).

Existen diversos métodos para describir el comportamiento de un vehículo al ingresar a una vía principal desde una rampa, algunas investigaciones lo hacen a través de una manera muy sencilla en la cual los vehículos son simplemente insertados, con una frecuencia determinada, de manera directa dentro de la autopista [51] [52] [53]. Sin embargo dichos modelos no se asemejan a la realidad ya que no modelan la rampa en sí misma, si no únicamente el ingreso de vehículos a la vía principal. Para describir de una forma más real los sistemas con rampas de acceso. Jia et al. [54] estableció un modelo en el que se incluye un carril de aceleración, en este tipo de modelos los vehículos de la rampa tienen que cambiar de carril hacia la vía principal, por lo que se necesitan reglas de cambio de carril adecuadas para modelar el comportamiento real del tráfico en la rampa.

Hay otro tipo de modelos con CA donde se realiza una discretización más fina del espacio, permitiendo que un vehículo ocupe un grupo de celdas consecutivas [55] [56]. En este tipo de modelos se disminuye el ritmo de aceleración ya que el tamaño de las celdas se reduce. Con esto se pueden describir comportamientos más realistas de los conductores, tales como el retardo en la aceleración y efectos de anticipación. Sin embargo, a pesar de que se ha realizado mucha investigación en el campo de la simulación de tráfico, son pocos los modelos que ha logrado incorporar las convergencias vehiculares, especialmente en los modelos de autómatas celulares [57] [58]. Además, al ser en su mayoría modelos basados en el modelo NaSch, la influencia de defectos como las reducciones abruptas e instantáneas de velocidad se han seguido acarreado [51]. Así mismo, se han desarrollado otros trabajos en los que se estudian los cuellos de botella, pero para lograr los escenarios deseados se ha recurrido a reglas que van directamente encaminadas a generar artificialmente tales congestionamientos (ver referencias [32], [58], [59], y [60]), sin que estos se produzcan de manera natural por la interacción propia de los vehículos y las reacciones de sus conductores.

Por otra parte, al buscar mantener la simplicidad propia de los autómatas celulares, en las investigaciones citadas

en el párrafo anterior, se ha optado por estudiar las convergencias pero únicamente incluyendo vías de un solo carril. Sin embargo, para una aproximación más realista al tráfico vehicular es necesaria la inclusión de vehículos que circulan por dos o más carriles. En este sentido se reportan en la literatura muy pocas aproximaciones, siendo relevante el trabajo de W. Knospe, L. Santen, et. al. [61]. En el que se estudia el fenómeno de congestionamientos en vías de dos carriles con vehículos heterogéneos, tanto con reglas de cambio de carril simétricas como asimétricas. Asimismo, pese a que toma como punto de partida el modelo NaSch, explora extensiones del modelo que permiten la inclusión de reglas de anticipación, diferentes secuencias y diferentes criterios en la realización de los cambios de carril. No obstante y a pesar de todas sus bondades, se identifican dos importantes carencias en dicha investigación, la primera es que se reporta que no logran reproducir con fidelidad el comportamiento del tráfico real en aspectos tales como la densidad de cada tipo de vehículo por carril y el fenómeno conocido como inversión de carril. La segunda es que no contempla ningún tipo de convergencia, por lo que no se posibilita la extensión del modelo para emplearlo en una red vial completa donde existan varias carreteras que confluyan.

A su vez, existen algunos trabajos en los que se consideran diversos elementos que pueden intervenir en una red carretera, como el caso de M. Treiber [62] quien, en colaboración con otros investigadores y desde hace más de una década, ha trabajado en modelos que va incorporando a un simulador interactivo en el que puede apreciarse de forma gráfica los efectos de las variaciones de algunos parámetro tales como la velocidad máxima, la capacidad de frenado, el flujo en la vía primaria y el de una rampa de acceso, entre otros. Aunque es sin duda un trabajo tanto muy interesante como bien cimentado que al día de hoy ha alcanzado un importante grado de madurez y que por todo ello podría tomarse como referencia para construir un simulador de redes carreteras completas, tal investigación se enfoca en la reproducción de fenómenos únicamente a escala macroscópica a partir de la adaptación de modelos de la teoría cinética de gases al tráfico vehicular, mediante ecuaciones de equilibrio. Por lo que, debido a que dicha teoría se encarga de explicar el comportamiento y las propiedades macroscópicas de los gases, no se vislumbra la posibilidad de adaptar sus modelos para trabajar a nivel microscópico con tráfico vehicular contrastando con los modelos basados en AC que tienen la bondad de permitir representar de forma natural la interacciones a nivel microscópico.

En lo referente a la simulación de redes viales, hay muy pocas aproximaciones que partan de un nivel microscópico, siendo destacado el trabajo de J. Wahle, L. Neubert, y M. Schreckenberg [63] quienes a partir del modelo NaSch, lograron la simulación de una red completa que corresponde a la ciudad de Duisburg, Alemania. Para ello consideran a la red como un grafo como el de la figura siguiente, donde cada vía es representada como un vértice, mientras que cada nodo interno corresponde a un punto donde convergen dos o más vías y los nodos que se encuentran en las fronteras (identificados con letras) corresponden a puntos donde los autos ingresan (fuentes o *sources*) o salen (sumideros o *drains*) de la red.



Figura 2.4 Esquema de la red vial simulada de Duisburg. Los puntos negros indican la colocación de puntos de control que se emplean en el conteo de vehículos y en la obtención de resultados

Como mencionan los propios autores, los nodos internos que son los que corresponden a convergencias y divergencias en la red, son puntos de especial consideración. En su investigación optaron por establecer que en cada uno de tales nodos, cada vehículo que pase decidirá aleatoriamente por cuál vía continúa su camino, intentando mantenerse apegados a las mediciones del comportamiento real que se tienen para esa red.

Para perturbar el flujo de la red se incorporaron puntos de control en algunas vías, en dichos puntos ingresan o salen vehículos en sintonía con el hecho de que en un ciudad hay vehículos que se encontraban dentro de estacionamientos y que se incorporan a la circulación, o bien, autos que ingresan a un establecimiento donde se estacionan dejando de participar en el flujo activo de la red. En el caso de una red carretera, la equivalencia a estos puntos de control se tiene en las rampas de acceso y las rampas de salida, pues en esos puntos ocurre un fenómeno análogo al antes citado: ingresan nuevos vehículos que se incorporan al flujo de la red principal o salen vehículos de la red dejando de participar en el flujo principal.

Es de importancia mencionar que este modelo alemán fue implementado exitosamente mediante cómputo paralelo gracias a que las reglas en las que se basa (que son las del modelo NaSch) son paralelizables. Así mismo, los resultados que reportan de sus simulaciones para el tráfico de días laborables son cualitativamente cercanos a los datos estadísticos que se tienen del tráfico real en esa red. Sin embargo, en el caso de los días no laborables, sus resultados se alejan un poco más de la realidad en el sentido de que los resultados de la simulación son más homogéneos que los reportados de la realidad. Este hecho está relacionado con que en su investigación se consideraron vías de un solo carril con vehículos homogéneos, por lo que no se logran reproducir las variaciones que se originan por los cambios de carril y el comportamiento diferenciado de los vehículos.

Así, tras haber revisado una amplia variedad de modelos, se observa que no existe un único modelo que pueda ser considerado como mejor en todos los aspectos, ya que de una u otra forma, todos tienen áreas de oportunidad en las que queda trabajo por hacer. Sin embargo, tomando como referencia todo lo expuesto hasta este punto y con la finalidad de sentar las bases de un simulador en línea que sea aplicable a la dinámica vehicular de México, en el presente trabajo de tesis se propone una adaptación de los modelos LAI en el que se considere el comportamiento de los vehículos que ingresan a una convergencia, manteniendo las bondades de los modelos LAI previos pero potencializando su alcance. En el capítulo subsecuente se explicará este nuevo modelo propuesto.

3 Modelo basado en AC para convergencias en vías de varios carriles con rampa de acceso

Como ya se mencionó en el capítulo 1, las convergencias son puntos de especial interés en la investigación de tráfico vehicular, ya que alrededor de ellas se originan muchos de los embotellamientos viales que afectan la circulación a través de las carreteras. Este fenómeno repercute en costos económicos (aumenta el gasto en el traslado de mercancías y personas), ambientales (una mayor emisión de gases producidos por los vehículos automotores) y sociales (deterioro de la calidad de vida de las personas que necesitan trasladarse para llegar a sus centros de trabajo, estudio y esparcimiento), además de que sirven como punto de unión entre carreteras llegando a formar redes viales complejas cuyo estudio es de interés al buscar soluciones efectivas que trabajen a nivel global con el problema del tráfico.

En este capítulo se presenta un modelo nuevo para el análisis del tráfico vehicular con una rampa de acceso. El sistema a modelar consiste de una vía principal de dos carriles, con reglas de cambio de carril asimétricas y con una rampa de acceso de un solo carril. Con la finalidad de representar de mejor manera el proceso de toma de decisión del conductor cuando se incorpora a la vía principal, el modelo extiende el modelo LAI [48] [49] estudiado en el capítulo anterior. Dos casos de estudio se consideran: El primero se refiere a un sistema con una rampa de acceso sin algún mecanismo de control, tal que el ingreso de los vehículos a la vía principal se determina por la definición de las reglas que definen al modelo LAI multicarril. Mientras que el segundo caso de estudio se refiere a una vía de dos carriles con una rampa de acceso controlada por un semáforo de tiempo fijo. El nuevo modelo hereda las consideraciones de anticipación de la velocidad y la incorporación de aceleraciones y desaceleraciones de los vehículos con un valor límite semejante al de los vehículos reales. Dos tipos de vehículos, autos y camionetas, con diferente velocidad límite y longitud se consideran para la simulación. Resultados de simulación sobre una vía con condiciones de frontera abierta y su correspondiente análisis estadístico es presentado para evaluar el desempeño del modelo.

3.1 Consideraciones Previas

En las páginas siguientes se establecen algunos criterios bajo los que se han diseñado los modelos que se proponen en esta tesis. Primero se presenta el tipo de modelo con el que se representará la rampa de acceso y después el tipo del conjunto de reglas de cambio de carril.

Tanto para el análisis de los escenarios como para abstraer el comportamiento de los vehículos involucrados en los mismos, se han tomado en cuenta varios aspectos mencionados en los diferentes modelos tratados dentro del estado del arte en el capítulo anterior. Además, existe un trabajo de Li Xin-Gang, et. al. [64] en el que se dividen en dos las aproximaciones al estudio de rampas de acceso mediante modelos basados en AC, los cuáles se muestran en la Figura 3.1.

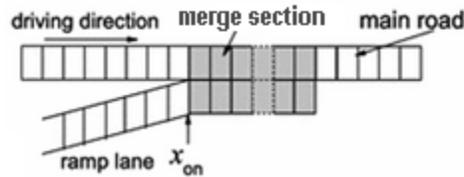


Figura 3.1 Esquema de la rampa de acceso representada con AC. La sección de rampa o de *merge* corresponde a la zona donde entran en contacto los vehículos que provienen de la rampa de acceso con los que circulan por la vía principal.

Para representar la rampa de acceso, el modelo agrega un carril de aceleración o de rampa (*acceleration lane* o *ramp lane*) adyacente al carril principal (ver Figura 3.1). Ambos carriles entran en contacto a partir de la posición x_{on} y se origina una zona de unión (*merge section*), donde los vehículos procedentes del carril adyacente (quienes conforman el flujo de la rampa de acceso) se incorporan al flujo que circula por la vía principal por el carril de más a la derecha. Sin embargo y conforme a lo que se observa en la realidad, los vehículos que viajan por el carril principal no pueden cambiarse de carril hacia el carril de la rampa. Una desventaja de esta aproximación es que las reglas de cambio de carril aumentan en complejidad al ser necesaria la evaluación de posiciones y/o velocidades relativas entre los vehículos, como se aprecia en la investigación realizada por Yo-Sub Han, et. al. [65]. No obstante, este tipo de modelos tiene la ventaja de introducir los vehículos de una forma más natural, ya que es la propia interacción de los vehículos dentro de la zona de *merge* la que define el momento y las condiciones con las que los autos de la rampa se integran al flujo de la vía principal en base a las reglas con las que se defina la dinámica vehicular del modelo.

Dado que tras la zona de *merge* el carril adyacente termina, en ciertos modelos los vehículos que circulan por tal carril actúan con una mayor agresividad para cambiarse de carril, esto fue estudiado previamente por Li Xin-Gang, et. al. [66], donde empleando el modelo NaSch se llega a la conclusión de que un comportamiento muy agresivo ocasiona deterioro en las condiciones de tráfico tanto en el carril principal como en la rampa de acceso, mientras que si se disminuye la agresividad se mejoran las condiciones del carril principal pero con una mayor afectación del flujo en la rampa. Es un hecho que las reglas del modelo que se refieren a la incorporación de los vehículos a la vía principal son un punto clave a considerar para lograr un modelo más fiel al desempeño como ocurre en la realidad.

En lo siguiente, se describen los modelos que se proponen en este trabajo de tesis para la modelación del flujo vehicular en una vía de dos carriles con una rampa de acceso.

3.2 Modelación de una rampa de acceso sin un mecanismo de control

En esta sección se introduce un nuevo modelo basado en AC que toma como referencia convergencias donde lo único que restringe el flujo que ingresa desde la rampa de acceso a la vía principal son señalamientos que indican que se aproxima una convergencia y en muchos casos un señalamiento que invita a ceder el paso para permitir la unión de los flujos de la vía principal y de la rampa. En particular el modelo se enfoca al desempeño de una vía principal de dos carriles con condiciones de frontera abierta y una rampa de acceso de un solo carril sin un mecanismo de control para el ingreso de los vehículos a la vía principal. El ingreso de los vehículos a la vía principal se define con base a las condiciones actuales de los vehículos, sus propias ventajas y las de los vehículos vecinos. De tal manera que las aceleraciones y desaceleraciones longitudinales de los vehículos determinadas por las distancias de seguimiento seguro, se toman en cuenta para la definición del modelo. Los propios vehículos y sus conductores son los que definen la dinámica vehicular de ingreso a la vía principal, así un vehículo que viaja por la rampa deberá revisar la situación de los vehículos que se encuentran en la vía principal, esperando a tener condiciones para poder ingresar de manera segura. Por lo tanto, el nuevo modelo propuesto incorpora el comportamiento de los conductores y las restricciones mecánicas de los vehículos para definir su incorporación a través de las rampas de acceso a la vía principal. El modelo propuesto intenta evitar así las desaceleraciones irreales y accidentes debidos a las rampas de acceso.

3.2.1 Descripción del modelo

El modelo propuesto asume que la vía principal se compone de dos carriles y un carril adicional que representa la rampa de acceso. Esto corresponde a lo que se observa en muchos entronques carreteros de México donde las incorporaciones se realizan en el carril de menor velocidad, para ilustrarlo, en la Figura 3.2 muestra una imagen satelital de la autopista México-Pachuca, donde se denota como q_{in} al flujo de los dos carriles de la vía principal y q_{on} el flujo de la rampa de acceso de un solo carril. Ambos flujos convergen en la zona de *merge* volviéndose uno sólo.

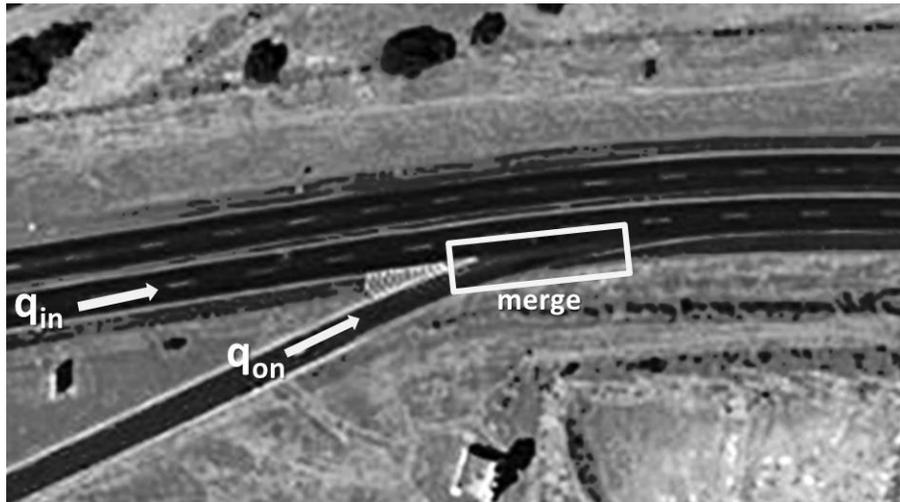


Figura 3.2 Esquemización de una convergencia en carretera. La imagen satelital corresponde a la autopista México Pachuca de cuota Km 47

Para modelar este escenario, considérese la Figura 3.3 que es una representación con AC de la Figura 3.2. Cada uno de los dos carriles de la vía principal se compone de una retícula de $L_{principal}$ celdas con condiciones de frontera abiertas. El carril que representa la rampa tiene una longitud de L_{ramp} celdas antes de que inicie la zona de *merge*. Cada celda del sistema tiene una longitud Δx y puede estar vacía u ocupada por un vehículo de longitud l_s en celdas. Además dichos vehículos puede tomar uno de los $v_{max} + 1$ valores permitidos $v = 0, 1, \dots, v_{max}$.

Hasta antes de arribar a la zona de *merge*, que tiene una longitud de L_{merge} celdas (inicia en x_s y termina en x_{fin_merge}), no existe interacción entre los vehículos de la rampa y los de la vía principal. Los vehículos que circulan por la rampa dentro de la zona de *merge*, pueden ingresar a la vía principal únicamente en dicha zona. Además, los vehículos de la vía principal pueden cambiar de carril dentro de dicha vía pero jamás hacia la rampa. Dentro de la vía principal (de longitud $L_{principal}$, que inicia en x_0 y termina en x_L) la dinámica de los vehículos que conforman el flujo q_{in} se define de manera análoga al modelo LAI para varios carriles y vehículos heterogéneos expuesto en el capítulo anterior; esto es, cada uno de los carriles se define como un sistema independiente de un solo carril trabajando en paralelo, en el cuál existe una etapa de cambio de carril definida conforme a dicho modelo.

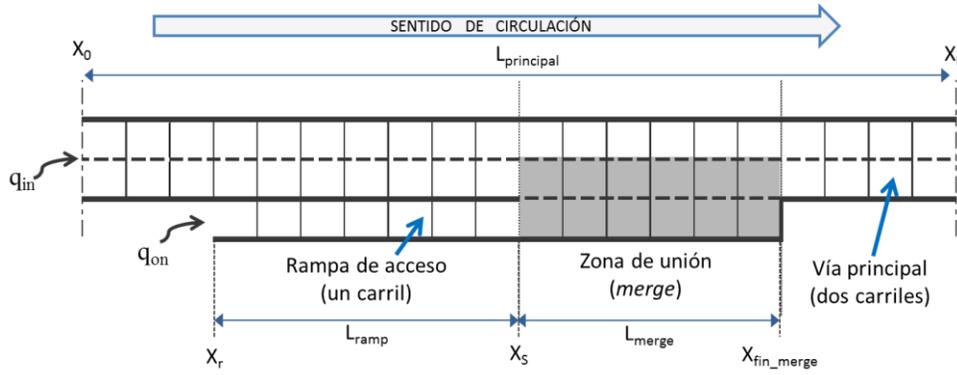


Figura 3.3 Esquema ilustrativo de los elementos considerados para el modelo propuesto sin mecanismo de control de acceso. La línea punteada indica que se permite cambio de carril. Línea gruesa indica que no se permite cambio de carril. La zona sombreada representa donde los vehículo de la rampa puede acceder a la vía principal. A los vehículos que circulan por la vía principal jamás se les permite cambiarse a la rampa

Por su parte, los vehículos que conforman el flujo q_{on} viajan por la rampa de longitud L_{ramp} (que inicia en la posición x_r y termina en x_s) se desplazan de manera independiente a la vía principal hasta antes de la zona de unión que comienza en la posición x_s , a partir de dicho punto buscarán realizar un cambio de carril a la izquierda para incorporarse a la vía principal. Dicho cambio de carril será propiciado por el hecho de que, conformen avancen los vehículos se aproximarán al final de la rampa, denotado como x_{fin_merge} , donde tendrían que detenerse, por lo que sólo cambiando de carril hacia la vía principal podrán tener condiciones para continuar con su desplazamiento.

Por cada paso de tiempo t , cada vehículo puede aumentar o disminuir su velocidad en un máximo de Δv unidades enteras. Así mismo, cada tipo de vehículo tiene una capacidad máxima de desaceleración denominada M bajo condiciones de emergencia.

La definición de la incorporación de los vehículos a la vía principal desde la rampa de acceso, se establece en forma semejante a la correspondiente a los cambios de carril definidos para el modelo LAI multicarril. De tal manera que la distancia de seguimiento de un vehículo que se incorpora a través de la rampa con respecto al vehículo que le sucede en la vía principal es menos conservadora. Entonces, en lugar de tomar la distancia de seguimiento seguro con condiciones de frenado normal del modelo LAI multicarril (ecuación (2.3) del capítulo previo), se considera una nueva distancia que se denominará distancia de seguimiento seguro con condiciones de frenado máximo y se denotará como d_{decM} , dada por la siguiente expresión:

$$d_{decM} = \max\left(0, \sum_{i=0}^{(v_n(t)-M) \text{div} M} [(v_n(t) - M) - i * M] - \sum_{i=0}^{(v_{n+1}(t)-M) \text{div} M} [(v_{n+1}(t) - M) - i * M]\right) \quad (3.1)$$

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

El primer término del lado derecho de la ecuación (3.1) determina la distancia que el vehículo seguidor (n) viajaría si éste desacelera abruptamente (con una capacidad de desaceleración máxima determinada por el parámetro M) a partir del paso de tiempo $t+1$ y lo continúa haciendo en los pasos de tiempo sucesivos hasta detenerse.

La sumatoria del lado derecho es la misma de las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3) y determina la distancia que viajaría el vehículo conductor ($n+1$), si en el paso de tiempo $t+1$ éste empieza a desacelerar abruptamente, considerando que desacelera con la máxima capacidad de frenado (M).

Así, la resta de ambos términos corresponde a la distancia de seguimiento seguro requerida para detener a un

vehículo en una situación de emergencia aun cuando el vehículo que se desplaza frente a él desacelerara con su máxima capacidad de frenado (M). Debe resaltarse que esta distancia de seguridad, al igual que las del paso S1 del modelo LAI original, puede ser pre-calculada y almacenada en tablas fijas. 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.

Una vez establecidos los elementos básicos que componen al sistema, se procede a explicar los pasos que componen la ejecución del modelo propuesto.

3.2.1.1 Pasos de modelo para rampas sin mecanismos de control específicos

La dinámica total del modelo se divide en cuatro pasos, como se describe en el diagrama mostrado en la Figura 3.4. Cabe mencionar que el orden de aplicación de los pasos es importante y un cambio en los mismos puede generar resultados diferentes.

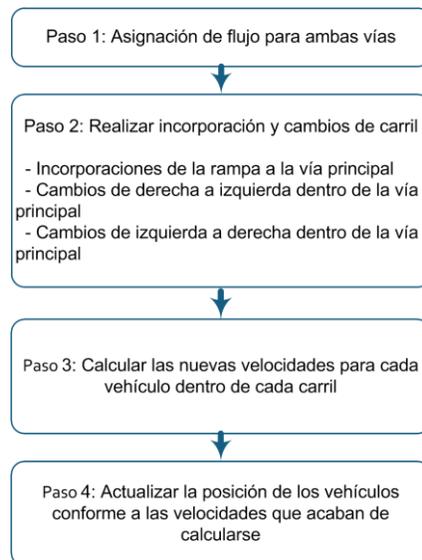


Figura 3.4 Diagrama de la secuencia de pasos del modelo propuesto para rampas de acceso sin mecanismo de control específico. Todos los pasos mostrados se realizan dentro de un mismo paso de tiempo

Estos pasos se aplican a cada uno de los vehículos cada instante de tiempo en forma paralela para actualizar el estado de los mismos y del sistema. A continuación se detalla cada uno de los pasos enumerados en la Figura 3.4 para un mejor entendimiento

3.2.1.1.1 Paso 1. Asignación de flujo.

Se ingresan vehículos al sistema, tanto los correspondientes al flujo de entrada de la vía principal q_{in} como los correspondientes al flujo de entrada a la rampa q_{on} . Para tal fin se emplea la distribución de Poisson, misma que se emplea para la ocurrencia de fenómenos espaciados en el tiempo cuya tasa promedio de arribo λ es conocida y que, de acuerdo a Kotz y Johnson[67], ha mostrado su ser valioso para este tipo de fenómenos, además de tener la ventaja de trabajar con eventos discretos. Es una distribución que muestra la probabilidad de x ocurrencias de un evento en un intervalo especificado de tiempo o espacio, siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- La probabilidad de una ocurrencia es igual en dos intervalos cualesquiera de igual longitud.
- La ocurrencia o no ocurrencia en cualquier intervalo es independiente de la ocurrencia o no ocurrencia en cualquier otro intervalo

Por ello es empleada para el estudio de teoría de colas en diversos entornos, tales como el arribo de paquetes a un *router* o la llegada de vehículos a una vía.

Así, la probabilidad de que ocurran exactamente x arribos en un intervalo está dada por:

$$P(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \quad (3.2)$$

donde λ especifica tanto el promedio como la varianza de la función de distribución. Para el caso de este modelo se conoce la tasa promedio de vehículos que ingresan, dadas por los flujos de entrada q_{in} y q_{on} para la vía principal y la rampa, respectivamente.

A su vez, la probabilidad de que ocurran un máximo de hasta n arribos está dada por la función de probabilidad acumulada desde que ocurran 0 hasta n arribos, con ello se obtienen tablas fijas normalizadas, que en base a diferentes valores de flujo de entrada, permiten determinar dentro de qué rango de la tabla cae un valor aleatorio y con ello definir cuántos vehículos arriban en cada paso de tiempo para cada vía conforme a sus flujos de entrada q_{in} y q_{on} .

Cuando se tiene el número de vehículos que ingresaran en un determinado paso de tiempo, se determina cuántos de ellos corresponden a camiones y cuántos a autos conforme a los porcentajes que se fijan para tal efecto. Todos ellos se ingresan en orden a una cola, una estructura tipo FIFO (*First Input – First Output*), para cada vía (principal y rampa) con la finalidad de que sean ingresados en ese orden a la vía correspondiente. Tras ello se toman uno a uno los vehículos y se distribuyen en las primeras celdas de cada vía con una velocidad máxima de tal forma que tengan condiciones para mantener dicha velocidad de acuerdo a la distancia de seguridad d_{keep} (ecuación (2.2)), ello en base a la velocidad y posición del vehículo que se encuentre delante de él en la misma vía. En caso de que algún vehículo no pueda ingresar en el tiempo en el que debiera por las condiciones de la vía (que ya esté llena y no pueda ingresar con distancia de seguridad) este permanece en la cola un paso de tiempo más hasta que pueda ingresar.

Formalmente, sean q_{in} y q_{on} , para la vía principal y la rampa respectivamente, la tasa de flujo de entrada a la vía principal y x_{last} la posición del vehículo más cercano al inicio de la vía; un nuevo vehículo con velocidad v_e será ingresado en la posición x_e si $x_{last} > v_{max} + l_s$. La velocidad v_e de cada nuevo vehículo generado debe corresponder a la máxima velocidad posible tal que su headway respecto al vehículo situado en la posición x_{last} sea la distancia de seguimiento seguro para mantener su velocidad: $d_e = d_{keep}(v_e, v_{x_{last}})$. Así, un vehículo será insertado en la posición $x_e = \min(x_{last} - d_e - l_s, v_{max})$, si $x_e \geq 0$ y $v_e > 0$.

Cuando se ha terminado el paso de ingreso, se procede a realizar los cambios de carril, que es el paso explicado a continuación.

Paso 2. Incorporación y cambios de carril.

Conforme a la Figura 3.4 las reglas de cambio para el modelo propuesto son 3, mismas que se aplican en el orden enumerado a continuación:

- (i) incorporación desde la rampa de acceso a la vía principal,
- (ii) cambio de carril a la izquierda dentro de la vía principal,
- (iii) cambio de carril a la derecha dentro de la vía principal.

Una de las bondades del modelo propuesto es que trabaja con las reglas de cambio de carril del modelo LAI analizado en el capítulo previo (apartado 2.2.2) y expuesto por H. Guzmán en las referencias [48] y [49], de tal forma que se emplean de forma íntegra dichas reglas para la vía principal, con lo que quedan solventados los cambios enumerados como (ii) y (iii). Mientras que para la incorporación desde la rampa hacia la vía principal, se define de manera similar a la correspondiente a un cambio de carril hacia la izquierda.

i) Regla de incorporación desde la rampa a la vía principal

Los vehículos involucrados en incorporación desde la rampa hacia la vía principal, es decir, que se encuentran dentro de la zona de *merge*, se ingresan al carril de más a la derecha de la vía principal, como se ilustran en la Figura 3.5. Es importante mencionar que en primera instancia los vehículos de la rampa sólo pueden ingresar al carril derecho de la vía principal pues es el carril aledaño a la misma, con lo cual un vehículo que haya ingresado a la vía principal pasa a formar parte del flujo del carril derecho de la vía principal y en adelante se considerará como un vehículo más de dicho carril sin importar si proviene o no de la rampa. Sin embargo, se prohíbe el cambio de carril durante en el paso de tiempo que se realizó la incorporación.

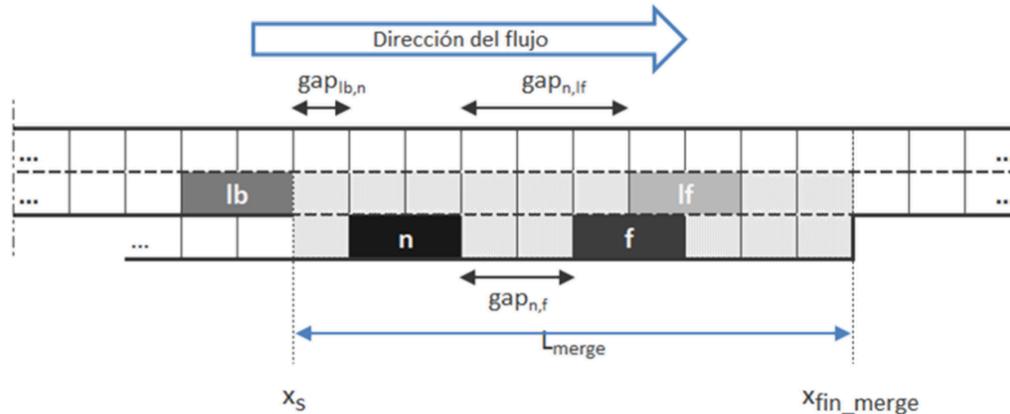


Figura 3.5 Esquema del sistema de dos carriles con una rampa de acceso. Un vehículo n que se va a incorporar desde la rampa de acceso debe considerar el vecino de enfrente f , el vecino de enfrente a la izquierda lf y el vecino de atrás a la izquierda lb en el carril objetivo.

Como puede apreciarse de la Figura 3.5, al tratar a la rampa como un carril más, a la derecha de la vía principal en la zona de unión, los vehículos considerados para realizar la incorporación de manera segura son análogos a los que intervienen en un cambio de carril a la izquierda en el modelo LAI de varias vías (Figura 2.3a), correspondiendo la rampa al carril derecho y el carril derecho de la vía principal al carril izquierdo, por lo que las figuras Figura 3.5 y Figura 2.3a son semejantes.

Ahora considérese la ecuación (3.1) y la Figura 3.5 para analizar la regla de incorporación que se define en los tres sub-pasos siguientes:

1. Inicializar.

Establecer la bandera $cl_n = \text{listo}$ para cada vehículo n dentro de la zona de unión de la rampa, esto es, para los vehículos de la rampa que cumplen:

$$(cpr) \quad x_n \geq x_{fin_merge} - L_{merge}$$

donde x_n denota la posición del vehículo n .

Así mismo, determinar sus vecinos f , lb y lf conforme a la Figura 3.5. En caso de que el vehículo n sea el más cercano a x_{fin_merge} en la rampa, se establece el final de la zona de merge como su vecino f :

$$f = fin_merge$$

2. Determinar la incorporación (cambio al carril de más a la derecha de la vía) para los vehículos de la rampa cuya bandera fue establecida como $cl_n = \text{listo}$ en el paso anterior, estos son los vehículos que son candidatos a ingresar a la vía principal.

Criterio incentivo.

$$(cir) \quad \text{Si } gap_{n,lf} \geq d_{keep}(v_n, v_{lf})$$

Criterio de seguridad.

(csr) Si $gap_{lb,n} \geq d_{decM}(v_{lb}, v_n)$

donde $gap_{n,m}$ representa la separación defensa a defensa entre los vehículos n y m , $d_{keep}(v_n, v_m)$ representa la distancia de seguridad para mantener la velocidad del vehículo n en base a su velocidad y la de su vehículo de enfrente m . Por su parte $d_{decM}(v_{mk}, v_n)$ es la distancia de seguridad bajo condición de capacidad máxima de frenado entre el vehículo n y el vehículo m que se encuentra detrás de él.

Si se cumplen el criterio incentivo y el criterio de seguridad, entonces $cl_n = izq$

3. Realizar la incorporación

Si $cl_n = izq$ entonces el vehículo n cambia de carril de su izquierda, ingresando a la vía principal, con probabilidad p_{change} .

El criterio de posición dentro de la rampa (cpr) establece que sólo los vehículos cuya posición actual x_n se encuentra dentro de la zona de *merge*, pueden ingresar a la vía principal. El criterio incentivo se refiere a que un vehículo deseará incorporarse a la vía principal (carril inmediato a su izquierda) si al menos puede mantener su velocidad actual y, dado que la zona de *merge* tiene una longitud finita L_{merge} , los vehículos que circulan por la rampa se ven motivados a tratar de incorporarse hacia la vía principal para continuar avanzando puesto que conforme se aproximan al final de la zona de *merge* disminuirán su velocidad. El criterio de seguridad considera que el cambio de carril será posible si no ocasiona disturbios que ocasionen colisiones al vehículo sucesor en el carril objetivo, es decir, el cambio es seguro con base en la distancia d_{decM} obtenida de la ecuación (3.1). Así, un vehículo que circula por la rampa deseará cambiarse a su izquierda a la vía principal bajo el siguiente criterio incentivo: (cir) en el carril de la vía principal que es contiguo a la rampa, el vehículo puede mantener o aumentar su velocidad actual.

La incorporación es posible únicamente si la distancia de seguimiento seguro d_{decM} del vehículo sucesor en el carril izquierdo con respecto al vehículo que se cambiará es suficiente para desacelerar conforme a su capacidad máxima de frenado (csr), esto asegura que no existan colisiones entre los vehículos originadas por el ingreso de la rampa a la vía principal. En relación a otros modelos existentes en la literatura, cabe mencionar que la mayoría de los modelos de AC toman en cuenta condiciones de seguridad muy conservadoras respecto al vehículo sucesor, 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, de tal forma que el cambio permita que el vehículo sucesor frene de ser necesario para evitar colisiones. Condiciones más conservadoras para el modelo pueden establecerse, pero conforme se mencionó en el apartado anterior, las consideraciones realizadas para este modelo buscan apegarse al estilo de manejo de nuestro país, donde es frecuente observar que los conductores emplean técnicas de manejo que tienden a ser poco conservadoras para incorporarse de una vía a otra, especialmente cuando se forman congestionamientos. Sin embargo, estas condiciones también podrían afectar el flujo cuando la densidad en la vía principal es baja.

La probabilidad de cambio de carril, p_{change} permite representar el hecho que ocurre en la realidad de que un conductor, aun cuando tiene condiciones para ingresar a la vía principal, no lo hace. Esta probabilidad puede establecerse en función del tipo de vehículo o de las características del conductor. De igual forma, es posible variar dicha probabilidad dependiendo de la densidad, puesto que a mayores densidades los conductores tienden a ser más agresivos, siendo más probable que realicen el cambio de carril en cuanto tengan oportunidad. Por ello brinda una mayor flexibilidad al modelo para obtener comportamiento más apegado al observado en la realidad con base en aprovechar la bondad que tienen los AC de permitir reproducir con mucha naturalidad fenómenos de interacción a nivel microscópico que son replicados para lograr un comportamiento macroscópico apegado al real.

Cabe hacer mención de que el orden establecido para la realización de la incorporación y los cambios de carril obedece a que se busca replicar el fenómeno observado cuando un vehículo ingresa de la rampa al carril derecho de la vía principal, donde éste puede ocasionar que el vehículo detrás de él sobre la vía principal decida cambiar al carril inmediato hacia la izquierda (vía principal) para evitar disminuir su velocidad, si es que las condiciones son favorables para ello. Además de que también se fomenta el hecho de que los vehículos que circulan por el carril de más a la izquierda de la vía principal evitan cambiar de carril hacia la derecha cuando están en las cercanías a la rampa de entrada, ya que es ahí donde se originan los embotellamientos.

Cuando se concluye con la realización de los cambios de carril, se está en condiciones de realizar el cálculo de velocidades que es el paso descrito a continuación.

Paso 3. Cálculo de velocidades

Una vez que se han realizado todos los cambios de carril e incorporaciones (movimientos transversales), se procede a calcular la nueva velocidad de cada vehículo del sistema bajo las condiciones que tiene dentro de su propio carril, por lo que para esta etapa puede verse cada carril como un sistema independiente en el que se aplican los pasos S1, S2 y S3 que corresponden a las reglas del modelo LAI de una vía, mismas que se exploraron en el apartado 2.2.1 de este documento. Es importante resaltar que para representar el hecho de que un auto se aproxima al final de la zona de *merge*, se realiza una ligera modificación a dicho modelo, de tal forma que el vehículo que circula por la rampa que sea más cercano al final de la zona de *merge*, que será denominado *last*, actualizará su velocidad conforme a la posición x_{fin_merge} , esto es:

$$d_{last}(t) = x_{fin_merge} - x_{last} - l_{last}$$

donde x_{fin_merge} y x_{last} son las posiciones del final de la zona de *merge* y del vehículo *last*, respectivamente; l_{last} es la longitud del vehículo *last*.

Por lo que las distancias del paso S1 del modelo LAI de una vía para el vehículo *last* quedan de la siguiente forma:

S1: Distancias seguras. Obtener el valor para

$$\begin{aligned} d_{dec_last} &= d_{dec}(v_{last}, 0) \\ d_{acc_last} &= d_{acc}(v_{last}, 0) \\ d_{keep_last} &= d_{keep}(v_{last}, 0) \end{aligned}$$

Con lo cual se reproduce de manera natural el hecho de que un vehículo irá ajustando su velocidad gradualmente conforme continúe avanzando por la rampa dentro de la zona de *merge*, y en caso de que no logre su ingreso antes, se detendrá justo al final de dicha zona, esperando a tener condiciones para ingresar de forma segura a la vía principal. Para todos los demás vehículos se emplea el paso S1 como se definió en el modelo LAI de una vía.

Paso 4. Actualización de posiciones (movimiento de los vehículos)

Cuando ya se tienen calculadas las nuevas velocidades para todos los vehículos, se procede a realizar el movimiento de los éstos (longitudinalmente), lo que consiste en actualizar sus posiciones dentro de cada carril con base en dicha velocidad, de la misma forma que fue explorada en el paso S4 del modelo LAI de una vía (apartado 2.2.1).

Por otra parte, los parámetros del nuevo modelo aquí propuesto, al igual que los del modelo LAI multicarril, pueden ser homogeneizados con los del modelo LAI original, quedando resumidos en la Tabla 2.1 donde se sintetizan las variables y parámetros del modelo propuesto.

Variable	Descripción	Parámetro	Descripción
x_n	Posición del vehículo n	v_{max}	Velocidad máxima
v_n	Velocidad del vehículo n	v_s	Velocidad lenta
Δv	Magnitud para incrementar/disminuir la velocidad en un paso de tiempo	l_s	Longitud del vehículo (en celdas)
d_{dec}	Distancia para frenar de manera segura en el siguiente paso de tiempo	M	Disminución máxima de velocidad en un paso de tiempo
d_{keep}	Distancia para mantener velocidad de manera segura en el siguiente paso de tiempo	R_s	Probabilidad de frenado aleatorio
d_{acc}	Distancia para acelerar de manera segura en el siguiente paso de tiempo	R_o, R_d, R_a	R_a es un parámetro estocástico para aplicarse en el paso S2, el cual tiene un valor entre R_o y R_d
d_{decM}	Distancia para frenar con la capacidad máxima de frenado M de manera segura en el siguiente paso de tiempo	P_{change}	Parámetro estocástico que determina la probabilidad de realizar o no un cambio de carril.
L_{merge} x_{fin_merge}	Longitud y posición del final de la zona de <i>merge</i> , respectivamente		

Tabla 3.1 Descripción de las variables principales y los parámetros del modelo propuesto para múltiples carriles con rampa de acceso sin mecanismo de control específico y vehículos heterogéneos.

En la Tabla 3.1 se observa que se ha conseguido obtener una extensión que considera rampas de acceso pero que sigue manteniendo los mismos parámetros que el modelo LAI para varios carriles, lo que es muestra de que se logra preservar en buena medida la simplicidad propia de dicho modelo, esto es relevante dado que en la literatura se encuentran pocos modelos que tengan un número bajo de parámetros y que hagan consideraciones de anticipación de velocidad y posiciones relativas.

Así mismo, ha sido agregada una variable para el cálculo de distancias de seguridad d_{decM} al modelo LAI de varios carriles, además se han integrado dos nuevos variables con las que se la longitud de la zona en la que se realizan los cambios de carril de la rampa a la vía principal (L_{merge}), que en conjunto con x_{fin_merge} determinan las posiciones en las que puede haber cambios de carril de la rampa de acceso a la vía principal.

Por otro lado, una vez que se han definido las reglas del nuevo modelo y la mecánica bajo la que opera, en la sección que se presenta a continuación se tratarán los resultados de simulación que se obtuvieron empelando el modelo propuesto.

3.2.2 Simulación y análisis de resultados del modelo propuesto para rampas sin mecanismos especiales de control.

En esta sección se presentan los resultados de simulación del modelo propuesto sobre una carretera de longitud $L_{principal} = 6000$ celdas (15 km) con condiciones de frontera abierta, en la que cuando un vehículo llega rebasa el final de la carretera sale del sistema. Los dos carriles que forman dicha carretera conforman la vía principal. El carril correspondiente a la rampa de acceso tiene una longitud $L_{ramp} = 300$ celdas (750m) desde su inicio hasta antes de la zona de merge. La zona de merge tiene una longitud $L_{merge} = 80$ celdas (200 m) y termina en el kilómetro 10 de la vía principal: $x_{fin_merge} = 4000$. Cada celda tiene una longitud $\Delta x = 2.5$ m, y se enumeran de menor a mayor conforme al sentido de circulación de los vehículos.

Para el ingreso de vehículos, el flujo denotado como q_{in} es inyectado a cada carril en la vía principal, mientras que el flujo de entrada para la rampa se denota como q_{on} . Ambos toman diferentes valores que serán expuestos en los diferentes experimentos, pero siempre un porcentaje del 10% del flujo se define como camiones y el resto como automóviles.

Se consideraron dos tipos de vehículos, el primer tipo son automóviles con longitud de 5.0 m ($l_s = 2$ celdas) y

velocidad máxima de 108 km/h ($v_{max} = 12$ celdas/paso de tiempo); el segundo tipo son camiones con longitud 10.0 m ($l_s = 4$ celdas) y velocidad máxima de 81 km/h ($v_{max} = 9$ celdas/paso de tiempo) respectivamente.

El valor del parámetro de probabilidad de cambio p_{change} se establece a 1.0 para el cambio del carril de la rampa a la vía principal lo que significa que siempre que se tenga condiciones para ingresar a la vía principal se hará el ingreso; el mismo valor se establece para cambios de carril del derecho al izquierdo en la vía principal, 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. Esto significa que para cambios a la derecha, la probabilidad de cambio de un camión es mucho más alta que la de un automóvil; la razón es que con ello se busca reproducir 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. Tómese en cuenta que las reglas viales de México establecen que el carril izquierdo debe usarse principalmente para rebasar y que los camiones tienen una menor velocidad máxima, por lo que para lograr un desempeño acorde a la realidad es necesario que los camiones permitan ser rebasados por los autos que son más veloces, fenómeno observado en las carreteras de nuestro país. Además, 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, valores que son recomendados por H. Guzmán, et al. [94] en la sintonización de los parámetros del modelo LAI para varios carriles con el objetivo de aminorar la formación de tapones que nunca se disuelven en el caso de que dos camiones que viajan en celdas contiguas alcancen su máxima velocidad simultáneamente y jamás la cambien.

En cuanto al resto de los parámetros, todos los resultados de simulación que se presentan en este trabajo emplearon los siguientes valores para los parámetros: $R_d = 1.0$, $R_\theta = 0.8$, $M = 2$ y $v_s = 3$ para todos los vehículos.

Cada paso de tiempo t es de 1 segundo. En cada simulación se dejan pasar los primeros $TI = 420$ pasos de tiempo antes de comenzar a tomar mediciones, en este periodo únicamente se ingresan autos en la vía principal, siendo tiempo suficiente para que un vehículo ingresado en el comienzo de la vía principal con velocidad máxima de 9 celdas por paso de tiempo, llegue al punto donde se localiza el comienzo de la zona de *merge* (celda 3800). Tras dejar pasar esos 420 pasos de tiempo, se comienza a ingresar vehículos en la rampa y se inicia la toma de mediciones durante un tiempo T de pasos de tiempo, el valor de T será indicado en el eje horizontal de cada gráfica.

En la siguientes subsecciones se describen los resultados de simulación obtenidos con el modelo propuesto.

3.2.2.1 Fases de tráfico congestionado del modelo.

Para realizar las mediciones locales de velocidad, densidad y flujo, se colocan detectores virtuales sobre la vía en lugares específicos, mismos que en cada caso se mencionarán para los diagramas espacio-temporales. Dichos detectores miden permanentemente la vía obteniendo mediciones locales del número vehículos que atraviesan su ubicación y con qué velocidad lo hacen, sin embargo, como se mencionó en el apartado 1.3.2, la determinación de la densidad ρ es más compleja debido a dos razones, una fundamental y una técnica:

- 1) La densidad es una cantidad espacial que es difícil medir localmente, y
- 2) solamente los vehículos en movimiento pueden ser censados por los detectores

Para solventar el problema 1) se utiliza la relación hidrodinámica dada en la siguiente expresión:

$$J_{local} = v_{local}\rho_{local} \quad (3.3)$$

Con lo cual se puede obtener la densidad local ρ_{local} a partir de un flujo medido local J_{local} y una velocidad local promedio v_{local} . Es importante resaltar que la velocidad promedio normalmente es sobre-estimada debido a que los vehículos lentos o detenidos no son detectados por los detectores, y por lo tanto la densidad es subestimada.

A continuación se presentan algunos diagramas de espacio-tiempo que ilustran parte de los fenómenos de congestionamientos que se lograron reproducir con el modelo propuesto. Para todos ellos se promediaron las

mediciones cada 5 celdas. El sentido de circulación de los vehículos es de abajo hacia arriba, mientras que los pasos de tiempo van de izquierda a derecha, siendo el tiempo 0 el momento en que se comienza a ingresar flujo en la rampa. Los puntos negros representan vehículos con velocidad $v=0$, mientras más claro sea el color, en escala de grises, más alta es la velocidad del vehículo que representa.

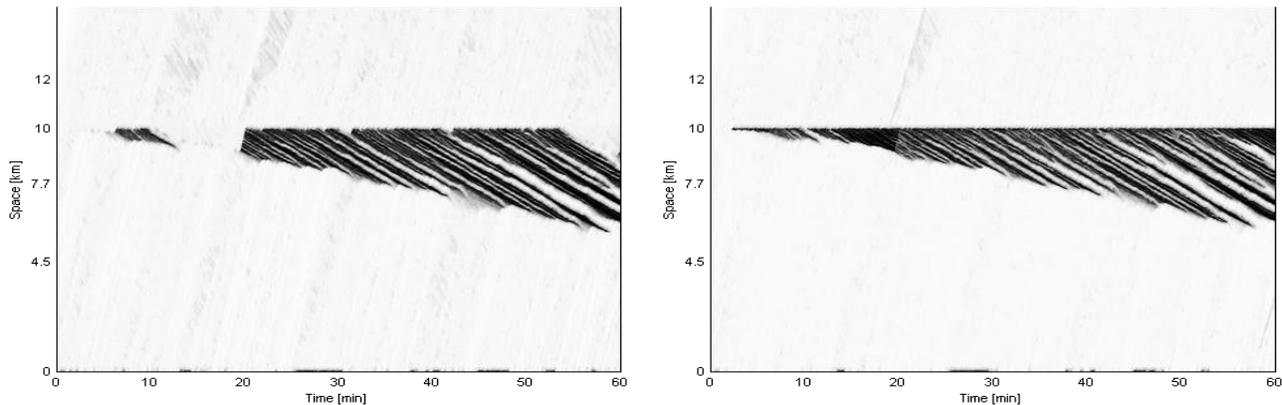


Figura 3.6. Diagrama espacio-temporal para $(q_{in}, q_{on}) = (2000, 1200)$ veh/h. Corresponde a flujo estancado. La imagen del lado izquierdo pertenece al carril izquierdo de la vía principal, mientras que la de la derecha corresponde al carril derecho. El eje horizontal representa el tiempo en minutos, mientras que el eje vertical representa la posición en km. La zona de merge se ubica entre el kilómetro 9.8 y el kilómetro 10.

En la Figura 3.6 se muestran las características espacio-temporales para $(q_{in}, q_{on}) = (2000, 1200)$ veh/h de un congestionamiento en ella pueden observarse ondas de paro (conocidas como *stop and go*) que corresponden a estancamientos móviles y a regiones de flujo sincronizado (flujo alto y velocidad promedio baja, pero sin vehículos parados) que se propagan en sentido contrario a la dirección del flujo vehicular (aguas arriba). Dichas ondas son originadas alrededor del kilómetro 10 que corresponde a la ubicación de la rampa, por lo que se muestra que el modelo propuesto consigue reproducir los congestionamientos viales que se deben al ingreso de vehículos provenientes de la rampa de acceso, cuya descripción en los diagramas espacio-temporales obtenidos concuerda con las observaciones experimentales de Benjamin, et al. [50] y Yo-Sub Han [65], ya que conforme se propaga el congestionamiento, algunas de las líneas más delgadas que lo componen se disuelven, coincidiendo también con las imágenes recreadas a partir de las imágenes de video de autopistas norteamericanas reportadas tanto por Treiterer [68] como por Wahle, et al. [63].

Además, como se observa de la Figura 3.6, un primer congestionamiento se origina aproximadamente 3 minutos después de que se comienza a ingresar flujo a la rampa de acceso, reflejándose primero en el carril más cercano a ella (carril derecho de la vía principal), fenómeno que coincide con lo observado en las rampas de acceso, donde los primeros vehículos que tienden a bajar su velocidad son los que viajan por el carril de la vía principal donde ingresan los vehículos que provienen de la rampa. Sin embargo, instantes más tarde el carril izquierdo de la vía principal se ve afectado debido a que los conductores del carril derecho se ven incentivados a cambiar de carril para mejorar sus condiciones de conducción como consecuencia de las incorporaciones de vehículos desde la rampa, lo que termina por replicar un patrón muy similar en ambos carriles, sincronizando su desempeño. Por otra parte, nótese que después de la ubicación de la rampa, en el sentido del flujo vehicular, los vehículos se mueven libremente en ambos carriles, esto es, se disuelve el congestionamiento (dando origen a una zona de color claro que se ve después del kilómetro 10 para todos los pasos de tiempo), es decir, la congestión que se origina debido a la rampa de acceso no se propaga aguas abajo.

Con la finalidad de analizar más profundamente el desempeño observado en la Figura 3.6, un análisis de flujo local y la velocidad local en el tiempo se mide en los diferentes detectores definidos previamente (ver Figura 3.7). Como puede notarse de la Figura 3.7, el congestionamiento que se observa en el diagrama espacio-tiempo se origina en la rampa de acceso (decaimiento de la velocidad promedio) y se propaga aguas arriba a través de la vía principal (a tiempos posteriores). Nótese que aunque la velocidad promedio es más baja que la velocidad de flujo libre, el flujo local promedio por carril se mantiene arriba de 1500 veh/h, lo que indica que el modelo

reproduce flujo sincronizado, donde los vehículos se mueven con velocidad baja pero el flujo promedio sigue siendo alto. Además, puede notarse que tras pasar la zona de *merge* el congestionamiento que se origina en la rampa de acceso, no se propaga aguas abajo, como se aprecia en las gráficas correspondientes al detector ubicado en el kilómetro 12.

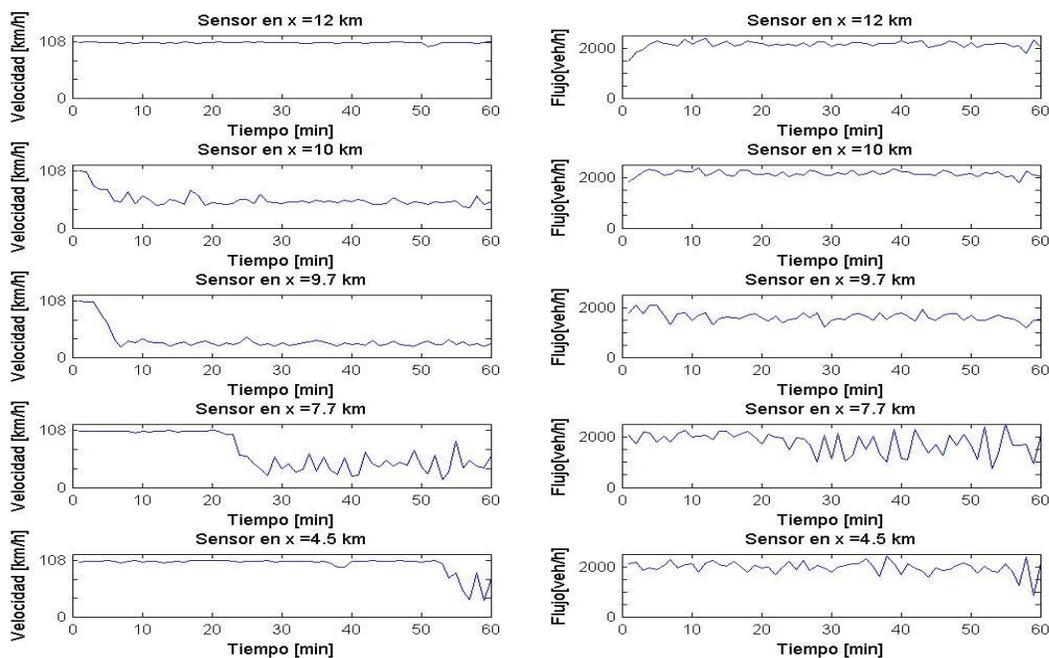


Figura 3.7 Mediciones de los detectores ubicados en la vía principal en las posiciones indicadas para $(q_{in}, q_{on}) = (2000, 1200)$ veh/h. El eje horizontal representa el tiempo en minutos, mientras que el eje vertical del lado izquierdo es la velocidad en km/h y el eje vertical del lado derecho es el flujo promedio medido.

Por otra parte, en la en la Figura 3.8 se muestran resultados para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 800)$ veh/h del modelo propuesto. Como puede notarse, en este caso el congestionamiento que se origina debido a la rampa de acceso permanece alrededor de la misma, y no se propaga aguas arriba. Este comportamiento se puede apreciar en la Figura 3.9 que muestra las mediciones del flujo local y la velocidad local en diferentes detectores ubicados en la vía principal para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 800)$ veh/h. Nótese que para todos los detectores la velocidad local es más baja que la velocidad máxima, pero el flujo vehicular es alto.

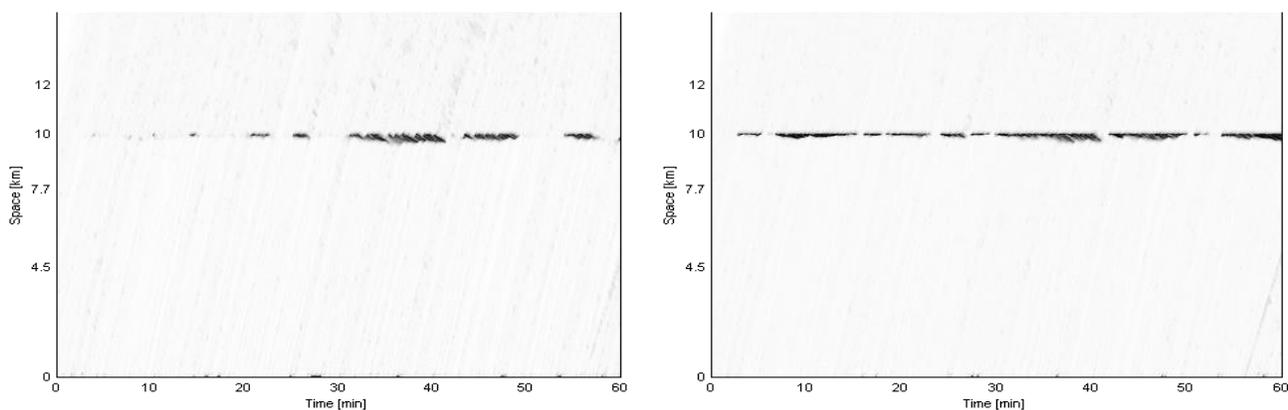


Figura 3.8. Diagrama espacio-tiempo para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 800)$ veh/h. El eje horizontal representa el tiempo en minutos, mientras que el eje vertical representa la posición en km. La zona de *merge* se ubica entre el kilómetro 9.7 y el kilómetro 10. De izquierda a derecha las imágenes corresponden a los carriles izquierdo y derecho respectivamente.

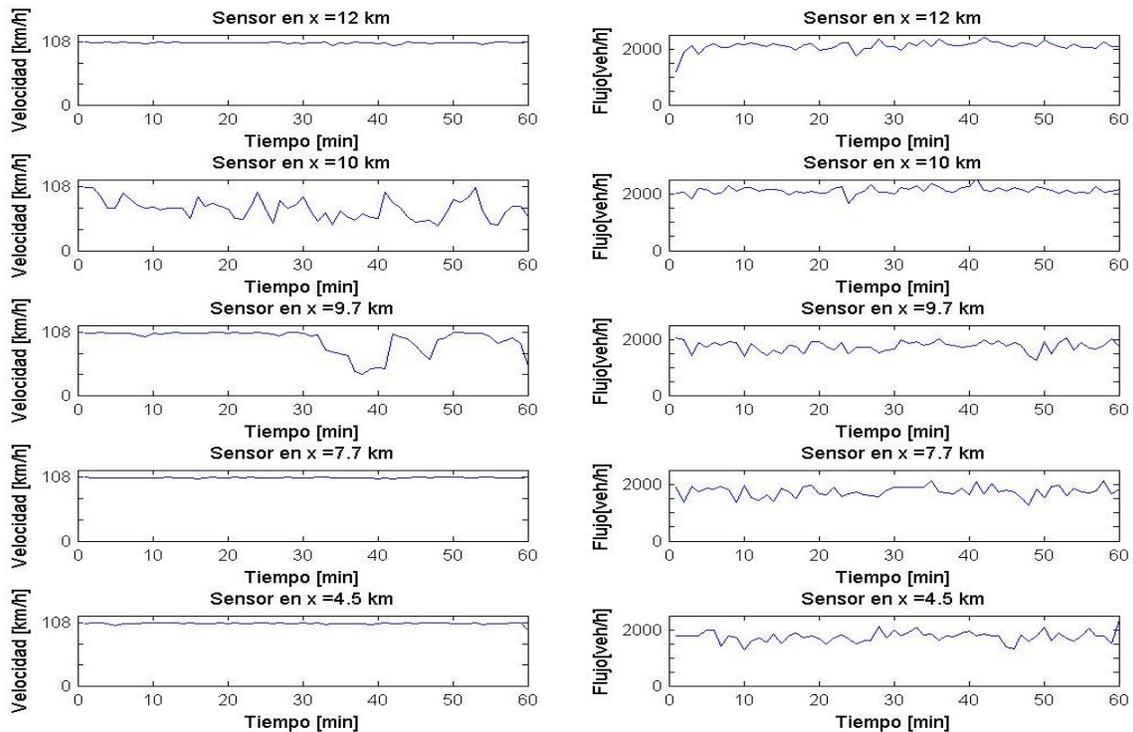


Figura 3.9 Mediciones de los detectores ubicados en la vía principal en las posiciones indicadas para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 800)$ veh/h. El eje horizontal representa el tiempo en minutos, mientras que el eje vertical del lado izquierdo es la velocidad en km/h y el eje vertical del lado derecho es el flujo promedio medido

En la Figura 3.10 se muestra el diagrama espacio-tiempo para $(q_{in}, q_{on}) = (1000, 100)$ veh/h, que corresponde a un flujo bajo en la rampa de acceso. Como puede observarse, el flujo que ingresa a través de la rampa no es suficiente para generar un congestionamiento y el flujo libre se mantiene (ver Figura 3.11). Nótese, que sólo en el carril derecho se aprecian vehículos posicionados a la altura de la rampa con velocidad menor a la máxima permitida, pero diferente de cero y que eventualmente debido a los flujos de ingreso tanto en la vía principal como en la rampa de acceso aceleran (ver Figura 3.12). Esto coincide con lo que ocurre cuando un vehículo con una velocidad muy baja ingresa a una vía rápida, donde tras lograr su ingreso acelerara paulatinamente hasta alcanzar su velocidad deseada, efecto logrado en el modelo propuesto al incorporar valores de aceleración conforme a los valores de ingeniería de transporte a través del parámetro Δv . Considérese además que en el modelo la aceleración tiene un efecto de retardado especificado en el paso S3a conforme al valor de R_a obtenido en el paso S2 del modelo LAI de un carril.

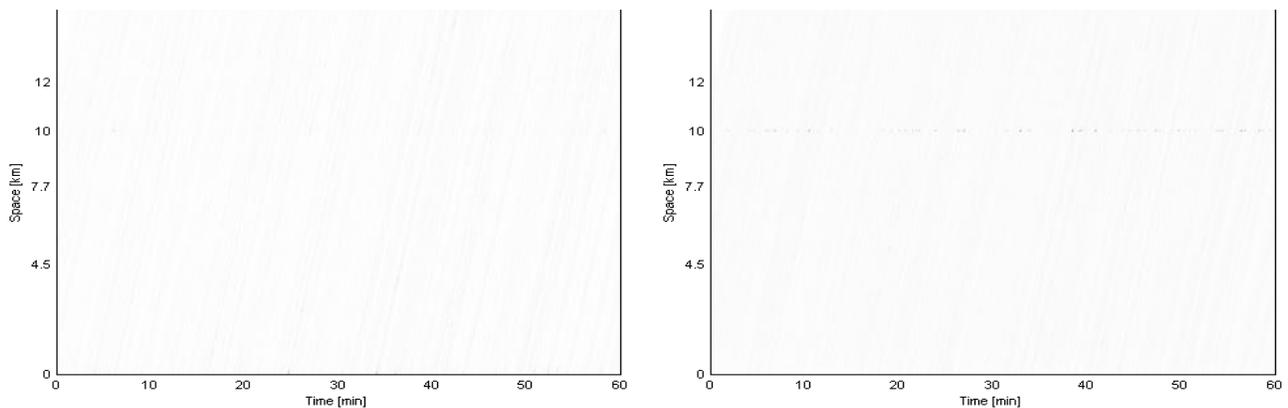


Figura 3.10 Diagrama espacio-tiempo para $(q_{in}, q_{on}) = (1000, 100)$ veh/h. El eje horizontal representa el tiempo en minutos, mientras que el eje vertical representa la posición en km. La zona de merge se ubica entre el kilómetro 9.7 y el kilómetro 10. De izquierda a derecha las imágenes corresponden a los carriles izquierdo y derecho respectivamente.

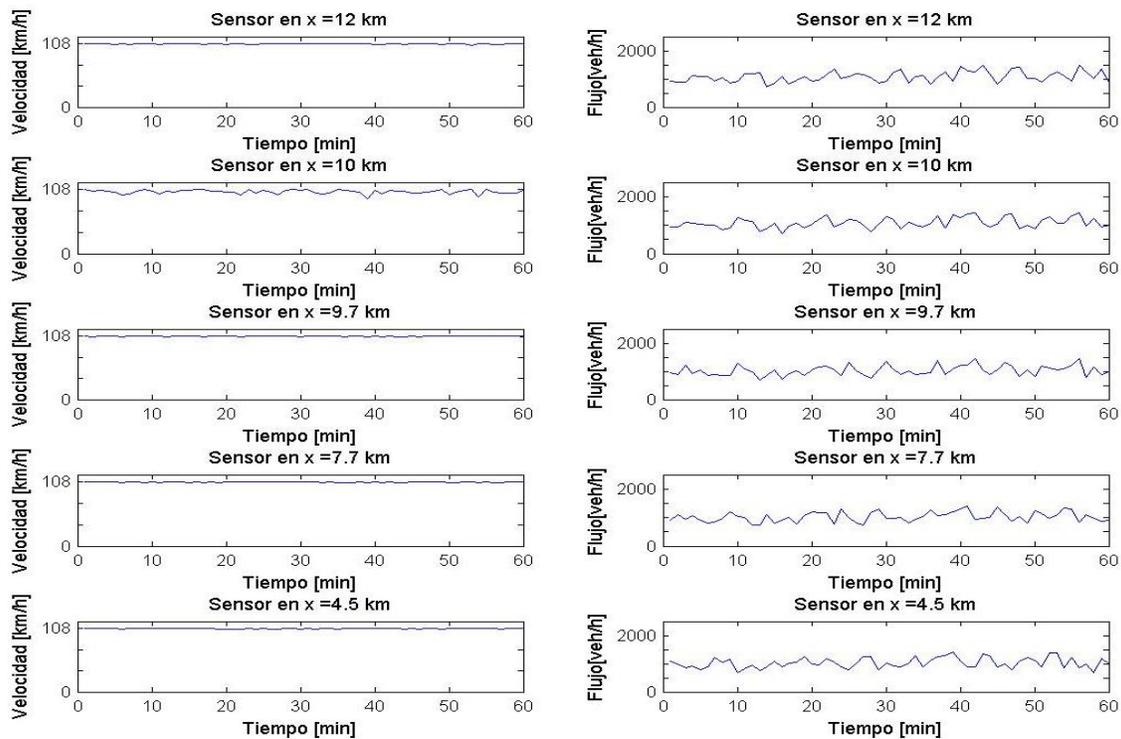


Figura 3.11 Mediciones de los detectores ubicados en la vía principal en las posiciones indicadas para $(q_{in}, q_{on}) = (1000, 100)$ veh/h. El eje horizontal representa el tiempo en minutos, mientras que el eje vertical del lado izquierdo es la velocidad en km/h y el eje vertical del lado derecho es el flujo promedio medido

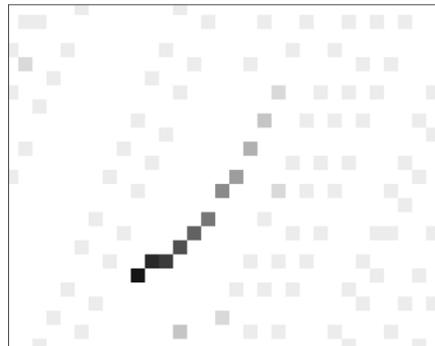


Figura 3.12. Ampliación de una sección del diagrama espacio-tiempo para $(q_{in}, q_{on}) = (1000, 100)$ veh/h. El eje horizontal representa el tiempo en segundos, mientras que el eje vertical representa la posición cada 5 celdas.

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento del modelo para diferentes valores de flujo de entrada tanto para la vía principal como para la rampa, se realizaron simulaciones variando los valores de q_{in} y q_{on} . La Figura 3.13 muestra el diagrama de fase resultante. Tres estados de flujo se encontraron, *Localized Jam (LJ)*, *Jam (J)* y *Free (F)*. El primero (*LJ*) se refiere a congestión derivada de la rampa de acceso que no se propagan aguas arriba de la misma sobre la vía principal, es decir, se mantiene alrededor de la zona de *merge*. El segundo (*J*) se refiere a estados de flujo congestionados que se propagan aguas arriba de la posición de la rampa sobre la vía principal. El tercero (*F*) se refiere a estados de flujo libre, que no se afectan por el flujo que ingresa desde la rampa.

Por otra parte, también se investigó la influencia de la variación en la longitud de la zona de *merge* en el flujo de la vía principal, así como en el tiempo que tarda un vehículo desde que ingresa al inicio de la rampa hasta que logra incorporarse a la vía principal, los resultados se presentan en el apartado que sigue.

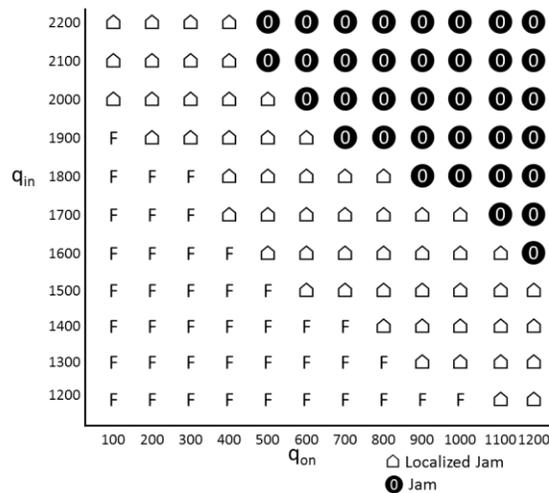


Figura 3.13 Diagrama de Fases de tráfico congestionado en la vía principal para el modelo propuesto. El eje horizontal corresponde al flujo de entrada a la rampa, mientras que el eje vertical representa el flujo de entrada de la vía principal. *Jam* corresponde a congestionamientos que se extienden aguas-arriba de la ubicación de la zona de *merge*, *Localized Jam* son congestionamientos que únicamente están presentes en la zona de *merge*. *Free* son los puntos donde se tiene flujo libre.

3.2.2.2 Variaciones de la longitud de la zona de unión entre la rampa y la vía principal

Una observación empírica de las rampas de acceso que existen en las carreteras mexicanas permite notar que, en términos generales, no existe una unificación de criterios en su construcción, resaltando el hecho de que las longitudes de la zona en la que los vehículos se incorporan a la vía principal (zona de unión o *merge* en el modelo propuesto), tienen variaciones muy diversas. Además en la revisión del estado del arte se encontró que tampoco existe un valor único que sea predominantemente usado. Lo que a primera vista llama la atención puesto que dependiendo la longitud que tenga dicha zona, se permite que un mayor número de vehículos de la rampa entren en contacto con el flujo de la vía principal, con lo que se sugeriría que hay mayores posibilidades de que logren ingresar. Además de que si la zona de *merge* tiene una mayor longitud, los vehículos que circulan por ahí pasarán más tiempo monitoreando la vía principal para encontrar condiciones de ingreso antes de que tengan que detenerse, en caso de que lleguen hasta el final de la zona de *merge* sin haber logrado acceder a la vía principal. Por ello se decidió estudiar la influencia en la variación de L_{merge} en el comportamiento del ingreso de los vehículos que provienen de la rampa, respecto al flujo promedio medido sobre la vía principal que se calculó conforme a la expresión hidrodinámica de la ecuación (3.3).

A partir del diagrama de fases (Figura 3.13) se determinaron las parejas de valores (q_{in} , q_{on}) que se emplearon para este estudio. La razón para hacer esa elección es que se desea saber si las variaciones en la longitud de L_{merge} afectan el comportamiento de la vía principal al grado de ocasionar un cambio de fase con valores de flujo de entrada idénticos a los utilizados para obtener la Figura 3.13, en cuyo caso se fijó el valor de $L_{merge}=200$ metros con el propósito de tener una distancia de al menos la que necesita un vehículo con velocidad máxima ($v=12$ celdas/paso_de_tiempo) que ingresa a dicha zona para detenerse antes de alcanzar el final de la zona de *merge*. Este es un caso análogo a que un vehículo que ingrese a dicha zona a partir del reposo, acelere cada paso de tiempo hasta alcanzar su velocidad máxima ($v_{max}=12$). En ambos casos se requieren 78 celdas, lo que equivale a 195 metros.

Para determinar la influencia de la variación de L_{merge} sobre la vía principal se realizaron mediciones del flujo promedio local que circula por dicha vía, mientras que para estudiar la afectación en los vehículos de la rampa, se mide el porcentaje promedio de vehículos que logran ingresar a la vía principal respecto al número de autos generados (flujo efectivo), así como el tiempo promedio que tardan desde que se originan (en la etapa 1 del modelo) hasta que ingresan con éxito a la vía principal. En cuanto a los valores de L_{merge} se optó por variarlo entre 50 y 400 metros, ya que en ese rango se encontraron los valores empleados en la mayoría de los modelos existentes en la literatura. Para cada pareja de valores (q_{in} , q_{on}) se realizaron 100 simulaciones, cada una con una

duración de 2 horas (en pasos de tiempo del modelo), los resultados se promediaron por hora. En las Figura 3.14, Figura 3.15 y Figura 3.16 se muestran los resultados correspondientes.

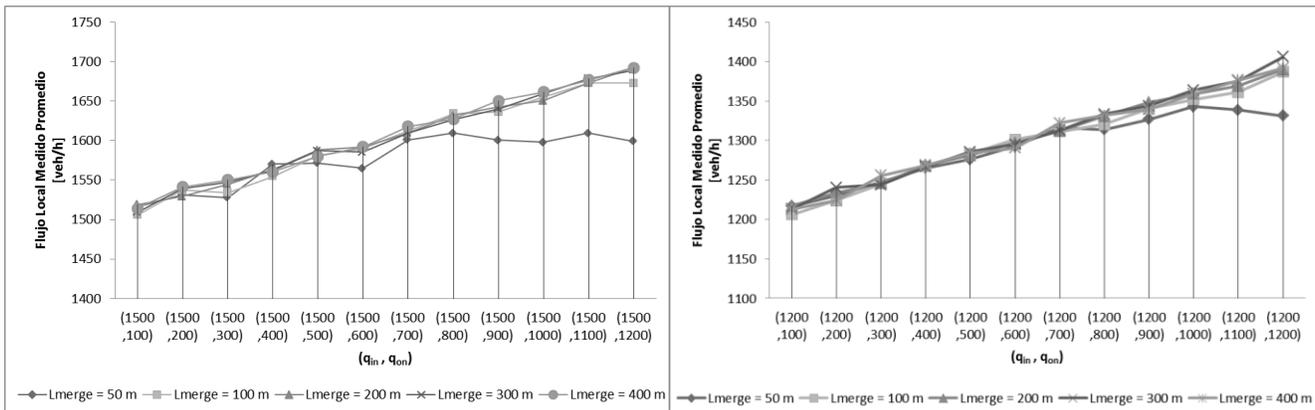


Figura 3.14 Flujo promedio medido cada minuto en la vía principal a través de la ecuación (3.3) para los diferentes valores de L_{merge} estudiados, partiendo de los flujos de ingreso q_{in} (flujo de ingreso a la rampa principal) y q_{on} (flujo de ingreso a la rampa) especificados en las gráficas.

En la Figura 3.14 se muestra el flujo promedio medido cada minuto en la vía principal a través de la ecuación (3.3) para los diferentes valores de L_{merge} estudiados, con respecto a los flujos de ingreso q_{in} y q_{on} especificados en las gráficas. Se aprecia de esta figura que para longitudes de la zona de merge mayores a 50 metros, el comportamiento es similar, es decir, la longitud la zona de merge no afecta el flujo sobre la vía principal. Sin embargo, nótese que para $L_{merge}=50$ m, este comportamiento sólo se preserva para valores de q_{on} muy pequeños. Un comportamiento similar se obtiene cuando q_{in} tiene un valor de 1200 veh/h y q_{on} aumenta por arriba de 800 veh/h. De acuerdo a estos resultados la longitud de la zona de merge afecta cuando el flujo total ($q_{in}+q_{on}$) excede los 2000 veh/h, esto corresponde a valores para los cuáles comienzan a formarse congestiones localizadas (LJ) de acuerdo al diagrama de fases (Figura 3.13).

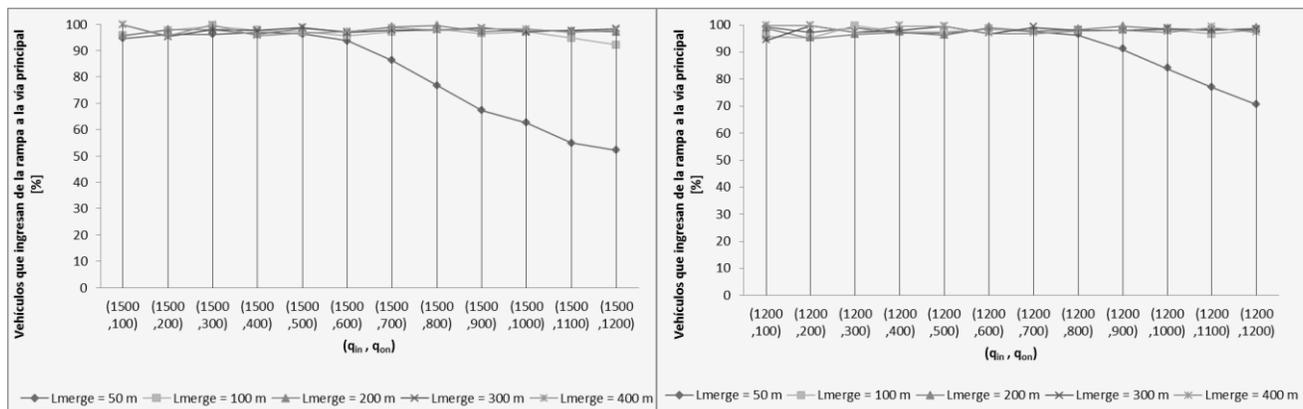


Figura 3.15 Flujo efectivo de ingreso a la vía principal a través de la rampa para diferentes valores de L_{merge} estudiados, partiendo de los flujos de ingreso q_{in} (flujo de ingreso a la rampa principal) y q_{on} (flujo de ingreso a la rampa) especificados en las gráficas.

La Figura 3.15 muestra el flujo efectivo que ingresa de la rampa hacia la vía principal, es decir, el porcentaje de vehículos que circularon por la rampa y lograron ingresar a la vía principal, con respecto a (q_{in}, q_{on}) para q_{in} fijo. Nótese valores superiores al 95% para los casos con zona de *merge* de 200 metros o más, con una dispersión que se reduce a medida que aumenta el flujo en la rampa, como es de esperarse. Por su parte, para una longitud de 100 metros se tienen valores de 90%, decreciendo ligeramente conforme aumenta el flujo. Sin embargo, para los casos con longitud de la zona de merge de 50 metros se percibe una disminución gradual pero importante, a partir de los mismos pares de flujos (q_{in}, q_{on}) en los que se apreciaron cambios en el flujo medido de la vía principal en la Figura 3.14. Esto sugiere que cuando la longitud de la zona de merge de la rampa es muy pequeña (50 metros en los casos estudiados), el flujo en la vía principal sufre alteraciones que no ocurren cuando la longitud es mayor, debidas a que un menor número de autos ingresa a la vía principal.

El razonamiento detrás de los comportamientos obtenidos es el siguiente. Considérese que al tener una longitud demasiado corta para la zona de *merge* habrá un número menor de vehículos que son candidatos a ingresar a la vía principal, de acuerdo a las reglas que definen la dinámica del modelo, ya que en dicha zona podrá permanecer un número menor de vehículos esperando a tener condiciones seguras de ingreso, por lo que se incrementará la formación de pelotones en la rampa que avanzarán más lentamente hacia la zona de *merge* haciendo menos frecuentes las incorporaciones exitosas (recordar que esto ocurre cuando $q_{in} + q_{on} \geq 2000$ veh/h y los congestionamientos pueden existir).

En concordancia con lo anterior se tiene que los tiempos de espera en la rampa (Figura 3.16), medidos como el tiempo que tarda en ingresar un vehículo desde que arriba (en el paso 1 del modelo) hasta que se incorpora exitosamente a la vía principal, aumentan para el caso en el que la longitud con $L_{merge} = 50$ m. Lo que es más, se aprecia que los tiempos comienzan a dispararse con valores de q_{on} menores a los que marcan el comienzo del descenso en los valores de flujo y porcentaje de ingreso de las figuras Figura 3.14 y Figura 3.15.

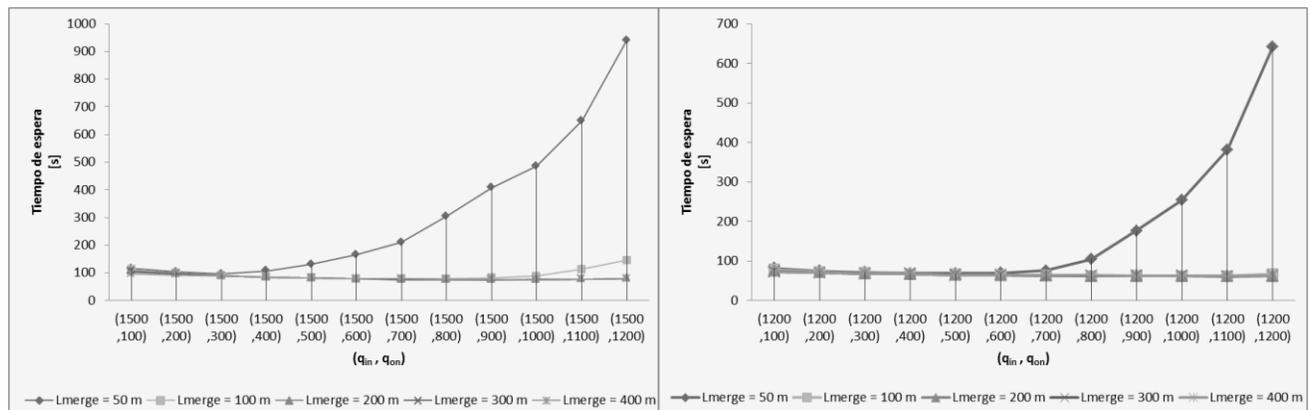


Figura 3.16 Tiempo promedio para que un vehículo logre ingresar a la vía principal desde la rampa para los diferentes valores de L_{merge} estudiados, partiendo de los flujos de ingreso q_{in} (flujo de ingreso a la rampa principal) y q_{on} (flujo de ingreso a la rampa).

Además, para el caso de $q_{in} = 1500$ veh/h y $L_{merge} = 100$ metros, se observa cómo el tiempo de espera comienza a incrementarse a partir de donde se tiene que $q_{on} = 1200$ veh/h, que es precisamente cuando los congestionamientos derivados de la rampa de acceso se empiezan a propagar más allá de la zona de ubicación de la misma (ver Figura 3.13).

Finalmente, en la Figura 3.17 se muestran los diagramas espacio-tiempo para el carril izquierdo (izquierda) y el carril derecho (derecha) respectivamente, para $q_{in}=1500$ y $q_{on}=1200$ veh/h y diferentes longitudes de la zona de *merge*. Como puede observarse, conforme menor sea la longitud de la zona de *merge*, el congestionamiento se propaga menos aguas arriba, además se observa una mayor uniformidad en los ingresos cuando la longitud es menor. En este sentido la utilización de una zona de convergencia pequeña es conveniente en virtud de reducir la demanda sobre la vía principal, manteniendo mejores condiciones de circulación sobre la misma.

Los resultados obtenidos sugieren una relación intrínseca entre la longitud de la zona de *merge* y las variaciones en el flujo de la vía principal alrededor de tal zona, originadas por cambios en el número de los vehículos que ingresan a través de la rampa. Además, las variaciones en el flujo tienen repercusiones en el tiempo de espera para que los vehículos de la rampa alcancen su objetivo de incorporarse al flujo de la vía principal, como se observó en la Figura 3.16. Este comportamiento aunado a que un menor número de vehículos de la rampa ingresa a la vía principal (Figura 3.15), conlleva a una formación de colas de ingreso a la rampa más largas.

Por lo tanto, en busca de lograr un equilibrio entre mejorar las condiciones de flujo y velocidad de la vía principal y la afectación que se tendrá para los vehículos de la rampa, se necesita una investigación más profunda, misma que queda fuera del alcance de este trabajo de tesis. No obstante, los resultados de simulación presentados en este trabajo de tesis indican que el modelo propuesto podría servir como una herramienta útil

para la realización de pruebas sobre la variación de las características de la zona de unión y evaluación de su funcionamiento.

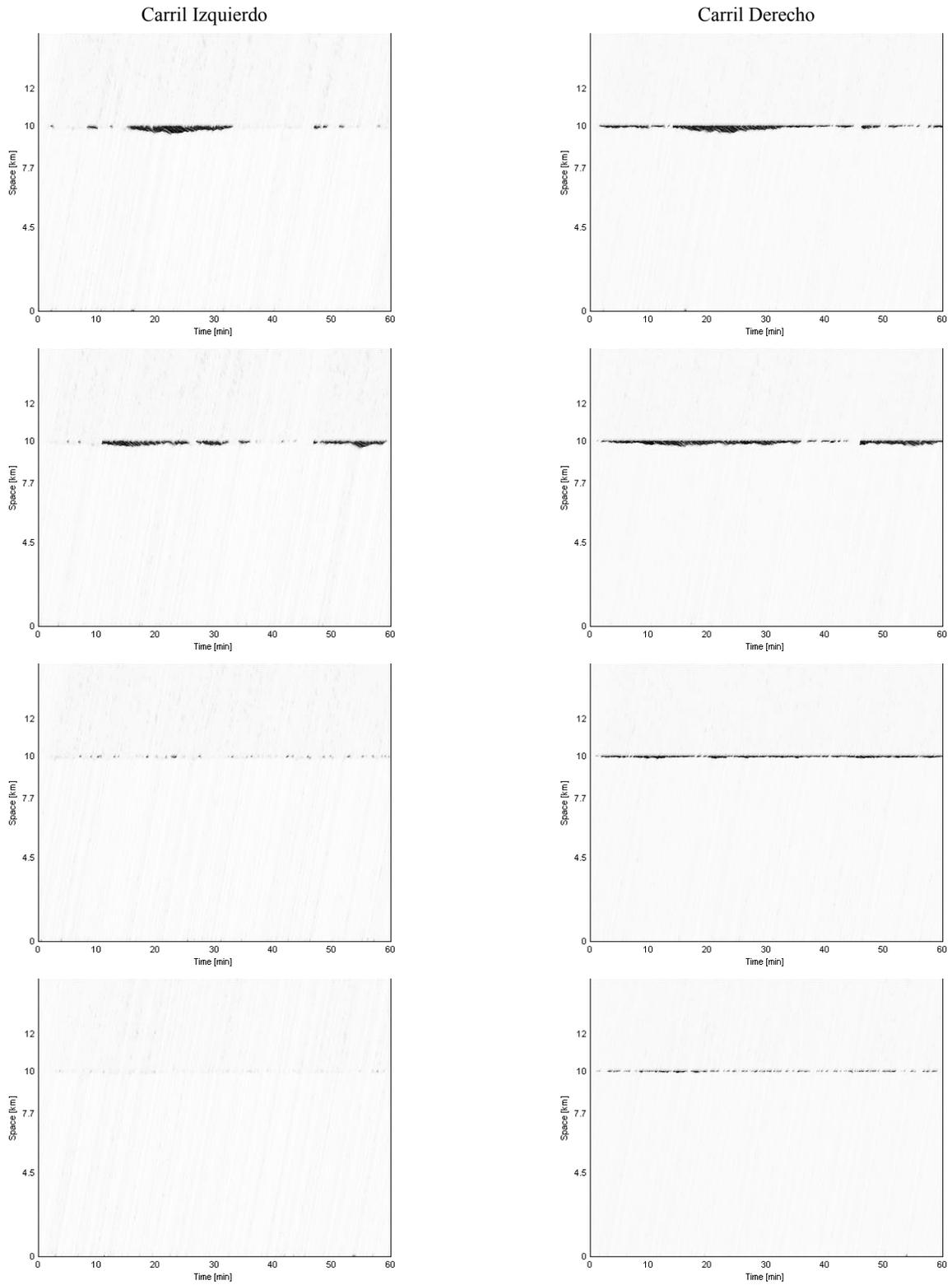


Figura 3.17 Diagramas espacio-tiempo para $q_{in}=1500$ y $q_{on}=1200$ veh/h para diferentes longitudes de la zona de *merge*. En orden de arriba hacia abajo, las imágenes corresponden a valores de $L_{merge}= 400m$, $L_{merge}= 300m$, $L_{merge}= 100m$ y $L_{merge}= 50m$.

Existen otros elementos que permiten un mayor grado de control sobre la interacción entre los vehículos de la rampa y de la vía principal, siendo este el objetivo principal de los mecanismos específicos de control de rampas de acceso revisados en el apartado 1.3.5.3 y que será retomado en la siguiente sección, donde se plantearán modificaciones al modelo propuesto para integrar un semáforo como mecanismo de control.

3.3 Modelación de una rampa de acceso con semáforo de control de tiempo fijo

En esta sección se presenta un nuevo modelo basado en AC para simular el desempeño de un sistema vial de dos carriles con reglas de cambio de carril asimétrico y una rampa de acceso controlada por un semáforo. El modelo permite abordar las situaciones en las que se tiene un semáforo binario en la rampa para controlar el ingreso de vehículos hacia la vía principal. Los propios vehículos y sus conductores son los que definen la dinámica vehicular de ingreso a la vía principal, así un vehículo que viaja por la rampa deberá revisar la situación de los vehículos que se encuentran en la vía principal, esperando a tener condiciones para poder ingresar de manera segura, tal y como el modelo que se introdujo en la sección previa. Sin embargo, para que un vehículo arribe a la zona donde puede incorporarse a la vía principal, primero deberá pasar por un punto de control donde se localiza el semáforo, por lo que se incorporan algunos elementos adicionales en las reglas del modelo que permiten definir este comportamiento.

3.3.1 Descripción del modelo

El modelo se define sobre una vía de dos carriles, con condiciones de frontera abierta y una rampa de acceso controlada por un semáforo con control de tiempo fijo del tipo *Single-Lane Multiple Cars per Green*, como el expuesto en el apartado 1.3.5.3. Por simplicidad, sólo se consideran dos fases del semáforo: una verde donde se permite el paso de vehículos y otra roja donde se limita el avance vehicular. La duración del ciclo completo del semáforo se denota por C :

$$C = T_v + T_r \quad (3.4)$$

donde T_v denota la duración de la fase verde y T_r la duración de la fase roja.

Cada uno de los dos carriles de la vía principal se compone de una retícula de $L_{principal}$ celdas de igual tamaño con condiciones de frontera abiertas. El carril que representa la rampa tiene una longitud de L_{ramp} celdas antes de que inicie la zona de *merge*. Cada celda del sistema tiene una longitud Δx y puede estar vacía u ocupada por un vehículo de longitud l_s en celdas. Además dichos vehículos puede tomar uno de los $v_{max} + 1$ valores permitidos $v = 0, 1, \dots, v_{max}$.

El carril de la rampa comienza en x_r y tiene una longitud L_{ramp} hasta antes de la posición del semáforo (x_s). A partir de ese punto comienza la zona de unión (*merge*) que es el área en la que los vehículos de la rampa tienen permitido ingresar a la vía principal, esta zona termina en posición señalada por x_{fin_merge} .

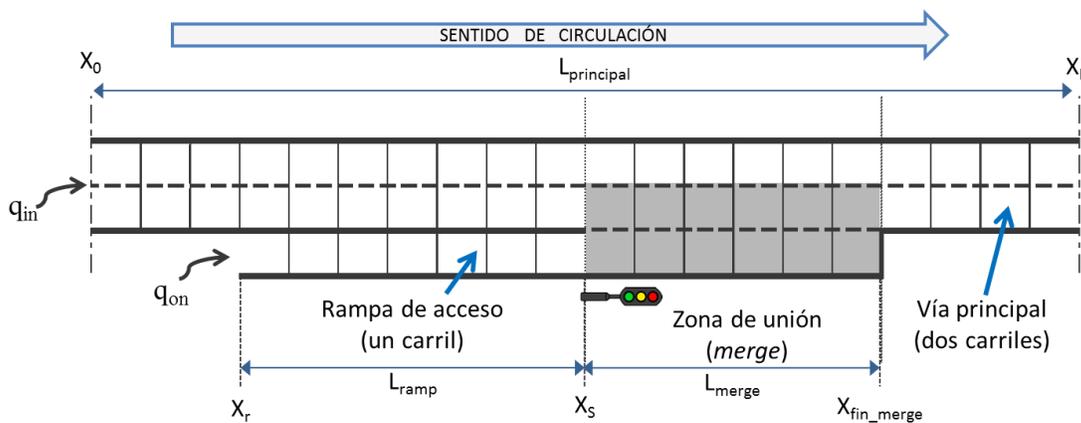


Figura 3.18 Esquema ilustrativo de los elementos considerados para el modelo con control mediante semáforo. La línea punteada indica que se permite cambio de carril. Línea gruesa indica que no se permite cambio de carril. La zona sombreada representa donde los vehículo de la rampa puede acceder a la vía principal. A los vehículos que circulan por la rampa sólo se les permite el paso hacia la zona de *merge* únicamente cuando el semáforo se encuentra en su fase verde.

El semáforo se ubica en la posición x_s como se observa en la Figura 3.18, de tal forma que sólo cuando se encuentre en su fase verde, se permite el libre paso de los vehículos de la rampa hacia la zona de unión con la vía principal, mientras que cuando está en rojo restringe dicho paso. El resto de los elementos considerados en este caso son análogos a los considerados en el apartado 3.2, esto es, se considera una vía principal de dos carriles, cada uno con longitud $L_{principal}$ en celdas. Las celdas tienen una longitud Δx y son numeradas en orden ascendente conforme al sentido de circulación de los vehículos, además cada una puede estar vacía u ocupada por un vehículo de longitud l_s en celdas. Dichos vehículos pueden tomar uno de los $v_{max} + 1$ valores permitidos $v = 0, 1, \dots, v_{max}$, y puede aumentar o disminuir su velocidad en un máximo de Δv unidades enteras por cada paso de tiempo (t), teniendo una capacidad máxima de desaceleración determinada por el parámetro M bajo condiciones de emergencia.

Por su parte, el flujo de ingreso a la vía principal se denota como q_{in} , mientras que el flujo de ingreso a la rampa se denota como q_{on} .

Una vez que han sido ilustrados los elementos considerados dentro del escenario a modelar, se procede a realizar la descripción de los pasos del modelo propuesto para operar con semáforo de control de tiempo fijo.

3.3.1.1 Pasos del modelo propuesto para rampas de acceso con semáforo como mecanismo de control.

El modelo se compone de 5 pasos que definen la dinámica del sistema, éstos se representan a manera de flujograma (Figura 3.19), enumerando cada uno de los pasos que forman parte del modelo.

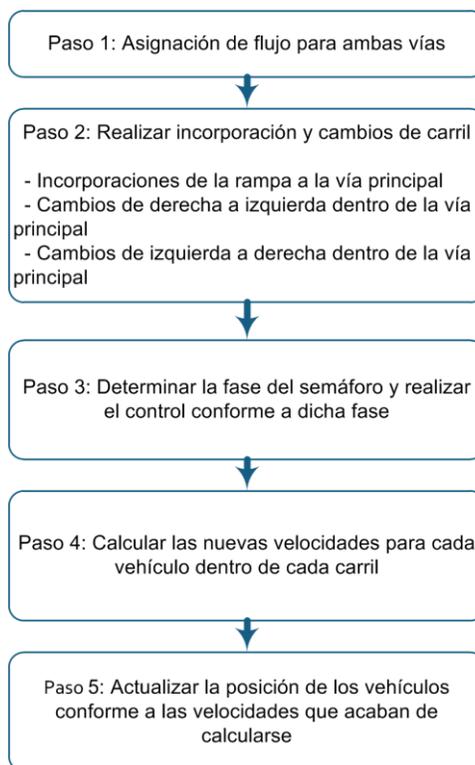


Figura 3.19 Diagrama de la secuencia de pasos del modelo propuesto para rampas de acceso con semáforo como mecanismo de control. Todos los pasos mostrados se realizan dentro de un mismo paso de tiempo

Nótese que a pesar de tomar como punto de partida el modelo presentado en la sección 3.2, es necesaria la inclusión de un paso para el manejo del semáforo, mismo que se realiza de manera posterior a la realización de los cambios de carril pero antes de la actualización de velocidades y posiciones. Esto se debe a que el semáforo únicamente afecta a los vehículos aguas-arriba de su posición, esto es, afecta a los vehículos que circulan por la

rampa y que aún no arriban a la zona de *merge*, por lo que no interfiere con el paso de la realización de cambios de carril, sino únicamente con la actualizaciones de velocidades y, por ende, con la actualización de posiciones.

De tal manera que los pasos 1 y 2 se realizan de la misma forma que se expusieron en el modelo para una rampa de acceso sin mecanismos de control específicos (sección 3.2), respetando todos los criterios y consideraciones expuestos con anterioridad. Motivo por el cual las ventajas de dicho modelo se extienden al modelo para rampas con semáforo, con lo que se refleja el fenómeno de que un conductor frente a una convergencia tomará en cuenta una estimación de la velocidad y posición de los vehículos que circulan por la vía principal, haciendo consideración de la afectación que su incorporación pudiese ocasionarles con la finalidad de evitar accidentes. Todo ello a partir de cambios en la velocidad conforme al modelo LAI original [43] y cambios de carril extendidos del modelo LAI para varios carriles [48], donde dichos cambios incluyen valores acordes a los establecidos en ingeniería del transporte.

Para describir el paso 3 del modelo, por lo que se definen 4 escenarios particulares con base en el estado del semáforo: cuando la fase de semáforo está en verde, cuando dicha fase está en rojo, cuando se realiza la transición de verde a rojo y cuando se realiza la transición de rojo a verde. Estos escenarios se analizan a continuación antes de la definición del paso 3.

- Fase verde

Como se aprecia en la Figura 3.20 y acorde a lo que se observa en el tráfico real, cuando la luz del semáforo está en verde el flujo de la rampa no se ve afectado por el semáforo, por lo que en este caso se cae en un escenario idéntico al estudiado en el caso anterior sin control de acceso, pues se trata a los vehículos de la rampa como si no hubiera ningún semáforo. Sea n el vehículo en estudio, $n+1$ es el vehículo que se encuentra justo enfrente del vehículo n conforme al sentido del flujo, $n-1$ es el vehículo que viaja justo por detrás del vehículo n . Además d_n es la distancia defensa a defensa que hay entre el vehículo n y el vehículo que viaja frente a él, d_{n-1} es la distancia defensa a defensa que hay entre el vehículo $n-1$ y el vehículo n , y así sucesivamente. Entonces, cada vehículo de la rampa puede calcular su nueva velocidad conforme a las reglas del modelo LAI de un carril, que corresponde al paso 4 del modelo aquí propuesto. Esto, visto desde el lado de vista del conductor, representa el hecho de que ante un semáforo en verde, un conductor estima la velocidad a la que continua su viaje con base en el vehículo que tiene frente a él y sus distancias y velocidades relativas.

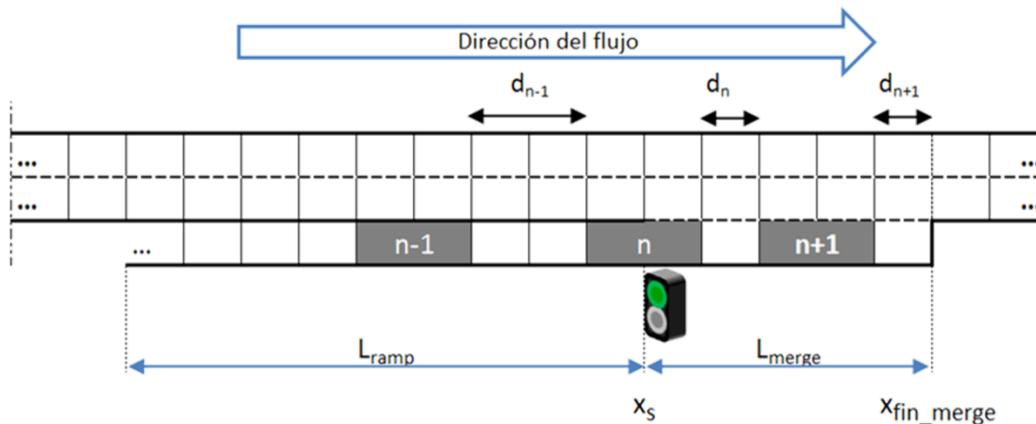


Figura 3.20 Diagrama de la fase verde para rampas de acceso con semáforo de control específico.

- Cambio de fase verde a fase roja

Esta fase explora lo que sucede cuando un semáforo cambia de luz verde a luz roja y determina la dinámica a seguir. Supóngase que un vehículo (n) está próximo a llegar al punto donde se sitúa un semáforo (posición x_s) y que en ese instante el semáforo pasa de la fase verde a la roja. Si se tiene una distancia adecuada para detenerse antes de rebasar la línea del semáforo, comenzará a frenar de forma natural para detener el movimiento de su vehículo y respetar el alto marcado por la luz roja. Esta situación se ilustra en la Figura 3.21, donde el vehículo n actualizará su velocidad en el paso 4 del modelo propuesto con base en la distancia d_n que tiene desde su defensa delantera hasta el semáforo.

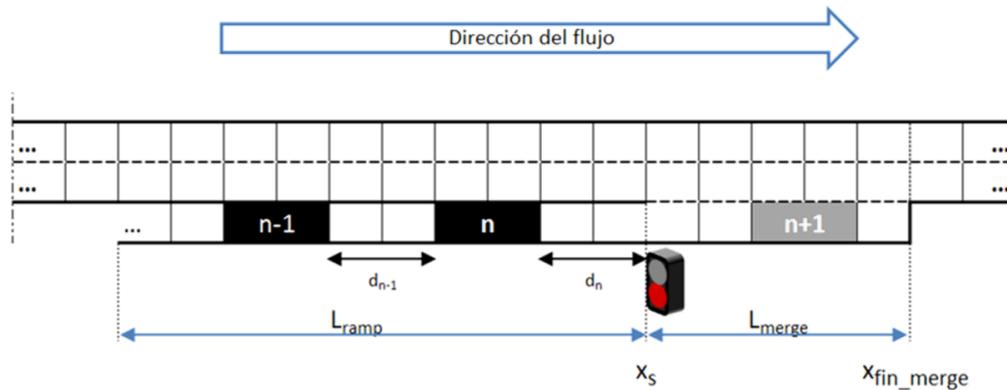


Figura 3.21 Esquema que representa al vehículo en estudio denominado n ante una luz roja.

No obstante, si el conductor del vehículo mencionado (n) estima, con base en su posición y velocidad actual, que no alcanzará a detenerse de manera segura antes de rebasar la línea del semáforo, el conductor tomará la decisión de continuar desplazándose conforme a la posición y velocidad del vehículo de enfrente, nombrado $n+1$. Este fenómeno corresponde a lo que pasa ante la luz ámbar de los semáforos con 3 fases como los que se observan en las intersecciones de muchas ciudades, pues ante una luz amarilla se detienen los conductores que estiman que pueden hacerlo antes del semáforo de forma segura. Mientras que los conductores que estiman que no alcanzarán a detenerse de forma segura antes de rebasar el semáforo, continúan su trayecto con base en el vehículo que tienen frente a ellos. Esta situación se representa en la Figura 3.22, donde el vehículo n evalúa si continúa su desplazamiento con base en su posición respecto al semáforo o con base en el vehículo de enfrente ($n+1$).

Sin embargo, al considerar que el semáforo del modelo propuesto no tiene fase ámbar, este comportamiento se reproduce en la transición de fases, mediante las distancias de seguridad de las ecuaciones (2.1), (2.2) y (2.3).

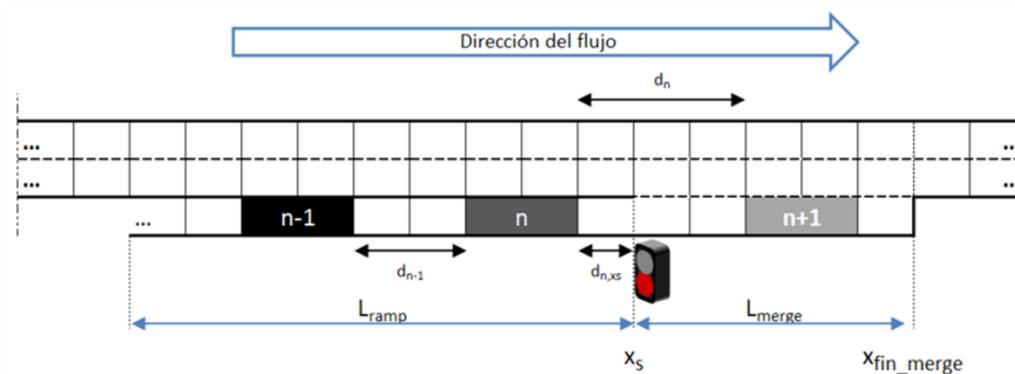


Figura 3.22 Representación del cambio de fase de verde a rojo en la rampa de acceso. Cuando el vehículo n no tiene una distancia respecto al semáforo (d_{n,x_s}) suficiente para detenerse de forma segura, continuará avanzando en base a la distancia (d_n) y velocidad (v_n) de su vehículo de enfrente ($n+1$).

De tal forma que cuando se cambia la fase del semáforo de verde a roja, el vehículo n de la rampa, que esté más cercano a la posición del semáforo (dada por x_s) y que aún no sobrepase su posición, evaluará si su distancia de seguimiento respecto a la posición del semáforo (denominada d_{n,x_s}), es la suficiente para detenerse de forma segura.

Para esto se emplea la distancia de seguimiento seguro con condiciones de frenado normal respecto a la posición del semáforo, determinada por d_{dec_n} (ecuación (2.3)) con base en su velocidad actual v_n , de tal forma que se satisfaga que:

Si

$$d_{n_xs} \geq d_{dec_n}(v_n, 0) \quad (3.5)$$

entonces

$$d_n := d_{n_xs} \text{ y } flag_n := brake$$

Esto significa que en adelante el vehículo n actualizará su velocidad, conforme al paso 4 de este modelo, considerando que debe detenerse antes de rebasar la posición del semáforo. En caso de que el vehículo n no tenga condiciones para detenerse de forma segura antes del semáforo, se hará la misma evaluación para el siguiente vehículo en sentido contrario al sentido de circulación de los vehículos hasta encontrar al primer vehículo que cumpla el criterio dado por la expresión (3.5), dicho vehículo será marcado como *brake* y así será denominado de aquí en adelante.

Al encontrar cuál es el vehículo *brake*, y hacer que éste tome en consideración al semáforo con luz roja, se logra que los vehículos que viaja detrás de él también consideren de manera indirecta al semáforo, ya que la rampa tiene un solo carril y no permite rebases ni colisiones conforme las reglas del modelo, por lo que cada vehículo toma en consideración la posición y velocidad del vehículo que tiene frente a sí para el paso 4 del modelo. Con ello se preserva la virtud del evitar desaceleraciones irreales y colisiones entre los vehículos por la acción del semáforo.

La búsqueda del vehículo *brake* se realiza antes de calcular las nuevas velocidades (paso 4 del modelo presentado en esta sección) con la finalidad de mantener los pasos 4 y 5 como aplicables a cada carril de manera independiente, hecho que refuerza la paralelización en la ejecución de las reglas del modelo.

- Fase roja

Cuando el semáforo se encuentra en fase roja los vehículos se comportan conforme a la Figura 3.23, donde el vehículo marcado como *break* siempre considera la posición del semáforo antes de calcular su nueva velocidad, con lo que se evitará que rebese el semáforo. Por consiguiente los vehículos que están detrás también ajustarán su velocidad contemplando la luz roja en el paso 4 de este modelo.

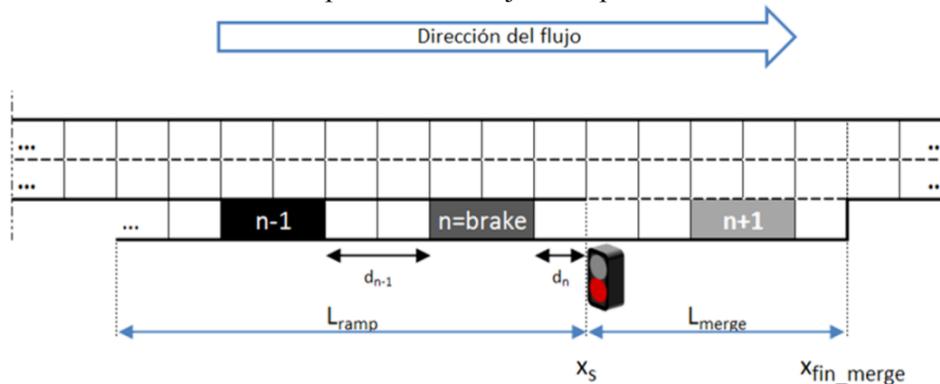


Figura 3.23. Representación del vehículo *break* deteniéndose ante la luz roja del semáforo.

- Cambio de fase roja a fase verde

Cuando se determine que la luz del semáforo cambia de rojo a verde es necesario liberar al vehículo *break*, de tal forma que pueda continuar su viaje al actualizar su velocidad en el paso 4. Por lo tanto en esta transición lo único que se hace es desmarcar al vehículo *break*.

A partir de los 4 escenarios anteriores se establece la regla a seguir para el paso 3 del nuevo modelo propuesto, quedando de la siguiente forma:

Paso 3. Determinar la fase del semáforo y realizar el control conforme a dicha fase

1. Determinar el color del semáforo para este paso de tiempo:
 $semáforo(t) := green$ o $semáforo(t) := red$
2. Determinar si hubo cambio de fase en el semáforo para marcar o desmarcar al vehículo *break* con base en la determinación de fases descritas previamente:
 - a) Si $semáforo(t) = green$ y $semáforo(t-1) = red$
 entonces encontrar el vehículo n más cercano al semáforo que satisfaga $d_{n_{xs}} \geq d_{dec_n}(v_n, 0)$ y $x_n < x_s$
 entonces $flag_n := brake$
 - b) Si $semáforo(t) = red$ y $semáforo(t-1) = green$ y $flag_n = brake$ entonces $flag_n := null$

La variable $semáforo(t)$ determina la fase del semáforo en el paso de tiempo actual; $semáforo(t-1)$ representa la fase del semáforo en el paso de tiempo anterior; $d_{n_{xs}}$ es la distancia que hay de la defensa delantera del vehículo n a la posición del semáforo; $d_{dec_n}(v_n, 0)$ es la distancia de seguimiento seguro entre el vehículo n y el semáforo con condiciones de desaceleración; v_n y x_n representan la velocidad y posición del vehículo n , respectivamente; x_s es la posición del semáforo; y $flag_n$ es una variable que indica si el vehículo n es el primer vehículo que ajustará su velocidad con base en la luz roja del semáforo (*brake*).

Paso 4. Cálculo de velocidades

Una vez que se ha determinado la fase actual del semáforo, se procede a calcular la nueva velocidad de cada vehículo del sistema bajo las condiciones que tiene dentro de su propio carril, por lo que para esta etapa puede verse cada carril como un sistema independiente en el que se aplican los pasos S1, S2 y S3 que corresponden a las reglas del modelo LAI de una vía, mismas que se exploraron en el apartado 2.2.1 de este documento.

Debe mencionarse que realiza una ligera modificación a dicho modelo, de tal forma que el vehículo que circula por la rampa que haya sido marcado como *brake* actualizará su velocidad conforme a la posición del semáforo (x_s), esto es:

$$\text{Si } flag_n = brake \text{ entonces } d_n(t) = x_s - x_n - l_n$$

Por lo que las distancias del paso S1 del modelo LAI de una vía para el vehículo marcado como *brake* quedan de la siguiente forma:

S1: Distancias seguras. Obtener el valor para

$$\begin{aligned} d_{dec_n} &= d_{dec}(v_n, 0) \\ d_{acc_n} &= d_{acc}(v_n, 0) \\ d_{keep_n} &= d_{keep}(v_n, 0) \end{aligned}$$

Con lo cual se reproduce de manera natural el hecho de que un vehículo irá ajustando su velocidad conforme se acerque al semáforo cuando éste se encuentre en su fase roja. Para todos los demás vehículos se emplea el paso S1 como se definió en el modelo LAI de una vía (apartado 2.2.1). Así, cuando el semáforo está en fase roja, se genera un vehículo ficticio con velocidad 0 en la posición del semáforo.

Paso 5. Actualización de posiciones (movimiento de los vehículos)

Cuando ya se tienen calculadas las nuevas velocidades para todos los vehículos, se procede a realizar el movimiento de los éstos, lo que consiste en actualizar sus posiciones dentro de cada carril con base en dicha velocidad, de la misma forma que fue explorada en el paso S4 del modelo LAI de una vía (apartado 2.2.1).

Es importante mencionar que los cinco pasos descritos se realizan dentro de un mismo paso de tiempo y en conjunto definen la dinámica del nuevo modelo.

A continuación se muestra la Tabla 3.2 donde se sintetizan las variables y parámetros del modelo propuesto:

Variable	Descripción	Parámetro	Descripción
x_n	Posición del vehículo n	v_{max}	Velocidad máxima
v_n	Velocidad del vehículo n	v_s	Velocidad lenta
Δv	Magnitud para incrementar/disminuir la velocidad en un paso de tiempo	l_s	Longitud del vehículo (en celdas)
d_{dec}	Distancia para frenar de manera segura en el siguiente paso de tiempo	M	Disminución máxima de velocidad en un paso de tiempo
d_{keep}	Distancia para mantener velocidad de manera segura en el siguiente paso de tiempo	R_s	Probabilidad de frenado aleatorio
d_{acc}	Distancia para acelerar de manera segura en el siguiente paso de tiempo	R_θ, R_δ, R_a	R_a es un parámetro estocástico para aplicarse en el paso S2, el cual tiene un valor entre R_θ y R_δ
d_{decM}	Distancia para frenar con la capacidad máxima de frenado M de manera segura en el siguiente paso de tiempo	P_{change}	Parámetro estocástico que determina la probabilidad de realizar o no un cambio de carril.
L_{merge} x_{fin_merge}	Longitud y posición del final de la zona de <i>merge</i> , respectivamente		
x_s <i>semáforo</i> (t)	Posición y fase actual del semáforo		
$flag_n$	Bandera que indica si el auto n deberá detenerse ante la luz roja del semáforo		

Tabla 3.2 Descripción de las variables principales y los parámetros del modelo propuesto vía principal de múltiples carriles con rampa de acceso controlada mediante semáforo de tiempo fijo y vehículos heterogéneos

En resumen, sólo se han adicionado tres variables al modelo con rampa de acceso que no consideraba semáforo. Tales variables son las necesarias para determinar el comportamiento de los vehículos ante el semáforo: dos que determinan la fase actual y posición del semáforo, y otra para establecer cuál es el primer vehículo que puede ajustar su velocidad de manera segura ante la luz roja del semáforo.

En lo referente a los parámetros, se preservan los mismos del modelo para la rampa de acceso sin mecanismo de control específico, mismo que a su vez, preservó los del modelo LAI multicarril. Así, se consigue mantener un número reducido de parámetros que es una cualidad destacable, especialmente considerando los escenarios que se pueden reproducir y que incluye elementos de anticipación de velocidad y posición, además de elementos de ingeniería de transporte que aseguran que no ocurran colisiones ni cambios irreales de velocidad.

Teniendo el modelo establecido, se procede a presentar algunas de las simulaciones realizadas con el mismo, junto con sus correspondientes resultados que son tema de la siguiente sub-sección.

3.3.2 Simulación y análisis de resultados del modelo propuesto para rampas con semáforo de control de tiempo fijo

A continuación se presentan los resultados de simulación del modelo propuesto sobre una carretera de longitud $L_{principal} = 6000$ celdas (15 km) con condiciones de frontera abierta, en la que cuando un vehículo llega rebasa el final de la carretera sale del sistema. Los dos carriles que forman dicha carretera conforman la vía principal. El

carril correspondiente a la rampa de acceso tiene una longitud $L_{ramp} = 300$ celdas (750m) desde su inicio hasta antes de la zona de merge. La zona de merge tiene una longitud $L_{merge} = 120$ celdas (300 m) y termina en el kilómetro 10 de la vía principal: $x_{fin_merge} = 4000$. El semáforo se localiza en la posición $x_s = 3880$. Cada celda tiene una longitud $\Delta x = 2.5$ m, y se enumeran de menor a mayor conforme al sentido de circulación de los vehículos.

Para el ingreso de vehículos, el flujo denotado como q_{in} es inyectado a cada carril en la vía principal, mientras que el flujo de entrada para la rampa se denota como q_{on} . Ambos toman diferentes valores que serán expuestos en los diferentes experimentos, pero siempre se mantiene un porcentaje del 10% como camiones y el resto como automóviles.

Se consideraron dos tipos de vehículos, el primer tipo son automóviles con longitud de 5.0 m ($l_s = 2$ celdas) y velocidad máxima de 108 km/h ($v_{max} = 12$ celdas/paso de tiempo); el segundo tipo son camiones con longitud 10.0 m ($l_s = 4$ celdas) y velocidad máxima de 81 km/h ($v_{max} = 9$ celdas/paso de tiempo) respectivamente.

El valor del parámetro de probabilidad de cambio p_{change} se establece a 1.0 para el cambio del carril de la rampa a la vía principal lo que significa que siempre que se tenga condiciones para ingresar a la vía principal se hará el ingreso; el mismo valor se establece para cambios de carril del derecho al izquierdo en la vía principal, 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. Esto significa que para cambios a la derecha, la probabilidad de cambio de un camión es mucho más alta que la de un automóvil; la razón es que con ello se busca reproducir 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. Tómese en cuenta que las reglas viales de México establecen que el carril izquierdo debe usarse principalmente para rebasar y que los camiones tienen una menor velocidad máxima, por lo que para lograr un desempeño acorde a la realidad es necesario que los camiones permitan ser rebasados por los vehículos que son más veloces, fenómeno observado en las carreteras de nuestro país. Además, 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, valores que son recomendados por H. Guzmán, et al. [48] en la sintonización de los parámetros del modelo LAI para varios carriles con el objetivo de aminorar la formación de taponés que nunca se disuelven en el caso de que dos camiones que viajan en celdas contiguas alcancen su máxima velocidad simultáneamente y jamás la cambien.

En cuanto al resto de los parámetros, todos los resultados de simulación que se presentan en este trabajo emplearon los siguientes valores para los parámetros: $R_d = 1.0$, $R_o = 0.8$, $M = 2$ y $v_s = 3$ para todos los vehículos.

Cada paso de tiempo t es de 1 segundo. En cada simulación se dejan pasar los primeros $TI = 420$ pasos de tiempo antes de comenzar a tomar mediciones, en este periodo únicamente se ingresan autos en la vía principal, siendo tiempo suficiente para que un vehículo ingresado en el comienzo de la vía principal, con velocidad máxima de 9 celdas por paso de tiempo, llegue al punto donde se localiza el comienzo de la zona de merge (celda 3800). Tras dejar pasar esos 420 pasos de tiempo, se comienza a ingresar vehículos en la rampa y se inicia la toma de mediciones durante un tiempo 3600 pasos de tiempo.

A partir de los estudios de Chaudhary, et al. [69] se establecieron valores de tiempo para el ciclo del semáforo (C), para la duración de la fase verde (T_v) y para la duración de la fase roja (T_r) del mismo, con el objetivo de que el semáforo permita el paso de 1, 2 o 3 vehículos por cada fase verde. Cabe mencionar que los valores que se emplearon para las simulaciones se redondearon a valores enteros en segundos, ya que en el caso las simulaciones realizadas se trabaja con pasos de tiempo de 1 segundo. Además, debido a que el nuevo modelo no considera la existencia de luz amarilla, las fases roja y amarilla de los valores dados por Chaudhary fueron agrupadas dentro de la fase roja para las simulaciones. Dichos valores se concentran en la Tabla 3.3

	Vehículos por ciclo		
	1	2	3
Fase roja [s]	3	3	4
Fase verde [s]	1	4	6
Ciclo completo [s]	4	7	10
Capacidad Máxima Esperada [veh/h]	900	1028	1080

Tabla 3.3. Duración de las fases del semáforo para permitir el paso de 1, 2 o 3 vehículos por cada ciclo

Para evaluar el número de vehículos que se permite pasar con cada una de los valores de fase establecidos, se realizaron simulaciones con diferentes valores de demanda en la rampa (q_{on}) sin ingresar flujo en la vía principal, midiendo la capacidad experimental como el número de vehículos que rebasan la línea del semáforo por hora para cada valor de demanda en la rampa entre 800 y 2500 veh/h, en múltiplos de 100. Cada experimento se realizó 100 veces para promediar sus resultados, mismos que se muestran en la Tabla 3.4, donde cada renglón condensa los valores promedio obtenidos de todos los experimentos para cada valor de demanda en la rampa con cada ciclo establecido. El porcentaje de vehículos que rebasan el semáforo se calculó con base en el número de vehículos que rebasan esa misma posición cuando no hay semáforo, esto con la finalidad de tener porcentajes referidos a la diferencia que se origina por la acción del semáforo, ya que no siempre todos los vehículos que ingresan a la rampa alcanzan a rebasar la posición del semáforo aun cuando éste permita el libre paso a todos. Esto se debe tanto a la forma de ingreso de los vehículos como a las características de la rampa, puesto que los vehículos son ingresados en el comienzo de la rampa con una velocidad que varía en función de la distancia y velocidad del vehículo que esté frente a ellos, y a partir de ahí recorren una longitud $L_{ramp} = 750m$ para llegar a la posición del semáforo. Es importante mencionar que se consideraron casos donde la demanda en la rampa supera la capacidad máxima esperada de acuerdo al ciclo del semáforo, con la finalidad de evaluar el funcionamiento del modelo, es decir, que no es posible ingresen vehículos más allá de la capacidad máxima esperada.

Demanda en la rampa [veh/h]	Sin semáforo		Ciclo 4[s] Verde 1[s]			Ciclo 7[s] Verde 4[s]			Ciclo 10[s] Verde 6[s]		
	Capacidad Medida [veh/h]	Capacidad Medida / Demanda	Capacidad Medida [veh/h]	Capacidad Medida / Demanda	Vehículos que pasan el semáforo	Capacidad Medida [veh/h]	Capacidad Medida / Demanda	Vehículos que pasan el semáforo	Capacidad Medida [veh/h]	Capacidad Medida / Demanda	Vehículos que pasan el semáforo
700	690.27	0.99	680.50	0.97	98.8%	688.37	0.98	99.7%	683.77	0.98	99.7%
800	793.60	0.99	722.37	0.90	91.3%	792.03	0.99	99.8%	781.20	0.98	99.6%
900	888.77	0.99	727.57	0.81	81.2%	886.97	0.99	99.8%	879.58	0.98	99.6%
1000	985.20	0.99	727.07	0.73	73.2%	981.63	0.98	99.6%	979.60	0.98	99.6%
1100	1090.43	0.99	728.00	0.66	66.5%	990.10	0.90	90.8%	1066.70	0.97	98.9%
1200	1186.50	0.99	728.37	0.61	61.1%	986.43	0.82	83.1%	1073.34	0.89	91.4%
1300	1286.37	0.99	727.87	0.56	56.6%	984.33	0.76	76.5%	1078.10	0.83	83.8%
1400	1379.23	0.99	727.53	0.52	52.7%	989.13	0.71	71.7%	1081.60	0.77	78.4%
1500	1484.97	0.99	728.00	0.49	49.0%	986.47	0.66	66.4%	1081.67	0.72	72.8%

Tabla 3.4 Porcentaje de vehículos que rebasan el semáforo para diferentes valores de demanda. La capacidad medida se refiere al número promedio de vehículos que rebasaron la posición del semáforo por hora. Los cocientes de capacidad medida sobre demanda indican la porción de vehículos que rebasan la posición del semáforo respecto al número de vehículos que arriban a la rampa.

	Ciclo 4[s] Verde 1[s]	Ciclo 7[s] Verde 4[s]	Ciclo 10[s] Verde 6[s]
Capacidad Teórica [veh/h]	900	1028	1080
Capacidad Medida [veh/h]	727.77	987.29	1080.55
Error relativo entre la capacidad teórica y la capacidad medida	19%	3.96%	0.05%

Tabla 3.5 Error relativo de la capacidad medida respecto a la teórica. La capacidad medida se obtuvo como el promedio de las mediciones de capacidad para demandas mayores a la demanda máxima esperada. El error se calcula como el cociente de la diferencia de las capacidades teórica y medida, sobre la capacidad máxima esperada.

Se observa que para los valores propuestos para los ciclos de 4 y 7 segundos el número de vehículos que rebasa el semáforo permanece por debajo del valor esperado (900 y 1028 veh/h respectivamente), aun cuando la demanda de la rampa rebasa el valor de la capacidad teórica. Adicionalmente, los valores de error encontrados para estos dos casos son altos, indicando que los valores establecidos tanto para el ciclo total como para la fase verde, no son los adecuados para lograr la capacidad deseada. Esto puede explicarse por la acción de dos

factores, el primero referente a la operación del semáforo y el segundo relacionado con el cálculo de la velocidad. En cuanto a la operación del semáforo, se tiene que considerar que los valores propuestos por Chaudhary, et al. [69] incluyen centésimas de segundo, y en las simulaciones realizadas el paso de tiempo es de 1 segundo, por ello se realizaron redondeos en los valores de duración de cada fase, lo que acarrea un factor de error. Adicionalmente, Chaudhary propone estos tiempos considerando que existe una fase amarilla, mientras que el modelo propuesto sólo incluye fase verde y roja, por lo que la duración de la fase amarilla y de la fase roja fueron agrupadas dentro de la fase roja del modelo propuesto conforme a las consideraciones expuestas en el apartado 3.3.1.1 (transición de fase verde a fase roja). El segundo factor tiene que ver con el paso S3a del modelo LAI que establece una probabilidad de retardo en la aceleración con base en el parámetro R_a , dicho retardo sirve para que el modelo reproduzca el fenómeno de arranque lento y represente el hecho de que algunos conductores tienen un tiempo de reacción de entre 1 y 2 segundos para cambiar su velocidad cuando sus condiciones de manejo cambian.

A partir de los dos factores expuestos, considere que la duración del ciclo de 4 segundos y fase verde de 1 segundos son exactamente los valores expuestos por Chaudhary [69], por lo que se esperaría que el factor del redondeo no afectase este caso. Así mismo, mediciones de campo encontradas en la literatura [25] [69] indican que la capacidad real con esos valores es de 800 veh/h, ya que se necesita una mayor duración del ciclo (sugiriendo incrementarla a 4.5 segundos) debido a que algunos conductores titubean sobre si deben avanzar o detenerse antes del semáforo, haciendo que para rebasar el semáforo necesiten dos ciclos en lugar de uno. Esto está intrínsecamente relacionado con el segundo factor, pues este reproduce en cierta manera el comportamiento mencionado de tardar en decidir si se avanza o no, especialmente para velocidades bajas. Al volver a calcular el error pero respecto al valor encontrado en las pruebas de campo se obtiene un porcentaje de 9%, que es mucho más favorable, aunque no deja de estar un poco alejado del valor deseado. Con este nuevo cálculo se actualiza la tabla de errores quedando reflejado tal cambio en la Tabla 3.6

	Ciclo 4[s] Verde 1[s]	Ciclo 7[s] Verde 4[s]	Ciclo 10[s] Verde 6[s]
Capacidad Esperada [veh/h]	800	1028	1080
Capacidad Medida [veh/h]	727.77	987.29	1080.55
Error relativo entre la capacidad esperada y la capacidad medida	9%	3.96%	0.05%

Tabla 3.6 Error relativo de la capacidad medida respecto a la esperada. La capacidad medida se obtuvo como el promedio de las mediciones de capacidad para demandas mayores a la demanda teórica. El error se calcula como el cociente de la diferencia de las capacidades esperada y medida, sobre la capacidad medida.

Ahora considere el ciclo de 10 segundos con fase en verde de 6 segundos, para este caso se realizó un redondeo respecto a los valores sugeridos por Chaudhary [69] (9.8 y 5.5 segundos, respectivamente). En este caso se alcanzó un error de medio punto porcentual respecto a la capacidad teórica (1080 veh/h) a partir de una demanda de 1100 o más veh/h. Esto sugiere que pese al redondeo realizado, la aproximación que se tiene es bastante buena. En este sentido debe mencionarse que con dichos valores de ciclo y fase verde se busca que pasen 3 vehículos por cada ciclo, lo que el propio Chaudhary menciona como una combinación de valores que permite mayores velocidades promedio en la rampa. Entonces, al tener una duración mayor de la fase verde se disminuye la probabilidad de tener vehículos con velocidades bajas (respecto al valor de v_s), por lo que la regla de aceleración retardada (*slow to start*) del paso S3a del modelo LAI tiene una menor repercusión, ya que dicha regla afecta únicamente a los vehículos que tienen una velocidad menor a v_s .

Entonces, el análisis de los resultados condensados en la Tabla 3.4 y la Tabla 3.5, sugiere que el modelo propuesto permite reproducir la acción del semáforo sobre la capacidad de la rampa, especialmente para tiempos de ciclo que favorezcan el ingreso de vehículos a mayor velocidad, siendo de gran importancia hacer los ajustes pertinentes en los tiempos de duración de cada fase al trabajar con valores de tiempo discretos. Además, es de especial atención considerar los valores establecidos para los parámetros R_o , R_d , R_a y v_s , que determinan el retardo en la aceleración para ciclos de semáforo cortos, donde el tiempo de reacción del conductor ante un semáforo debe ser menor que en circunstancias normales de manejo, ya que cuando un semáforo permite el ingreso de únicamente uno o dos vehículos por cada fase verde, los conductores tienden a estar más atentos al cambio de luz, por lo que su reacción puede ser más rápida que cuando van conduciendo normalmente. Es importante enfatizar que de acuerdo a la literatura una eficiencia superior al 80% se considera como buena y los resultados

indican que para todos los ciclos del semáforo considerados se supera la misma.

De manera adicional, se realizaron experimentos con los tiempos establecidos en la Tabla 3.3 para probar el funcionamiento del control para algunos valores de flujo de ingreso en la vía principal y demanda en la rampa, midiendo el flujo promedio por carril de la vía principal y su velocidad promedio, además del tiempo de espera promedio que le toma a un vehículo de la rampa ingresar a la vía principal. Todo esto con la finalidad de explorar la posibilidad de emplear el modelo propuesto para la evaluar diferentes estrategias de control de rampas de acceso.

En cada caso se realizaron 100 experimentos con los valores de los parámetros establecidos al comienzo de esta sección. Los resultados se pueden apreciar en la Tabla 3.7 y las gráficas siguientes. Es importante mencionar que la estrategia de permitir el paso de sólo un vehículo por ciclo no fue contemplada para valores de demanda en la rampa de 900 o más veh/h ya que, de acuerdo a la Tabla 3.6, los valores de capacidad que se obtienen en la simulación para demandas en la rampa mayores o iguales 900 veh/h, presentan un alejamiento de hasta 9% respecto a los valores observados en campo. Por lo que los resultados de la simulación con los parámetros establecidos no son concluyentes para esta estrategia de control cuando se alcanza o rebasa dicha demanda en la rampa.

(q_{in}, q_{on})	Demanda en la rampa [veh/h]	Sin control			1 vehículo por ciclo			2 vehículos por ciclo			3 vehículos por ciclo		
		Tiempo de espera en rampa [s]	Velocidad en la vía Principal [km/h]	Flujo en la vía Principal [veh/h]	Tiempo de espera en rampa [s]	Velocidad en la vía Principal [km/h]	Flujo en la vía Principal [veh/h]	Tiempo de espera en rampa [s]	Velocidad en la vía Principal [km/h]	Flujo en la vía Principal [veh/h]	Tiempo de espera [s]	Velocidad Promedio en vía Principal [km/h]	Flujo Promedio en vía Principal [veh/h]
(1900, 700)	700	94.02	97.28	2003.77	118.65	98.15	1999.61	96.25	97.30	2006.12	95.44	97.73	2003.96
(1400, 800)	800	71.61	106.25	1526.95	216.56	106.46	1527.49	71.73	106.31	1531.64	71.97	106.32	1534.54
(1800, 900)	900	85.09	92.13	1924.64				87.14	93.74	1932.20	88.15	93.68	1924.94
(1200, 1000)	1000	62.44	106.45	1363.70				74.29	106.47	1363.55	65.41	106.49	1365.65
(1700, 1100)	1100	84.71	90.55	1855.83				159.21	94.45	1855.08	104.55	92.16	1867.22
(1600, 1200)	1200	84.81	95.45	1783.78				88.65	103.48	1768.02	135.67	101.20	1774.96
(2000, 1200)	1200	91.48	64.70	2113.20				92.88	70.89	2103.66	106.37	68.49	2114.16

Tabla 3.7 Tiempos de espera en la rampa, velocidades y flujos promedio en la vía principal para diferentes demandas en la rampa con las 3 estrategias de control

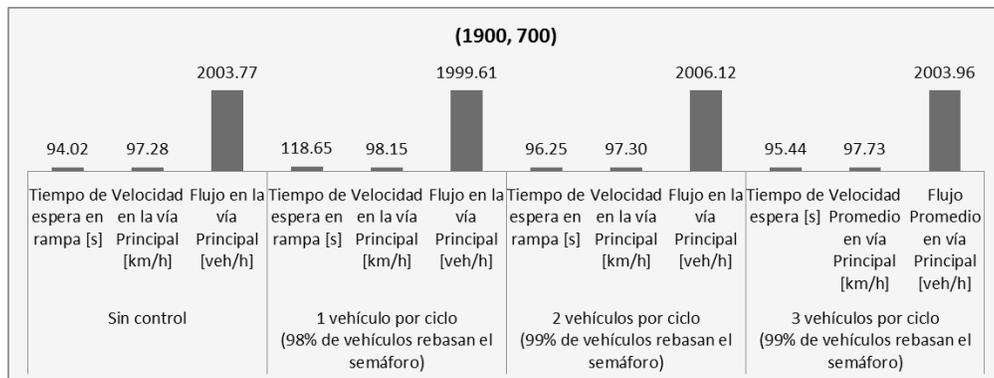


Figura 3.24 Tiempos de espera en la rampa, velocidades y flujos promedio en la vía principal para las 3 estrategias de control con flujos de entrada $(q_{in}, q_{on}) = (1900, 700)$ veh/h

A partir de la Tabla 3.7 se generaron gráficas para un mejor análisis de los resultados. Considere la Figura 3.24 que corresponde a una demanda en la rampa (q_{on}) de 700 veh/h con un flujo de entrada a la vía principal (q_{in}) de 1900 veh/h. Para la estrategia de permitir el paso de 3 vehículos por ciclo, se observa que aumenta el tiempo de espera en la rampa respecto al caso sin control, al tiempo que no existe un incremento considerable en los valores de flujo y velocidad promedio en la vía principal, lo que sugiere que esta estrategia no es adecuada para emplearse en condiciones como las del escenario planteado, puesto que dos de los objetivos principales del

control de rampas de acceso son mejorar las condiciones de los vehículos que circulan por la vía principal, disminuir el consumo de combustibles y la emisión de gases por parte de los vehículos, además de reducir los accidentes [25]. Por su parte, la estrategia de permitir el paso a sólo un vehículo por ciclo maximiza la velocidad promedio en la vía principal, pero a costo de incrementar el tiempo de espera en más de 10 segundos y reducir el flujo respecto a los valores que se tienen sin estrategia de control, por lo que cumple parcialmente con los objetivos antes mencionados. Por otra parte, se puede apreciar que el mayor flujo en la vía principal se consigue con la estrategia de dejar pasar 2 vehículos por ciclo. Además, la velocidad promedio de los vehículos que circulan por la vía principal, así como el tiempo promedio de espera de los vehículos en la rampa, se mantienen ligeramente por encima de los valores que se tienen cuando no se emplea estrategia de control; permitiendo pasar el 99% de los vehículos que acceden a la rampa, por lo que se sugiere que esta estrategia es la que muestra el mejor equilibrio de los resultados de su aplicación en la situación de flujos de entrada $(q_{in}, q_{on}) = (1900, 700)$ veh/h.

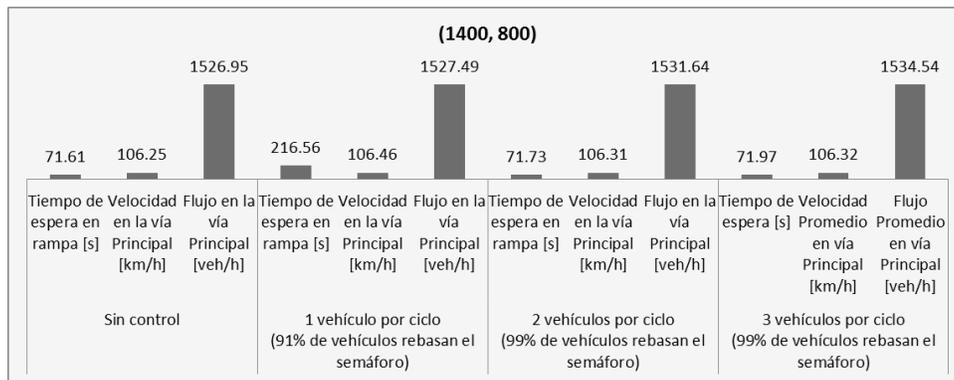


Figura 3.25 Tiempos de espera en la rampa, velocidades y flujos promedio en la vía principal para 2 estrategias de control con flujos de entrada $(q_{in}, q_{on}) = (1400, 800)$ veh/h

En la Figura 3.25 se tiene el caso de un punto donde se comienza a formar un congestionamiento localizado (*Localized Jam*) conforme a la Figura 3.13 de la sección 3.2.2.1. Se puede apreciar que aún sin control, la velocidad es alta, sin embargo con las 3 estrategias de control se mejora ligeramente la velocidad. En cuanto al flujo, el valor más alto de tiene cuando se permite el paso de 3 vehículos por ciclo, mientras que los tiempos de espera permanecen muy cercanos a cuando no se emplea control. De esto se infiere que el mayor beneficio se logra con la estrategia de permitir pasar tres vehículos por ciclo, seguida muy de cerca por la estrategia de permitir el paso de dos vehículos. Por otra parte, en la misma figura se aprecia que la estrategia de un solo auto por ciclo comienza a disparar lo tiempos de espera en la rampa, aun cuando el beneficio en la vía principal es bajo.

De manera similar al caso anterior, en la Figura 3.26, para valores de q_{in} y q_{on} que se encuentran en el límite donde comienzan a formarse congestionamientos localizados (*Localized Jam*), hay una mínima mejoría tanto en flujo como en velocidad cuando se permiten 3 vehículos por ciclo. En el caso de la Figura 3.27 se tiene un menor tiempo de espera, aunado a una mayor velocidad y un flujo mayor cuando se permiten 2 vehículos por ciclo, lo que lleva a considerar esta estrategia como la más conveniente para el caso expuesto.

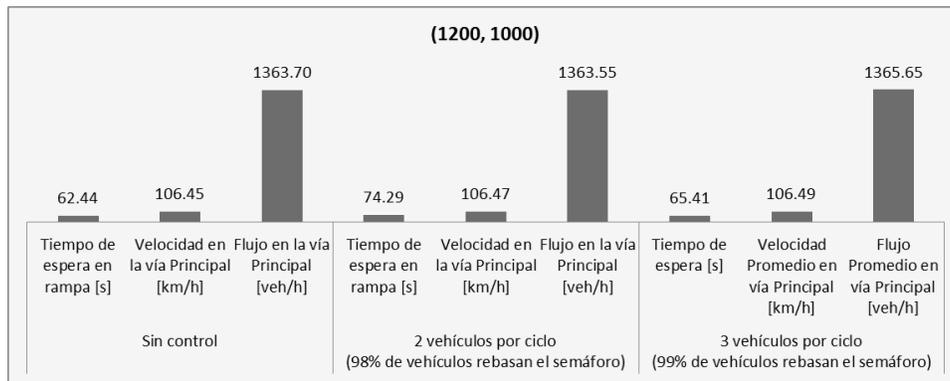


Figura 3.26 Tiempos de espera en la rampa, velocidades y flujos promedio en la vía principal para 2 estrategias de control con flujos de entrada $(q_{in}, q_{on}) = (1200, 1000)$ veh/h

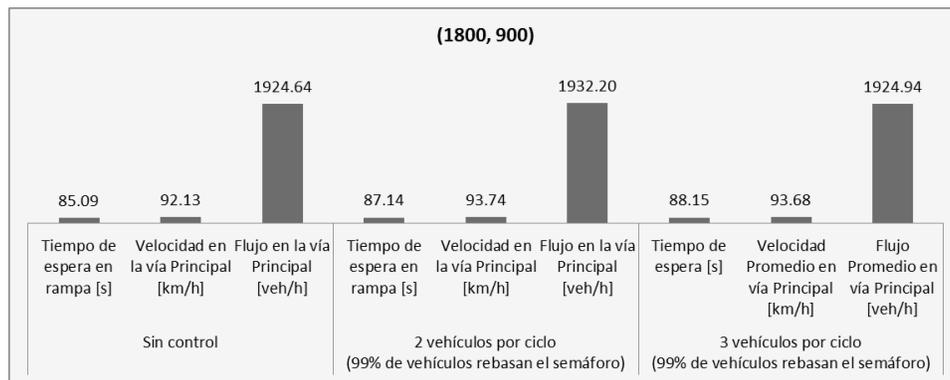


Figura 3.27 Tiempos de espera en la rampa, velocidades y flujos promedio en la vía principal para 2 estrategias de control con flujos de entrada $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 900)$ veh/h

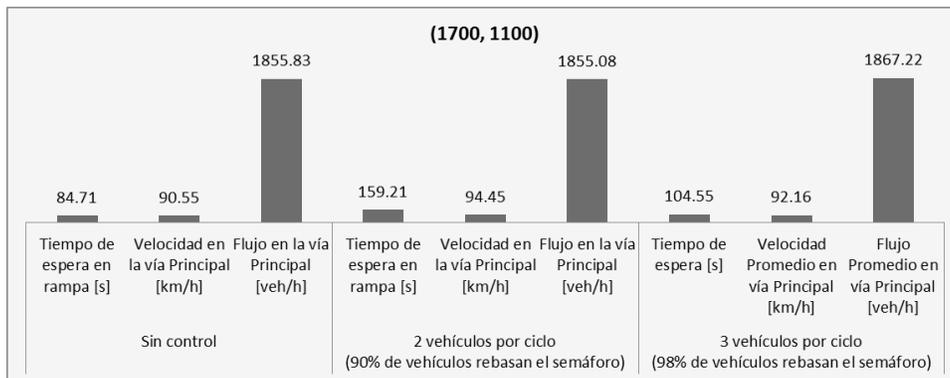


Figura 3.28 Tiempos de espera en la rampa, velocidades y flujos promedio en la vía principal para 2 estrategias de control con flujos de entrada $(q_{in}, q_{on}) = (1700, 1100)$ veh/h

Por otro lado, en cuanto a la Figura 3.28 se observa que para ese caso el valor de flujo más alto se tiene con la estrategia de permitir el paso de 3 vehículos por ciclo, sin embargo la mayor velocidad se tiene cuando sólo se permiten 2 vehículos por ciclo. Esto se debe a que dichas estrategias permiten el ingreso de 98% y 90% respectivamente, por lo que, al tener un menor número de vehículos que ingresan con la estrategia de 2 vehículos por ciclo, se permite una muy ligera mejoría en la velocidad de la vía principal ligada a un mayor tiempo de espera en la rampa.

Es de importancia resaltar que los valores de flujo de las figuras anteriores (de la Figura 3.24 a la Figura 3.28) corresponden a una fase donde los congestionamientos no son significativos (ver diagrama de fases en la Figura 3.13). Por lo que se puede concluir, que casos del flujo $(q_{in} + q_{on})$ correspondientes a fases localizadas en el caso

sin control, no se observa una mejoría notoria al considerar control de acceso, como es de esperarse, ya que para estos casos los congestionamientos que pueden surgir se localizan en la posición de la rampa y no se propagan más allá de la zona de *merge*.

Para demandas más altas en la rampa, donde además se han formado congestionamientos más fuertes sobre la vía principal como el caso de la Figura 3.29 y, especialmente, el de la Figura 3.30, se aprecia que a pesar de poder llegar a reducir de manera moderada el flujo promedio sobre la vía principal, las estrategias de control permiten un aumento en la velocidad promedio sobre dicha vía, especialmente cuando se permite el paso de dos vehículos por ciclo. Esto se atribuye a que, conforme a lo estudiado en el apartado 1.3.5.3, una de las principales ventajas de emplear estrategias de control es que permiten controlar el ritmo con el que los vehículos de la rampa ingresan a la vía principal, lo que conlleva a que los ingresos sean más suaves y ordenados, reduciendo la probabilidad de que un conductor de la vía principal deba frenar de forma brusca para evitar que suceda un accidente originado por el ingreso agresivo de uno o varios vehículos de la rampa. No obstante, para alcanzar ese beneficio de seguridad en la vía principal, el número de vehículos que ingresan desde la rampa se ve reducido, lo que promueve la formación de colas en la rampa de acceso. Sin embargo, como lo señala P. Stewart [25] muchas veces esta situación tiene la virtud de fomentar que los conductores eviten ingresar a carreteras y otras vías rápidas para hacer recorridos muy cortos, lo que ayuda a reducir la demanda de las rampas de acceso de manera natural.

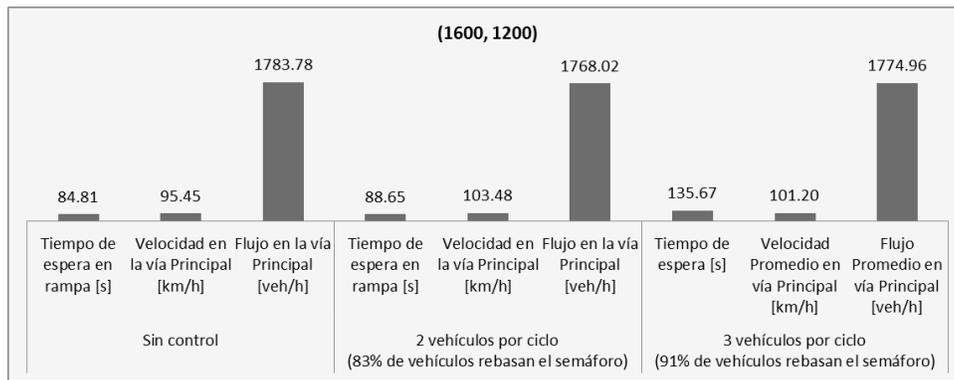


Figura 3.29 Tiempos de espera en la rampa, velocidades y flujos promedio en la vía principal para 2 estrategias de control con flujos de entrada $(q_{in}, q_{on}) = (1600, 1200)$ veh/h

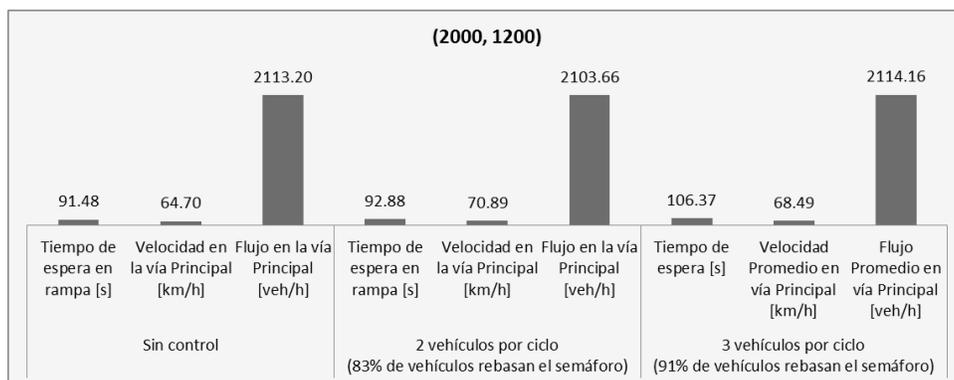


Figura 3.30 Tiempos de espera en la rampa, velocidades y flujos promedio en la vía principal para 2 estrategias de control con flujos de entrada $(q_{in}, q_{on}) = (2000, 1200)$ veh/h

Con los ejemplos anteriores se observa que el modelo propuesto para rampas de acceso con semáforo de control permite realizar análisis de esquemas de control básico como las expuestas en este trabajo, principalmente para esquemas de control con fases que duren más de un segundo, siendo destacable el apego a los valores teóricos obtenidos en las simulaciones con ciclo de 10 segundos. Sin embargo, es debido mencionar que se requiere un

análisis más profundo de los efectos de esta y otras estrategias de control para llegar a resultados con mayor peso que permitan hacer una determinación más fuerte sobre las repercusiones de la aplicación de dichas estrategias. Siendo ésta una labor de gran interés para la ingeniería de transporte, pero que queda fuera del alcance de este trabajo de tesis por la profundidad que se requiere para dar un estudio formal en el área pertinente.

3.4 Análisis del desempeño del modelo sin la regla *slow to start* en la rampa

Aun cuando los valores de los parámetros empleados para las simulaciones antes expuestas han demostrado que el modelo propuesto permite reproducir muchos de los fenómenos encontrados tanto en la literatura como en mediciones y observaciones de campo, es necesaria una revisión más detallada del desempeño de los modelos y su comparación con la finalidad de evaluar de mejor manera su desempeño y proponer modificaciones futuras. Por ello se realizaron simulaciones adicionales en las que, únicamente para los vehículos que circulan dentro de la rampa, se suprimió la regla *slow to start*¹ del paso correspondiente al cálculo de velocidades del modelo LAI, es decir, la probabilidad de $R_a=1.0$ para todos los valores de la velocidad; de tal manera que todo vehículo que tenga condiciones para acelerar lo hará sin retardar el proceso, evitándose así la formación de pelotones de vehículos congestionados en la rampa que tardan en deshacerse.

En esta sección se presenta un análisis del desempeño de los dos modelos propuestos en la sección 3.2 y 3.3 de este trabajo con base en las series de tiempo resultantes para el flujo y la velocidad local, medidas a través de detectores virtuales ubicados como se indica en la Figura 3.31. Los valores fueron calculados a través de la ecuación (3.3) y se promediaron cada minuto. Como fase inicial de estudio, el análisis se enfoca sobre $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 900)$, para los distintos modelos y escenarios estudiados, cuyos resultados se muestran en las figuras 3.32-3.39.



Figura 3.31 Ubicación de los detectores virtuales colocados sobre la vía principal y la rampa. El detector de la rampa que en las series de tiempo se coloca en $x=10\text{km}$ en realidad se ubica 25 metros antes de esa posición. Lo anterior se debe a que hay vehículos que rebasen la posición $x=10\text{km}$ sobre la rampa pues ahí termina la zona de merge.

En la Figura 3.32, correspondiente al caso en el que no se establece mecanismo de control en la rampa de acceso, se aprecia que debido a que no hay semáforo, los vehículos de la rampa llegan a la zona de *merge* a velocidad alta (el detector ubicado en $x=9.7\text{km}$ está justo antes de entrar a esta zona) pero conforme no van ingresando a la vía principal, bajan su velocidad, por eso en el sensor de la rampa en la posición de $x=10\text{km}$ se ven velocidades consistentemente bajas, ya que los vehículos se quedan en esa parte (que corresponde al tramo final de la zona de *merge*) esperando poder ingresar. Esto se confirma en la Figura 3.33, ya que el flujo en la rampa es menor en la parte final de la zona de *merge* (detector ubicado en $x=10\text{km}$) respecto al que se tiene al comienzo de tal zona (detector ubicado en $x=9.7\text{km}$).

Adicionalmente, se aprecia que el flujo se mantiene en valores muy similares para ambos carriles de la vía principal en los primeros tres sensores ($x=4.5\text{km}$, $x=7.7$ y $x=9.7\text{km}$), pero en el sensor que se ubica al final de la zona de *merge* ($x=10\text{km}$) se tiene un incremento que se aprecia más en el carril izquierdo. Además las perturbaciones en la velocidad debidas a que se permite el ingreso agresivo de vehículos de la rampa a la vía principal (lo que ocasiona que algunos vehículos de la vía principal tenga que emplear frenado de emergencia para evitar una colisión) se notan con mayor claridad en el carril derecho, particularmente en el detector ubicado

¹ Esta regla se establece un retardo estocástico en la aceleración de vehículos que viajan a velocidades bajas con la finalidad de reproducir el comportamiento real de los conductores, quienes frecuentemente requieren un tiempo de reacción para modificar su velocidad cuando las condiciones de manejo en su entorno han cambiado. Se reproduce a través de los pasos S2 y S3a del modelo LAI para un carril.

en la posición $x=10\text{km}$. Así mismo, a pesar de que dichas perturbaciones se presentan muy cercanas temporalmente, son más drásticas en el carril derecho, mientras que en el carril izquierdo se mantienen velocidades mayores durante un tiempo mayor. Todo esto se debe a que al ser el carril derecho el aledaño a la rampa de acceso, es el que se ve más afectado por los vehículos que provienen de la rampa.

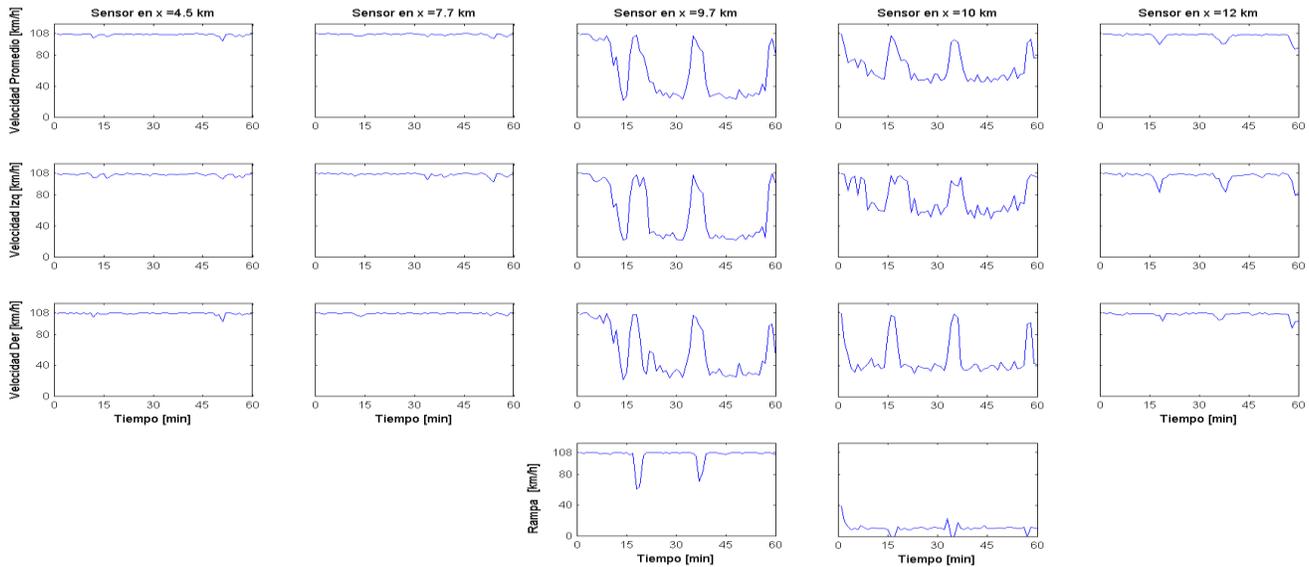


Figura 3.32 Velocidades medidas en los detectores para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 900)$ veh/h sin emplear mecanismo de control.

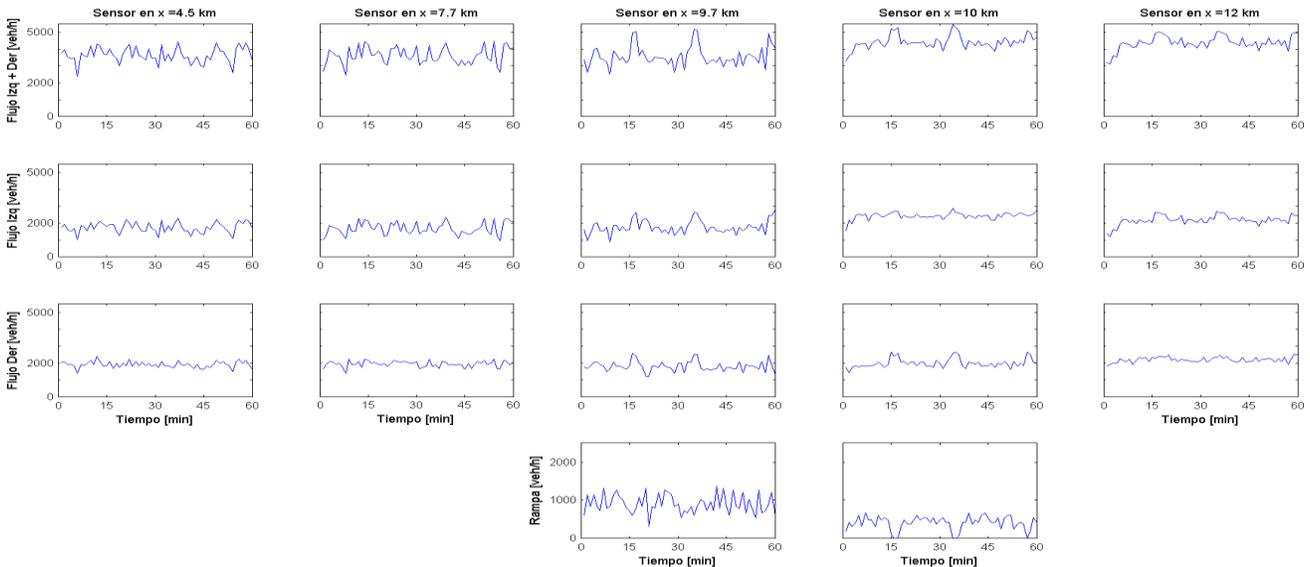


Figura 3.33 Flujo medido en los detectores para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 900)$ veh/h sin emplear mecanismo de control.

En cuanto a la magnitud de la velocidad, nótese que la velocidad en rampa en el detector ubicado en $x=10\text{km}$ no excede 40 km/h , mientras que en el carril derecho la menor velocidad es también 40km/h . Esto sugiere que la velocidad con la que entran los vehículos de la rampa a la vía principal es determinante en los congestionamientos producidos en la vía principal. Además, cuando en la rampa los vehículos de hasta adelante están parados, la velocidad en el carril derecho se recupera porque no hay nada que lo perturbe. Así mismo, para el sensor en $x=9.7\text{km}$, cuando la velocidad en la rampa está alta, la velocidad en el carril derecho empieza a incrementarse gradualmente. Sin embargo, cuando ocurre un congestionamiento en la rampa (reflejado como decaimiento de velocidad alrededor del minuto 16 y del minuto 40 en la Figura 3.32) se nota un decremento gradual en el carril de derecho. Esto indica que el hecho de no haber puesto un límite en la velocidad para el

ingreso de vehículos de la rampa a la vía principal, produce perturbaciones importantes sobre vía principal de tal forma que el flujo y velocidad nunca se estabilicen.

Por otro lado, en la Figura 3.34 con las mediciones del detector colocado en $x=9.7\text{km}$, se puede advertir que al emplear la estrategia que permite el paso de un vehículo por cada ciclo del semáforo, las velocidades medidas por el detector de la rampa tienen una mayor variación que para el caso sin control durante los primeros 15 minutos, esto obedece a que la fase roja del semáforo ocasiona que algunos vehículos reduzcan su velocidad antes de que arriben a la zona de *merge*. Sin embargo, después de esos primeros 15 minutos, los valores de velocidad y flujo (Figura 3.35) para la rampa tienden a estabilizarse en valores de alrededor de 20km/h y 900 veh/h , respectivamente. Este hecho se debe a que esta estrategia de control permite el paso de entre 800 y 900 veh/h , por lo que deja pasar prácticamente la totalidad de los vehículos de la rampa, ya que la demanda en la rampa es de 900 veh/h . Nótese que al suprimir el retardo en la aceleración para los vehículos de la rampa se consigue que el flujo en la rampa que rebasa la posición del semáforo se estabiliza en un valor muy cercano a los 900 veh/h (Figura 3.35), a diferencia de cuando no se suprimió la regla, en cuyo caso se obtuvo un valor de poco más de 700 veh/h (Tabla 3.4).

Sin embargo en la vía principal se aprecia que alrededor del minuto 20 las velocidades de ambos carriles descienden drásticamente hasta mantenerse en valores de entre 30 y 40 km/h ; un fenómeno similar ocurre minutos antes en el sensor situado en $x=10\text{km}$. Esto indica que los vehículos que provienen de la rampa ocasionan un congestionamiento en la vía principal más severo que el que se tiene cuando no se emplea mecanismo de control debido a que tienen un comportamiento muy agresivo en su ingreso a la vía principal. Ya que sin importar que ingresen a una velocidad baja por la acción del semáforo, se incorporan a la vía principal en cuanto encuentran condiciones para mantener su velocidad, ocasionando que algunos vehículos que circulan por la vía principal tengan que frenar con su capacidad máxima para evitar colisionar.

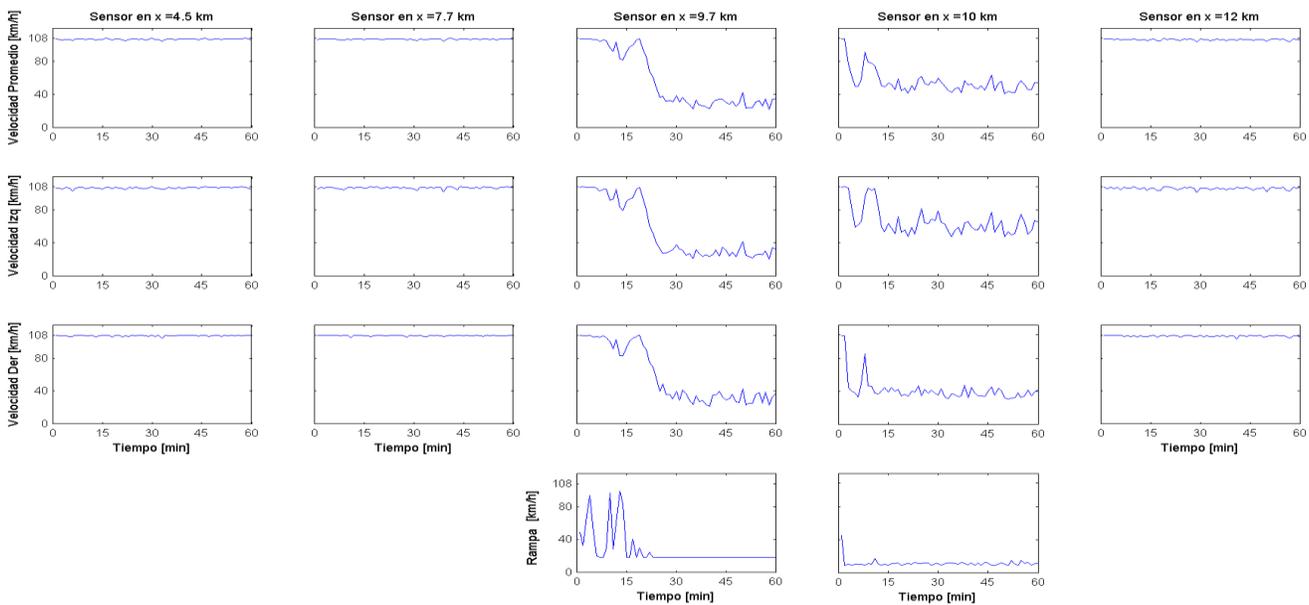


Figura 3.34 Velocidades medidas en los detectores para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 900)\text{ veh/h}$ cuando se permite el paso de un vehículo por ciclo.

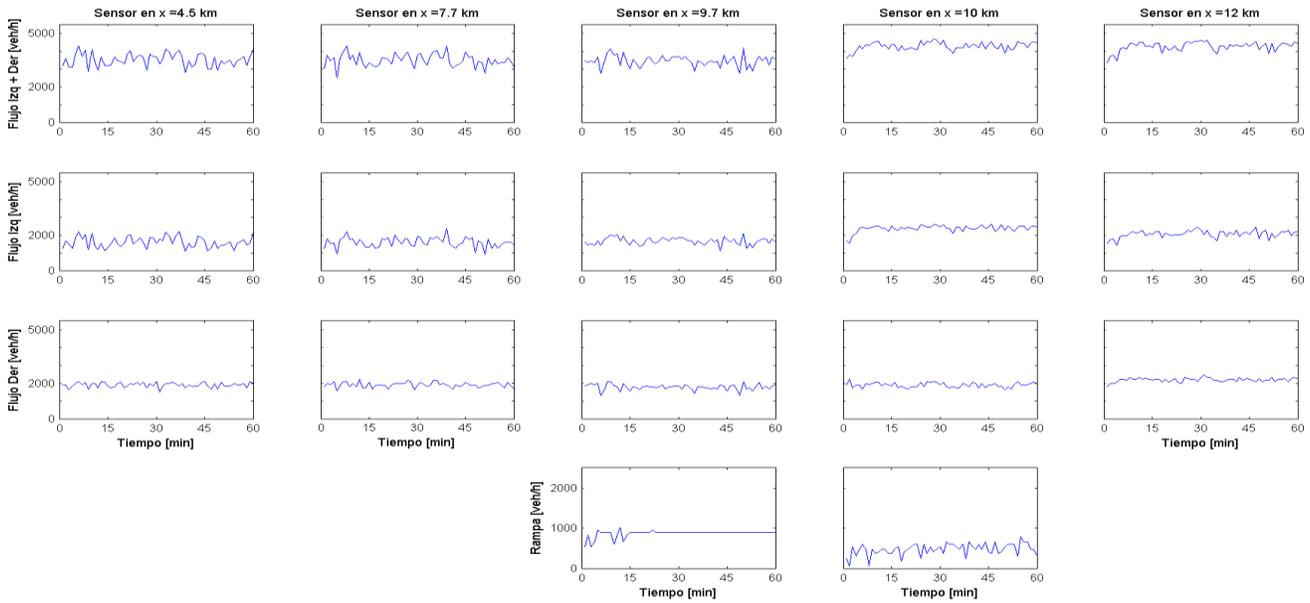


Figura 3.35 Flujo medido en los detectores para $(q_{inv}, q_{on}) = (1800, 900)$ veh/h cuando se permite el paso de un vehículo por ciclo

En lo referente a la estrategia que permite el paso de dos vehículos por cada ciclo del semáforo (Figura 3.36), para el sensor ubicado en el inicio de la zona de *merge* ($x=9.7$ km), se aprecia que dentro de la rampa las velocidades sólo presentan algunos mínimos locales con duración de a lo más un par de minutos, tras lo cual la velocidad vuelve a subir hasta valores cercanos a la velocidad máxima, mientras que hacia el final de la zona de *merge* se tienen vehículos con velocidades muy bajas esperando poder ingresar a la vía principal.

Por su parte, para el caso del detector ubicado al final de la zona de *merge* ($x=10$ km) en la vía principal, se observa que la velocidad es mayor en el carril izquierdo. Además, se nota que en los primeros minutos la velocidad del carril derecho decrece a medida que el flujo del carril derecho crece, lo que puede interpretarse como que la saturación del carril derecho, debida al ingreso de los vehículos de la rampa, origina que se realicen más cambios de carril a la izquierda dentro de la vía principal, haciendo que el flujo en el carril de la izquierda sea mayor, ya que ahí se tienen mejores condiciones de circulación.

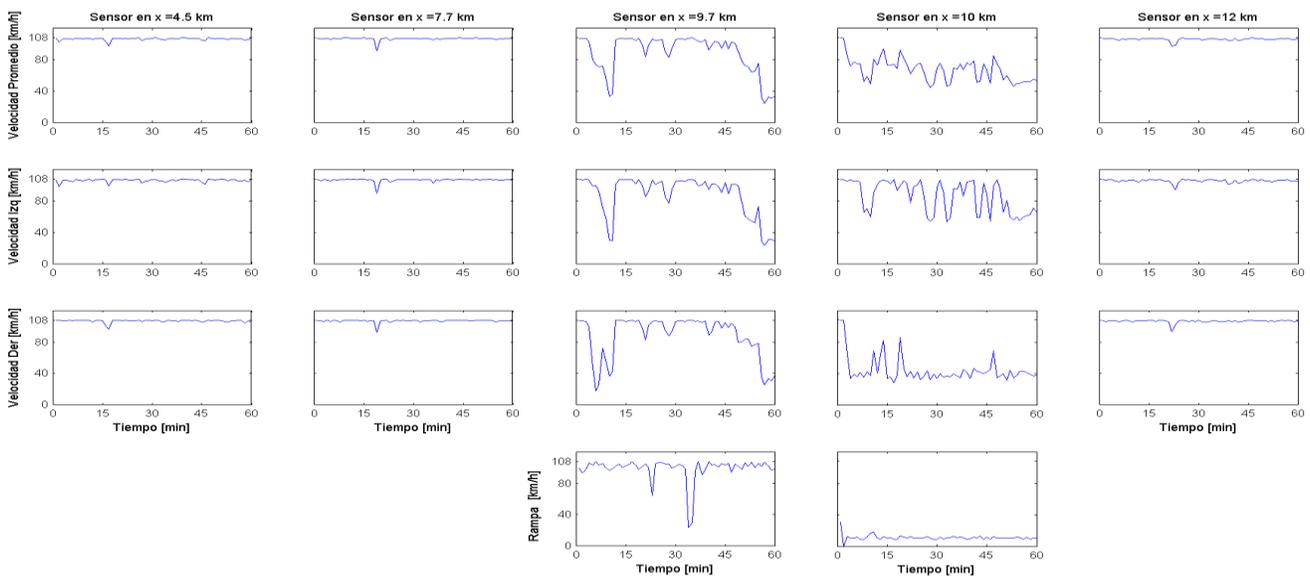


Figura 3.36 Velocidades medidas en los detectores para $(q_{inv}, q_{on}) = (1800, 900)$ veh/h cuando se permite el paso de dos vehículos por ciclo.

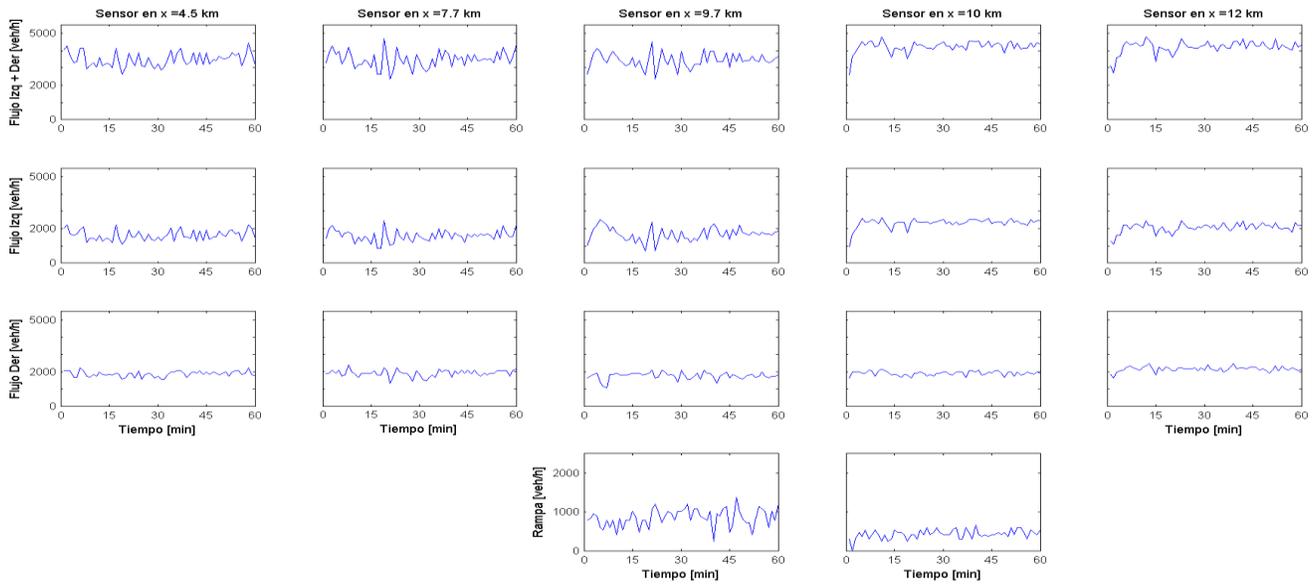


Figura 3.37 Flujo medido en los detectores para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 900)$ veh/h cuando se permite el paso de dos vehículos por ciclo.

En la Figura 3.38 se observa que los vehículos de la rampa llegan a la zona de *merge* a velocidades altas, aunque menores al caso en el que no se empleó control, además en la vía principal no se observan los picos de velocidad que se tenían en el caso sin control. Esto lleva a pensar que aunque no se logra tener mejoras importantes en la magnitud de la velocidad y del flujo (Figura 3.39) respecto a cuando no se tenía control, esta estrategia permite tener un ingreso más suave de la rampa a la vía principal, por lo que se ven menos perturbaciones bruscas en el flujo del carril derecho de la vía principal, mejorando la seguridad.

Es importante mencionar que para las figuras 3.32 a 3.38 se observa que las mediciones de los detectores fuera de la zona de *merge* se mantienen muy semejantes en cada caso, lo que confirma que las afectaciones originadas por la rampa de acceso sólo se reflejan en sus cercanías sobre la vía principal. Esto significa que son valores para los que la vía principal tiene la capacidad de absorber el flujo que proviene de la rampa e integrarlo al que de por sí fluye a través de la vía principal, a pesar de que lleguen a formarse algunos congestionamientos menores que se mantienen alrededor de la zona de *merge*.

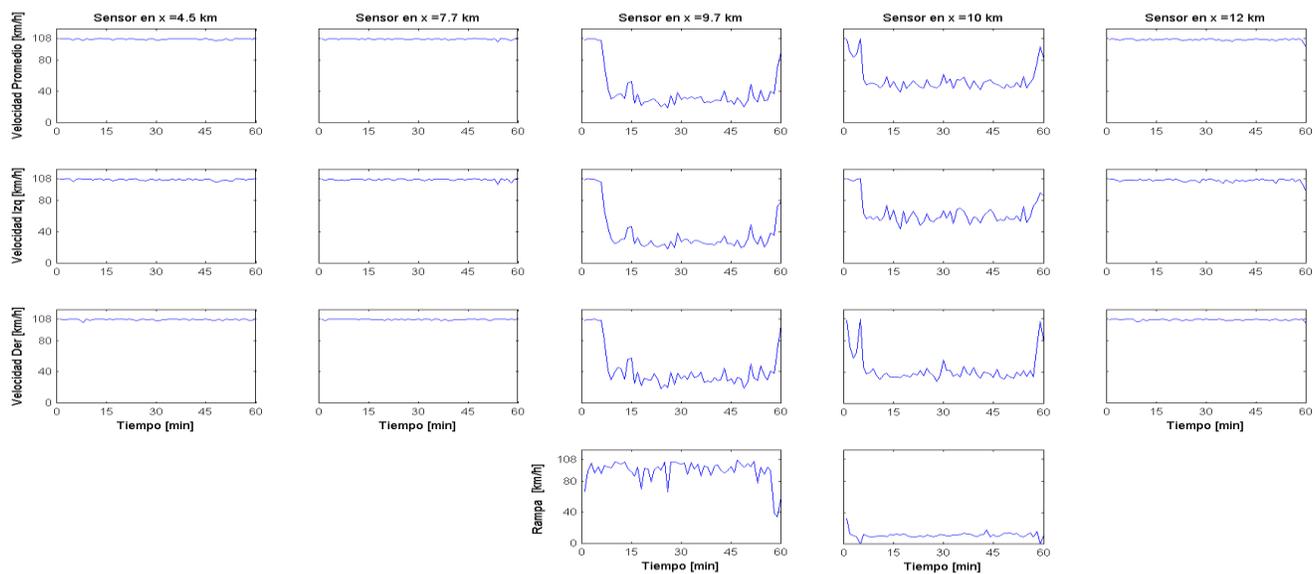


Figura 3.38 Velocidades medidas en los detectores para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 900)$ veh/h cuando se permite el paso de tres vehículos por ciclo.

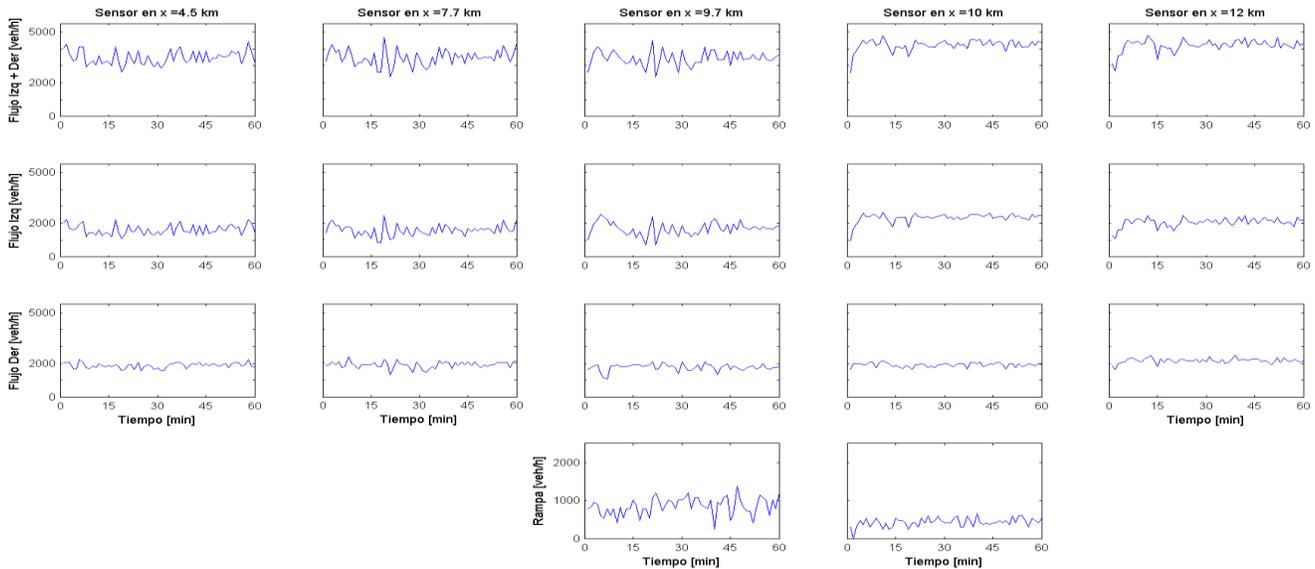


Figura 3.39 Flujo medido en los detectores para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 900)$ veh/h cuando se permite el paso de tres vehículos por ciclo.

Ahora considere un caso en el que en la vía principal se forma un congestionamiento que se extiende aguas arriba de la zona de *merge* como en mostrado en la Figura 3.40 que corresponde a un escenario en el que no se emplea control. En lo referente a la rampa se aprecia que al no haber semáforo, los vehículos arriban a la zona de *merge* a velocidades altas, observándose también un flujo alto. No obstante, tanto el flujo como la velocidad disminuyen en la parte final de la zona de *merge* a causa de los vehículos que se acercan a dicho punto sin lograr incorporarse antes a la vía principal, ya que tienen que disminuir su velocidad hasta que tengan las condiciones para ingresar conforme a las reglas del modelo.

Así mismo, se observa que la velocidad en la vía principal sufre una disminución drástica en los primeros minutos en los sensores que corresponden a la zona de *merge*, notándose unos instantes antes en el carril derecho, indicando que es en ese carril y cerca de la posición del sensor $x=10\text{km}$ donde se origina el congestionamiento. Por otra parte, en el sensor ubicado en $x=7.7\text{m}$ se aprecia la propagación de la disminución de velocidad aproximadamente 15 minutos más tarde de que se originó; mientras que en el detector colocado en $x=4.5\text{km}$ se refleja dicha disminución de velocidad a partir del minuto 40. De manera análoga, la variación en el flujo que se origina en la posición de la rampa se ve reflejada en los demás sensores aguas arriba 15 y 40 minutos después para los detectores ubicados en $x=7.7\text{km}$ y en $x=4.5$, respectivamente (ver Figura 3.41).

Por otro lado, para la vía principal se observa que en el sensor ubicado en $x=4.5\text{km}$ la propagación de la disminución de la velocidad se retrasa unos minutos respecto a cuando no se empleó control (sin control la velocidad comienza a bajar antes del minuto 45 y con control comienza a bajar después del minuto 45). Para el flujo se tiene un caso muy similar. Esto muestra que a pesar de no evitar la congestión de la vía principal, con la estrategia empleada se retrasa algunos minutos la propagación del congestionamiento. No obstante, se sigue observando un congestionamiento importante ocasionado por el ingreso agresivo de vehículos de la rampa a la vía principal debido a que las reglas del modelo establecen que un vehículo se incorporará a la vía principal en cuanto tenga condiciones para mantener su velocidad actual, por lo que aún los vehículos que circulan a baja velocidad por la acción del semáforo, tendrán posibilidad de ingresar a la vía principal en cuanto rebasen la posición del semáforo, ya que ahí comienza la zona de *merge*.

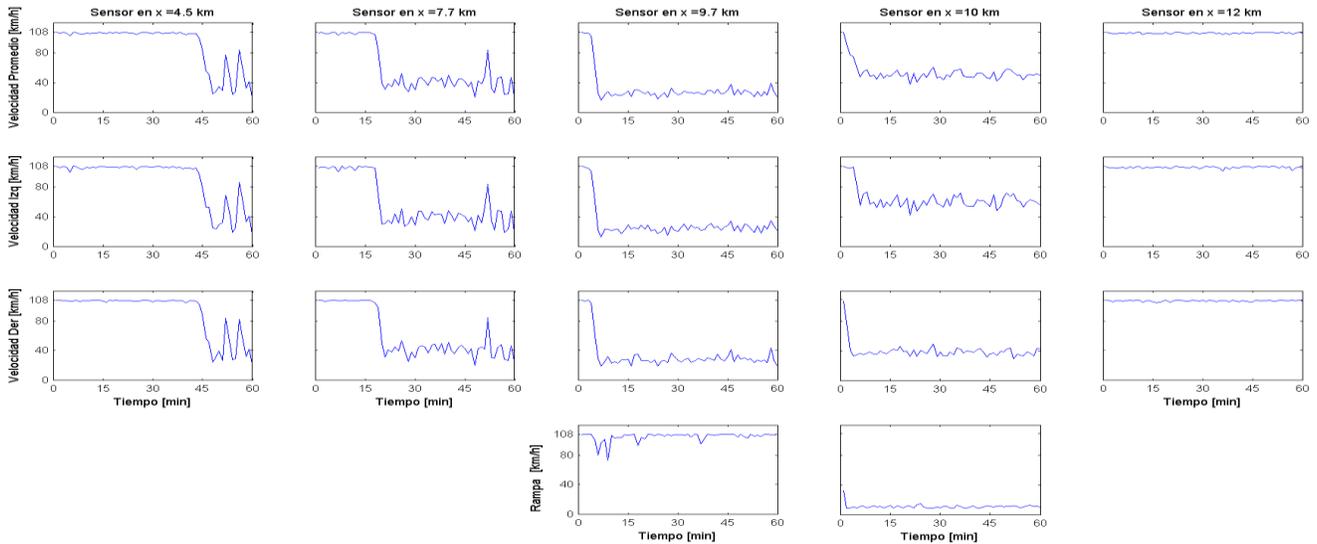


Figura 3.40 Velocidades medidas en los detectores para $(q_{inv}, q_{on}) = (2000, 1200)$ veh/h sin emplear mecanismo de control.

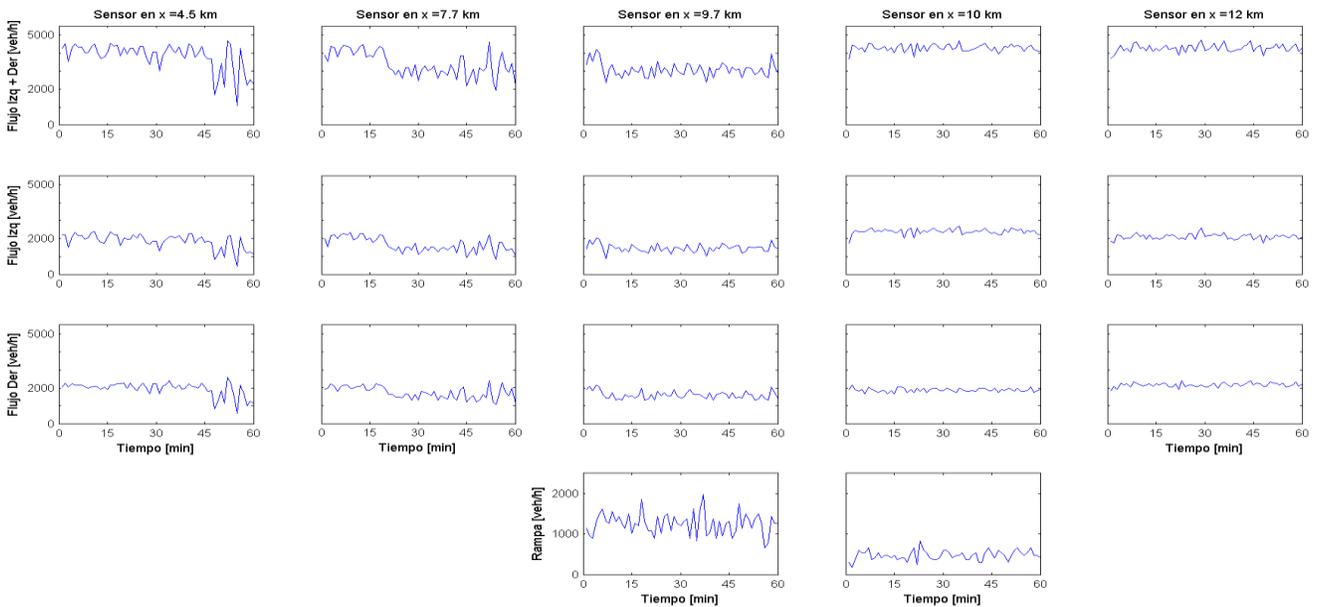


Figura 3.41 Flujo medido en los detectores para $(q_{inv}, q_{on}) = (2000, 1200)$ veh/h sin emplear mecanismo de control.

Para mejorar lo anterior, se podrían considerar distancias de aceleración para que un vehículo de la rampa alcance una velocidad al menos de tres celdas por paso de tiempo antes de permitirle ingresar a la vía principal. Una vez que rebese la distancia de aceleración que se establezca, si es que el vehículo aún no logra ingresar, se podría permitir un ingreso agresivo como el que se empleó en este modelo. Con esto se esperaría poder reducir las perturbaciones que se producen con el modelo actual, sin embargo aquí sólo se sientan las bases para que pueda explorarse esta posibilidad como trabajo futuro. Así mismo, se requieren trabajos futuros donde se realicen más estudios enfocados a la fase congestionada correspondiente a estancamientos con la finalidad de evaluar mejor el desempeño del modelo en escenarios de ese tipo.

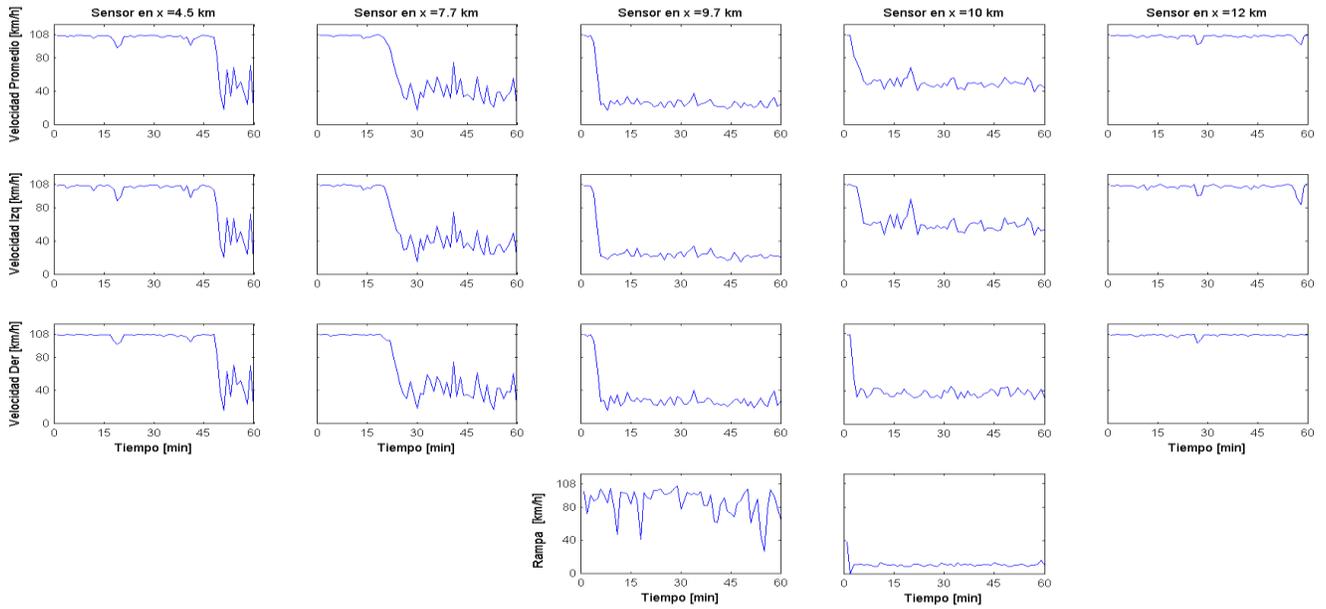


Figura 3.42 Velocidades medidas en los detectores para $(q_{inv}, q_{on}) = (2000, 1200)$ veh/h cuando se permite el paso de tres vehículos por ciclo.

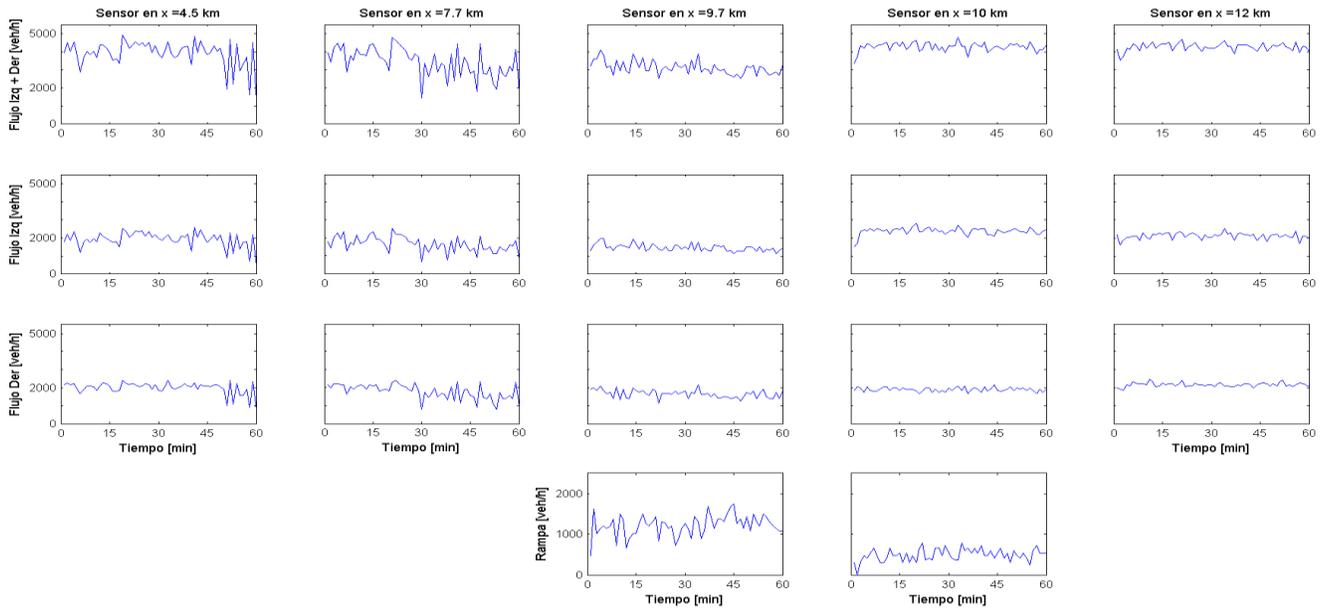


Figura 3.43 Flujo medido en los detectores para $(q_{inv}, q_{on}) = (2000, 1200)$ veh/h cuando se permite el paso de tres vehículos por ciclo.

4 Conclusiones

En este trabajo se extendió un modelo de Autómatas Celulares (AC) propuesto previamente, el modelo LAI de varios carriles [48] para simular el desempeño de una vía principal de dos carriles con reglas de cambio de carril asimétrico y una rampa de acceso de un carril. Dos escenarios fueron simulados: uno para una rampa sin mecanismo de control de acceso (sección 3.2) y otro para una rampa con de acceso cuyo flujo se controla con un semáforo (sección 3.3) El modelo obtenido toma en cuenta las restricciones mecánicas de los vehículos (capacidades de aceleración/desaceleración) y características del conductor en la definición de la dinámica vehicular. De tal manera que los efectos de anticipación de la velocidad y la inclusión de distancias y velocidades relativas entre los vehículos para la toma de decisión del conductor, se transfieren a la definición de las reglas para manejar y controlar el acceso a la vía principal desde la rampa.

Los resultados de simulación indican que las reglas de incorporación de la rampa hacia la vía principal permiten reproducir la aparición de congestionamientos por la acción del ingreso de vehículos en la zona donde se localiza la rampa. A través de un análisis detallado fue posible determinar el diagrama de fase correspondiente, que indica cuando se produce flujo libre, flujo congestionado localizado en la zona de la rampa, o flujo congestionado que se propaga aguas arriba de la rampa.

Con base en los resultados de simulación mostrados para el caso de rampas sin mecanismo de control (como la mayoría de las existentes en nuestro país) se encontró una relación intrínseca entre la longitud de la zona de *merge* (sección donde se permite el paso de la rampa hacia la vía principal) y variaciones en el flujo de la vía principal alrededor de tal zona. Dichas variaciones son originadas por cambios en el número de vehículos que ingresan a través de la rampa. Sin embargo, esto tiene repercusiones en el tiempo necesario para que los vehículos de la rampa alcancen el objetivo de incorporarse al flujo de la vía principal, aumentando los tiempos de espera, lo que aunado a que un menor número de vehículos de la rampa ingresa a la vía principal conllevará una formación de colas de ingreso a la rampa más largas.

Así mismo, para $L_{merge}=50$ metros se observó que los puntos a partir de los cuáles el comportamiento se aleja del que se observa para longitudes mayores de L_{merge} , corresponde a combinaciones de flujos en la rampa que sumados al de la vía principal originan congestionamientos que se mantienen localizados en la proximidad de la rampa conforme al diagrama de fases obtenido.

Por otro lado, para el caso de estudio de una rampa cuyo flujo de acceso se controla por un semáforo de tiempo fijo. El análisis de los resultados, para casos de estudio donde la suma del flujo que ingresa en la vía principal y el flujo que ingresa a través de la rampa no excede los valores para los que se originan congestionamientos localizados en la zona de la rampa, muestra que el modelo propuesto permite reproducir la acción del semáforo sobre la capacidad de la rampa, especialmente para tiempos de ciclo que favorezcan el ingreso de vehículos a mayor velocidad, siendo de gran importancia hacer los ajustes pertinentes en los tiempos de duración de cada fase al trabajar con valores de tiempo discretos. Sin embargo, para los valores de flujo estudiados con mayor detalle se probó que si se usan mecanismos de control correctamente donde no hace falta usarlo la mejoría es apenas perceptible. Mientras que, si se usa una mala estrategia se puede perjudicar en lugar de beneficiar. No

obstante, un análisis para flujos mayores a los estudiados, donde congestionamientos que se forman dentro de la vía principal como consecuencia de la rampa de acceso se propagan aguas arriba de la ubicación de la rampa debe ser realizado para evaluar de mejor manera el desempeño del modelo propuesto, pero quedó fuera del alcance de este trabajo.

Aún más, un análisis más profundo del desempeño del flujo y la velocidad local para los diferentes escenarios estudiados indica que el tiempo de reacción del conductor ante un semáforo debe ser menor que en circunstancias normales de manejo, ya que cuando un semáforo permite el ingreso de únicamente uno o dos vehículos por cada fase verde, los conductores tienden a estar más atentos al cambio de luz, por lo que su reacción es más rápida.

En cuanto a las consecuencias de realizar un ingreso agresivo de la rampa a la vía principal, los resultados de simulación indican que el hecho de no haber puesto un límite en la velocidad para el ingreso de vehículos de la rampa a la vía principal, produce perturbaciones importantes sobre vía principal de tal forma que el flujo y velocidad nunca se estabilicen. Este hecho se reduce al establecer mecanismos de control en la rampa, mismos que aun cuando no en todos los casos logran mejorías importantes en la magnitud de la velocidad y del flujo respecto a cuando no se tenía control, permiten tener un ingreso más suave de la rampa a la vía principal, por lo que se ven menos perturbaciones bruscas en el flujo del carril derecho de la vía principal, mejorando la seguridad en las incorporaciones.

Finalmente, se logró que los dos modelos propuestos preserven la simplicidad computacional del modelo LAI al mantener su mismo número de parámetros. Lo cual hace que mantengan la ventaja de los autómatas celulares de reproducir fenómenos complejos con una gran sencillez. Este hecho potencializa su paralelización y su posible uso como parte de un simulador de redes de transporte reales.

Resumen de Aportaciones

El trabajo de tesis expuesto en este documento contribuye a la literatura de la modelación computacional, basada en AC para el tráfico vehicular, a través de la propuesta de un nuevo modelo para la simulación y análisis del tráfico vehicular en convergencias donde se une una vía principal de dos carriles y una rampa de acceso. Es relevante mencionar que permite la consideración de tráfico vehicular heterogéneo, tanto de diferentes longitudes como de diferentes velocidades máximas, siendo este un punto importante porque no se encontró en la literatura ningún modelo con autómatas celulares que estudie rampas de acceso con vehículos de diferentes tipos y vías de varios carriles.

El nuevo modelo propuesto preserva la simplicidad y el paralelismo del modelo LAI al mantener su mismo número de parámetros. Este hecho potencializa su uso como parte de un simulador de redes de transporte en la vida real.

Así mismo, el modelo propuesto toma en cuenta reacciones humanas, políticas de espaciamiento de los conductores y prácticas de ingeniería de transporte para garantizar un desempeño microscópico adecuado en la incorporación de los vehículos de la rampa hacia la vía principal, conforme a las observaciones que existen de las carreteras reales. Esto permite tener la ventaja de garantizar que no ocurren accidentes debido a que además de lo anterior, considera la máxima capacidad de desaceleración en el ingreso de los vehículos a la vía principal.

Además, las reglas del modelo propuesto siguen criterios establecidos por las normas viales mexicanas y consideran características de manejo más agresivas respecto a las que emplean otros modelos reportados en la literatura, lo que conlleva a un mayor apego a la reproducción de las algunas características del tráfico de México.

Con el modelo propuesto para rampas de acceso con semáforo, se permite la evaluación de diferentes mecanismos y políticas de control de acceso a carreteras, con lo que se podrán encontrar formas para permitir un

flujo vehicular más eficiente conforme a las reglas viales vigentes en México.

De forma adicional, en el apéndice A se presentó una aproximación para la implementación con cómputo paralelo del modelo LAI y sus extensiones, hecho que sienta las bases para desarrollar un simulador de redes de transporte que aproveche las ventajas del cómputo paralelo para obtener resultados que permitan realizar simulaciones en tiempos reducidos.

Finalmente, el trabajo de tesis aquí propuesto analiza y describe, mediante la teoría de la computación aplicada a la simulación computacional basada en autómatas celulares, elementos importantes de un sistema complejo como lo es tráfico vehicular, contribuyendo a tener un mejor entendimiento de este fenómeno, cuyas repercusiones para la calidad de vida de los habitantes de países industrializados lo ha vuelto de indudable relevancia en la actualidad.

Trabajo futuro

En primer lugar se plantea como trabajo futuro, analizar con mayor profundidad los fenómenos reproducidos por las rampas de acceso a través de los modelos propuestos, para lo cual sería fundamental colaborar con un equipo interdisciplinario que integre a gente especializada en el área de transporte, lo que reforzaría los resultados que se obtengan de dicho trabajo, especialmente para explorar más a detalle las fases de flujo congestionado donde la vía principal ya no es capaz de absorber el flujo que ingresa desde la vía principal. Permitiendo además, poner a prueba diferentes estrategias de control de rampas para estudiar su comportamiento, ya sea para mejorar el funcionamiento actual o para probar cómo funcionarían antes de realizar la inversión de implementarlas en las vías reales.

Para mejorar el ingreso de los vehículos desde la rampa a la vía principal y permitir disminuir las fluctuaciones que se producen en el flujo vehicular por la acción del ingreso agresivo estudiado en el modelo propuesto, se podrían considerar distancias de aceleración dentro de la zona de *merge*, de tal forma que un vehículo de la rampa pueda ingresar a la vía principal hasta que alcance una velocidad al menos de tres celdas por paso de tiempo. Una vez que rebase la distancia de aceleración que se establezca, si es que el vehículo aún no logra ingresar, se podría permitir un ingreso agresivo como el que se empleó en los modelos aquí propuestos. Con esto se podrían reducir las perturbaciones que se producen con el modelo actual.

Además, se propone estudiar algunos fenómenos que tienen semejanzas a la incorporación de vehículos de una rampa de acceso hacia una vía principal, como lo son la reducción de carriles (ya sea por diseño del trazado de la carretera, por obras en proceso o por accidentes). Para tal fin la regla establecida en el apartado 3.2.1.1 para la incorporación desde la rampa hacia la vía principal puede servir como punto de partida, ya que considera el final de la rampa como un incentivo para que los vehículos se vean obligados a cambiar de carril, que es un fenómeno muy semejante a cuando un vehículo encuentra un obstáculo en la carretera y debe cambiar de carril para continuar su viaje.

Por otro lado, se vislumbra la posibilidad de estudiar rampas de salida, con lo cual se tendrían los elementos básicos necesarios para estudiar redes carreteras completas donde cada vehículo tenga un punto de origen y otro de destino. Para alcanzar su destino, el vehículo podría transitar a través de diferentes carreteras a partir de las rampas de salida y de entrada que las unen.

Todo lo anterior permitiría 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. Además permitiría estudiar la afectación que habrá para la ciudadanía en el tiempo que duren las obras de reacondicionamiento y/o construcción de diferentes elementos en las vías.

Apéndice A. Implementación mediante cómputo paralelo del modelo LAI y su análisis de eficiencia

El modelo LAI original tiene la gran ventaja de poseer reglas que pueden ser aplicadas a cada vehículo y a cada carril de manera independiente, por lo que su implementación mediante cómputo paralelo es posible, teniendo especial cuidado en el balanceo de carga entre los nodos de procesamiento. Además, para las extensiones propuestas en este trabajo de tesis para el estudio de rampas de acceso, es posible separar tanto los pasos concernientes a las reglas de cambio de carril como el manejo del semáforo de control en la rampa de los pasos que corresponden a la actualización de velocidades y posiciones. Por lo cual, cabe la posibilidad de emplear las reglas del modelo LAI original en paralelo para la ejecución de dichos pasos, haciendo algunos ajustes adicionales para integrar estos pasos con los de los modelos propuestos.

Por lo anterior, en esta sección se presenta una aproximación realizada con MPI y lenguaje C para implementar en forma paralela el modelo LAI, además se darán resultados del análisis de eficiencia de la implementación realizada con el objetivo de establecer las bases de la implementación en paralelo de los nuevos modelos propuestos.

Por otro lado, en virtud de ser un texto auto-contenido, se presentan en primer lugar algunos antecedentes teóricos necesarios para realizar el análisis de eficiencia, posteriormente se presentará el esquema empleado para la implementación con cómputo paralelo.

Introducción a las métricas de desempeño para cómputo paralelo

De manera intuitiva podría pensarse que al involucrar un mayor número de unidades de procesamiento en la solución de un problema la solución se obtendrá más rápidamente, sin embargo esto no siempre ocurre ya que existen limitaciones en el uso del cómputo paralelo. Por un lado tenemos que al involucrar más unidades de procesamiento se requerirá tener un mayor cuidado con las comunicaciones entre ellas pues las comunicaciones también tienen un costo (económico y de tiempo) que puede afectar de manera negativa el rendimiento de la implementación paralela. Existe otro factor que es inherente a la tecnología existente de manera comercial, pues como mencionan Bennett y Landauer [70], existen limitaciones físicas propias de los procesos de cómputo, tales como la velocidad a la que se mueven los electrones por un material conductor (ya sea cobre u otro material) y el calor que se produce con ello por efecto Joule (al pasar corriente por un conductor eléctrico se genera calor necesariamente) que nos lleva a también tener que considerar la necesidad de asegurarse de que el calor generado pueda ser disipado sin repercusiones negativas para el equipo.

Ahora bien, hasta aquí se ha hablado de eficiencia de forma cualitativa lo que ayuda a comprender intuitivamente las ideas alrededor de la paralelización, pero un estudio más formal de la eficiencia de un algoritmo paralelo requiere realizar cuantificaciones que permitan comparar valores numéricos y que describan de manera más formal el desempeño, es aquí donde entra el concepto de speedup junto con la ley de Amdahl.

El speedup es una métrica que describe cómo cambia el desempeño de un algoritmo paralelo al incrementar el número de unidades de procesamiento implicadas. De acuerdo a Alan H. Karp y Horace P. Flatt [71] el *speedup* (S_p) puede definirse como la razón del tiempo de ejecución del mejor algoritmo secuencial disponible corriendo en un solo procesador (denotado como T_1 o como T_s) entre el tiempo de ejecución del algoritmo paralelo ejecutado en P procesadores (T_p), esto es:

$$S_p = \frac{T_s}{T_p}$$

De la expresión anterior se observa que se pueden dar tres casos:

- i) Que en la gráfica del speedup se tenga un comportamiento lineal, esto es, que el speedup se incremente de manera directamente proporcional al número de procesadores implicados ($S_p=P$). A este tipo de speedup se le conoce como ideal o perfecto, puesto que es lo que se tendría idealmente: que al agregar x procesadores a la solución del problema, éste sea resuelto x veces más rápido que con un solo procesador. Sin embargo éste tipo de speedup es pocas veces logrado debido a las limitantes antes mencionadas (limitaciones físicas como las propiedades del conductor y el calor disipado, limitaciones propias del algoritmo como que éste sea inherentemente secuencial, limitaciones de comunicación como overhead en las comunicaciones entre múltiples unidades de procesamiento, limitaciones económicas como el que el costo del equipo ideal para la paralelización esté fuera del presupuesto, etc.)
- ii) Que el speedup sea superlineal ($S_p>P$), esto es, que al utilizar x procesadores la velocidad mejora z veces respecto a cuándo se usa un solo procesador, con $z>x$. Esto puede llegar a ocurrir cuando la naturaleza del problema y su implementación encaja perfectamente con la plataforma utilizada para el algoritmo paralelo, por ejemplo, cuando la granularidad definida hace que se aproveche al máximo el tamaño de la memoria de cada unidad de procesamiento evitando por ejemplo los caché miss (que no encuentre un dato en un nivel de memoria y tenga que bajar un nivel en la jerarquía de memoria para buscarlo).
- iii) Que la curva del speedup esté por debajo del speedup ideal ($S_p<P$). Este comportamiento es el más frecuente, pues las limitaciones arriba mencionadas (combinaciones o todas ellas) (véase inciso i) se presentan frecuentemente dando como resultado que el rendimiento real del algoritmo paralelo esté por debajo del ideal.

La eficiencia es otra métrica, ésta estima que tan bien están siendo utilizadas las P unidades de procesamiento (procesadores) implicadas respecto al overhead debido a las comunicaciones y sincronizaciones entre ellas. De acuerdo a Alan H. Karp y Horace P. Flatt [71] la eficiencia E está dada por:

$$E = \frac{S_p}{P}$$

Podría esperarse que si al resolver un problema de un tamaño x dado mediante un algoritmo paralelo con P_x procesadores se tiene una eficiencia E_{x_s} y después el tamaño del problema y el número de procesadores se aumentan N veces, la nueva eficiencia E_N debiera mantenerse igual a E_x (o incluso mejorarse: $E_N \geq E_x$). Cuando esto se cumple se dice que el algoritmo paralelo es escalable, pero esto no siempre ocurre debido a que hay algoritmos que funcionan bien dentro de una ventana de tamaños de problemas, pero que fuera de esa ventana tienen una eficiencia mucho más pobre.

Por otro lado, la ley de Amdahl [72] establece que el máximo speedup con P procesadores está limitado por la fracción de cómputo que no puede ser paralelizado en un algoritmo, denominada f (f =tiempo de ejecución de la fracción serial/tiempo de ejecución total), dando lugar a la siguiente expresión para el speedup potencial:

$$S_p = \frac{P}{f * (P - 1) + 1}$$

De ésta ley se desprende una limitante más en el speedup (y por consiguiente de la eficiencia) de los algoritmos paralelos, y esta limitante se debe a que hay una parte del algoritmo que no puede ser realizada en forma

paralela, por lo que teóricamente el mayor speedup posible sería cuando la fracción secuencial f tenga un valor de 0.

Tras establecer estos conceptos y métricas, a continuación se expone una implementación sencilla del modelo LAI, primero se expone la implementación secuencial y posteriormente el esquema empleado para su implementación en paralelo.

Implementación Secuencial

De manera secuencial, en cada paso de tiempo el programa simplemente sigue los pasos definidos del modelo para cada uno de los vehículos de la simulación (ver apartado 2.2.1), posteriormente realiza los cálculos de las variables de interés (densidad promedio, densidad instantánea y flujo promedio) a partir de las mediciones que realizó (velocidad promedio y número de celdas ocupadas) para ese paso de tiempo en particular. Una vez que obtiene dichos cálculos, procede a almacenarlos en un archivo separado por comas (.csv).

Posteriormente comienza la siguiente iteración realizando lo arriba descrito tantas veces como pasos de tiempo le sean indicados en los parámetros de la simulación. Para ello se divide la vía en celdas y un solo proceso realizará todo el procesamiento del algoritmo conforme al esquema siguiente:

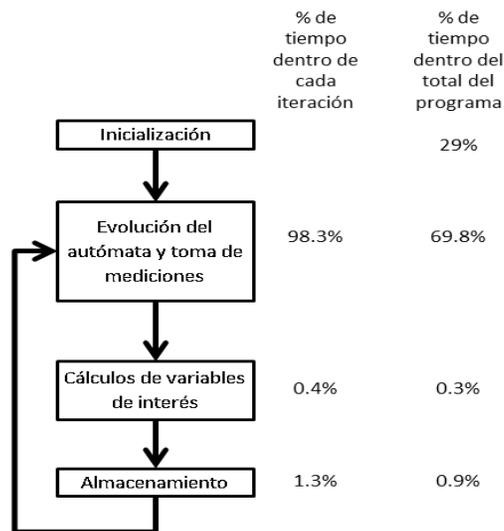


Figura A- 1 Esquema de bloques con tiempos para el programa secuencial

Los tiempos que se observan en la figura anterior fueron obtenidos mediante un programa implementado en lenguaje c en el que se midieron los tiempos con resolución de nanosegundos para cada iteración, así como el tiempo total de ejecución del programa, lo que permitió obtener los porcentajes mostrados.

Es importante mencionar que tanto el cálculo de variables de interés como el almacenamiento de dichos cálculos se hace una vez por cada iteración, pero considerando los datos globales del modelo, por lo que en primera instancia se requiere que un solo proceso realice éstas tareas.

Así mismo, de dicha figura puede se puede ver que el mayor consumo de tiempo se encuentra en la inicialización del modelo en conjunto con la evolución del autómata y la toma de mediciones, por lo que si se busca disminuir el tiempo de ejecución se requerirá encontrar una forma de ejecutar dichos procesos en paralelo como se revisará a continuación.

Implementación con cómputo paralelo

Dado que la vía que se simulará se discretizará dividiéndola en celdas de 2.5 metros cada una, y que se tiene un número total de vehículos que circulan por dicha vía, puede emplearse un paralelismo de dominio (también llamado de datos o geométrico), donde a cada proceso se le asigne un segmento de vía con un cierto número inicial de vehículos.

Por otro lado, analizando el algoritmo secuencial se identifican dos procesos principales:

- 1) La evolución de los autómatas mediante las reglas del modelo.
- 2) El cálculo de variables de interés y su almacenamiento.

Por ello, se decidió realizar también paralelismo de algoritmo (de tareas), haciendo que los procesos en los que se realizó el paralelismo de dominio (workers) alimenten a otro proceso (master) con sus mediciones, para que ese otro proceso sea el que realice los cálculos y el almacenamiento correspondiente mientras los workers pueden seguir con su siguiente paso de tiempo.

Los elementos que el modelo permite calcular en frío (pre-calcular) tales como las distancias de seguridad y Ra fueron obtenidos previamente mediante programas escritos en lenguaje C. Una vez que se obtuvieron esos valores, se utilizaron como constantes dentro del código principal del programa con el objetivo de reducir el tiempo de procesamiento, con el beneficio de que el acceso a dicho valores sea de orden constante, además de que las tablas pueden ser almacenadas en arreglos bidimensionales de orden v_{max} por v_{max} , en el caso estudiado se establece $v_{max}=12$ celdas/paso_de_tiempo.

Esquema Empleado

Para el programa principal se utilizó un esquema similar una adaptación de la unión del patrón Manager-Workers y el Communicating Sequential Elements [73] con la particularidad de que los workers forman un anillo unidireccional ya que necesitan información del vehículo que va enfrente (de ahí que se asemeje al patrón Communicating Sequential Elements debido a que se necesita información de su vecino para continuar con el procesamiento independiente.). Así mismo, los workers se comunican con el master para que éste pueda realizar los cálculos pertinentes con los datos de todos los workers y los almacene en un archivo de texto separado por comas.

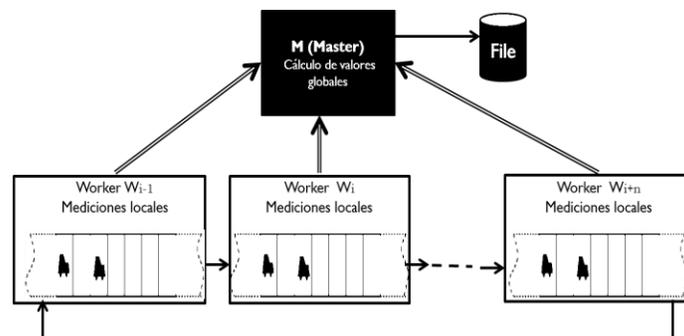


Figura A- 2 Esquema de comunicaciones utilizado

Como puede observarse en la figura anterior, cada worker W_i tiene un vecino adelante W_{i+1} que es el que le envía la información sobre su vehículo más atrasado que corresponde al que va justo enfrente del más adelantado de W_i en cada paso de tiempo. Así mismo, el master M recibe información de todos y cada uno de los workers W_i en cada paso de tiempo.

Este esquema fue ideado para ser lo más apegado posible a la naturaleza del algoritmo con el que se trabajó, buscando tener sólo las comunicaciones necesarias para disminuir la fracción serial, potenciando el speedup teórico conforme la ley de Amdahl.

A continuación se explica cómo se realiza cada uno de los bloques del programa.

Inicialización.

Los parámetros de la simulación (número de celdas y densidad vehicular) se reciben desde la línea de comandos como parámetros del programa. Posteriormente se calcula cuántas celdas le corresponderán a cada proceso (que equivale a determinar que parte de la vía le tocará trabajar a cada worker) y cuántos vehículos deberá colocar aleatoriamente dentro de dichas celdas, a cada vehículo se le asigna una velocidad inicial de 0.

Posteriormente, los workers con id impar envían a su vecino de atrás la velocidad y posición de su vehículo posicionado más atrás, mientras que los workers con id par esperan dicha la información de su vecino de enfrente. Una vez realizada esa comunicación se intercambian los roles: los pares envían y los impares reciben. Con lo anterior cada worker tiene la información que requiere para comenzar a evolucionar sus autómatas para el siguiente paso de tiempo. Esto se aprecia en la Figura A- 3, donde la línea continua representa una comunicación activa y la línea discontinua representa una comunicación que acaba de finalizarse.

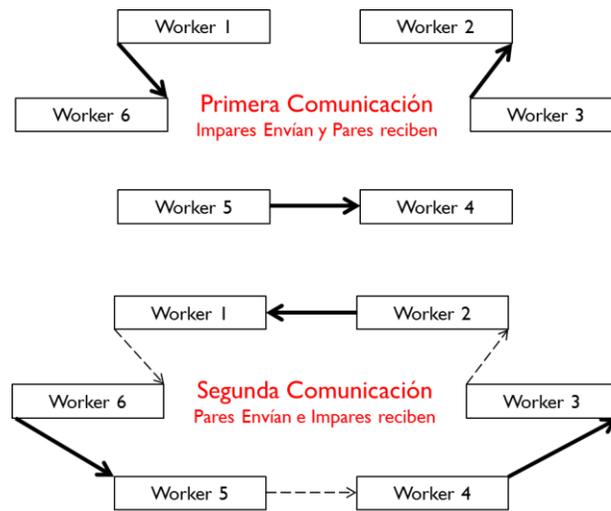


Figura A- 3 Comunicaciones entre workers.

Por su parte, el master (Rank=0) abre el archivo donde se almacenaran los resultados de las mediciones en cada paso de tiempo, quedando a la espera de recibir comunicación de los workers.

Evolución del autómata y toma de mediciones.

Después de la inicialización, cada worker comienza a aplicar las reglas del modelo a los vehículos que le compete, calculando para cada uno su nueva velocidad y su nueva posición, así mismo, mide la velocidad promedio acumulada de sus vehículos y el número de vehículos que se encuentran en sus celdas.

Mientras el sistema no alcance su estado estable (durante los primeros 21600 pasos de tiempo), cada worker, una vez que ya terminó de calcular la nueva velocidad y posición de todos los vehículos dentro del segmento de vía que le corresponde, si tiene id impar procede a enviar la información del auto más rezagado al vecino de atrás y posteriormente se queda a la espera de recibir las información del auto más rezagado de su vecino de enfrente. Si su id es par primero espera a recibir información del vecino de enfrente y luego envía información al vecino de atrás (ver Figura A- 3).

Almacenamiento.

Si ya se alcanzó el estado estable del sistema, tras realizar lo arriba mencionado, el worker envía al master las mediciones que tomó entre sus vehículos, para que sea el worker quien realice los cálculos necesarios y almacene los resultados en un archivo de texto separado por comas.

Una vez establecido el esquema con el que opera la implementación mediante cómputo paralelo, a continuación

se presenta un resumen de las mediciones y resultados obtenidos con el objetivo de realizar un análisis de desempeño.

Mediciones y resultados para el análisis de eficiencia

Para analizar el desempeño del programa paralelo, se decidió tomar mediciones de tiempos que permitiesen calcular tanto el speedup como la eficiencia del mismo. Para ello dentro de programa se calcula el tiempo total de ejecución mediante llamadas a la función `MPI_Wtime()` ajustando los decimales para obtener una resolución de microsegundos. Así mismo, se toman mediciones para calcular el porcentaje de tiempo en que se realiza procesamiento paralelo, para ello se utiliza, además de `MPI_Wtime()`, barreras mediante `MPI_Barrier()`. Con ello obtengo el tiempo que corresponde a procesamiento secuencial y calculo tanto la fracción serial como la fracción paralela.

Como los resultados del modelo son almacenados en un archivo, se decidió que los resultados de los tiempos (fracción paralela, fracción serial y tiempo total) se desplieguen en pantalla, de tal forma que puedan ser redireccionados hacia otro archivo de texto para su posterior procesamiento. Sin embargo, para disminuir el costo en tiempo de desplegar los datos durante la ejecución del programa, lo que acarrearía variaciones en las mediciones, los datos se mantienen en memoria hasta que finaliza la ejecución total del programa, hasta ese momento son desplegados en pantalla.

Para obtener resultados estadísticamente más fieles, se realizaron 20 experimentos y se promediaron sus resultados, cada experimento incluye:

- i) Iniciar con $P=1$.
- ii) Dado un número impar P de procesos, se ejecuta el programa para distintos valores de densidad d , iniciando con $d=0.05$ y aumentando en pasos de 0.05 hasta llegar a $d=0.95$. Para cada valor de d se almacena fracción paralela, fracción serial y tiempo total.
- iii) Si $P \leq 29$ Se incrementa P en 2 y se repite el paso anterior (ii).

Con los resultados promediados obtenidos se construyeron gráficas que ayudarán al análisis, en este documento se presentarán las gráficas globales que condensan los resultados de todos los experimentos.

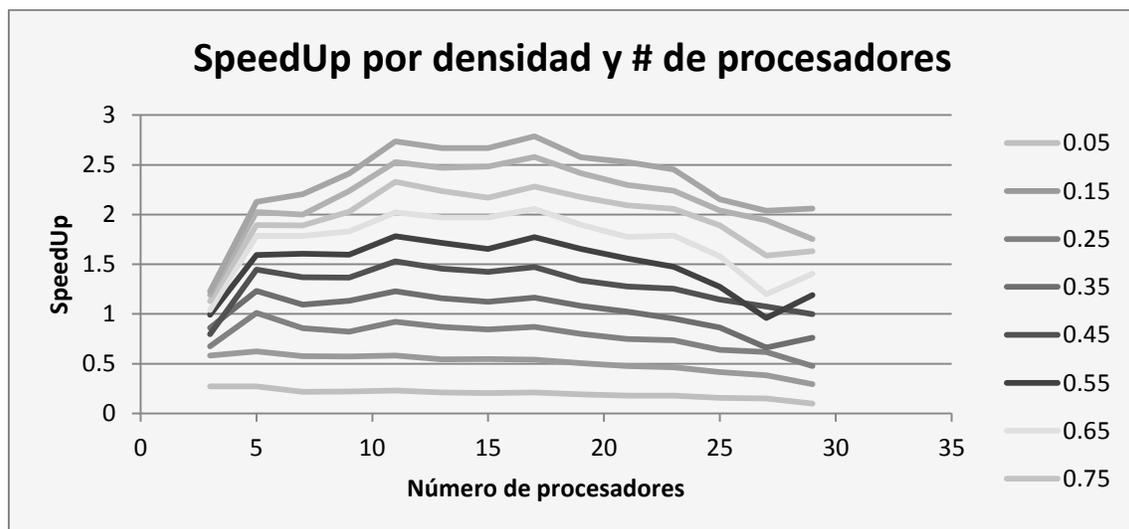


Figura A- 4 SpeedUp por densidad y número de procesadores

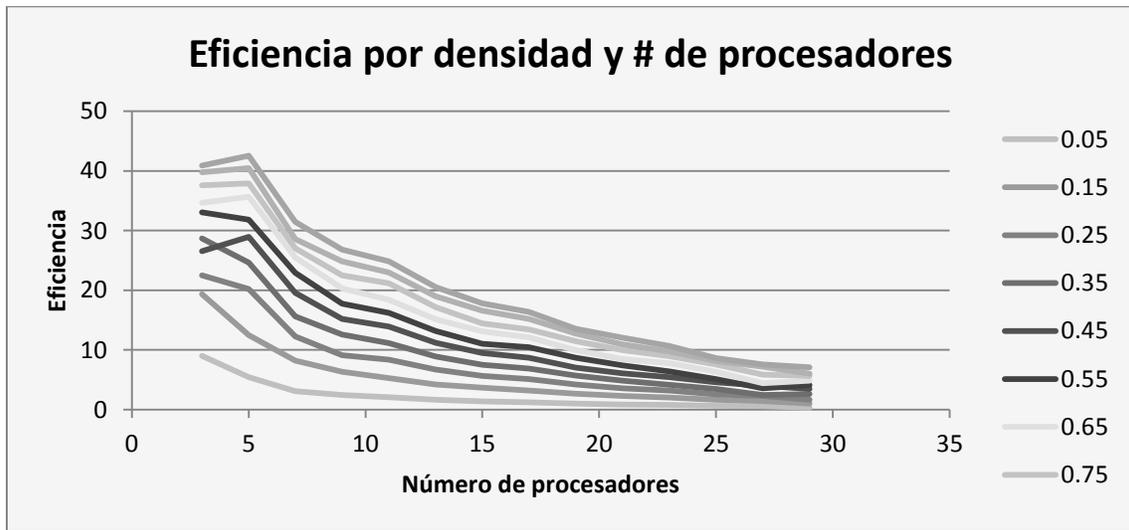


Figura A- 5 Eficiencia por densidad y número de procesadores.

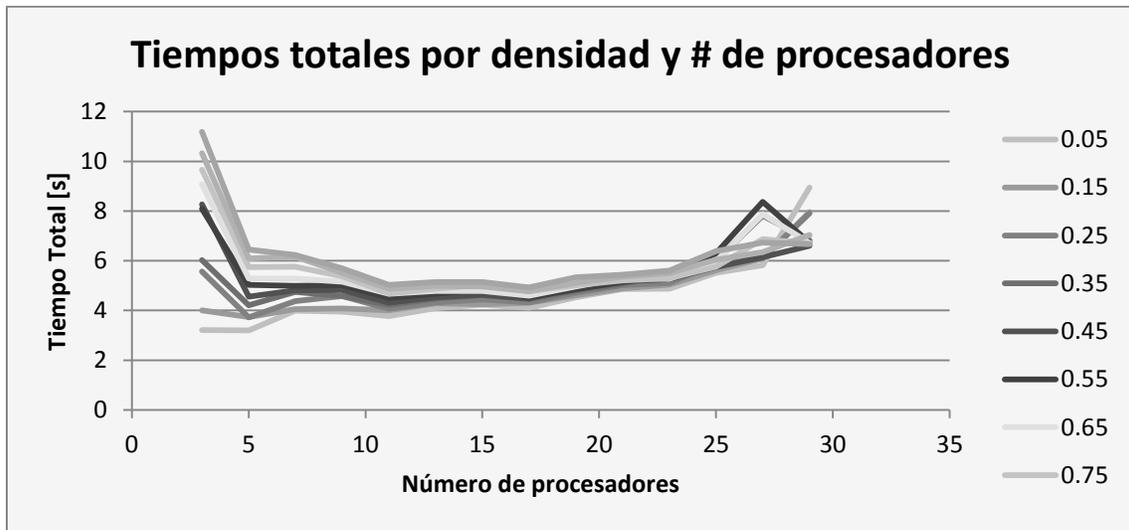


Figura A- 6 Tiempo totales de ejecución por densidad y número de procesadores.

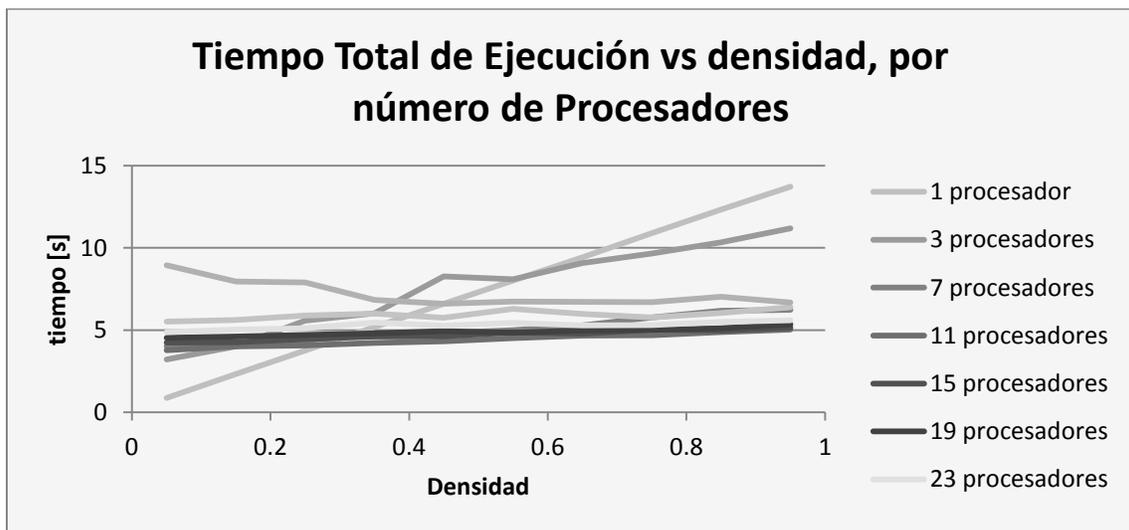


Figura A- 7 Tiempo Total de Ejecución vs densidad, por número de Procesadores

Con base en las gráficas mostradas en las figuras anteriores, se procede al análisis de los resultados. En lo referente al speedup puede observarse cómo para densidades mayores al 0.1 tiene un comportamiento ascendente en los primeros incrementos del número de procesadores, siendo más notable dicho aumento cuando mayor es la densidad con la que se está trabajando. Posteriormente tiene un comportamiento con pendiente cercana a cero hasta que se utilizan 17 procesadores, después de ese punto el speedup baja paulatinamente conforme seguimos aumenta el número de procesadores. Esto significa que se logra acelerar el proceso global conforme se incrementa el número de procesadores hasta llegar a un punto donde la aceleración que se logra permanece casi constante para posteriormente ver cómo en lugar de acelerar el proceso lo estamos desacelerando. Sin embargo, el speedup queda siempre por debajo del speedup ideal.

En cuanto a la eficiencia, se observa que alcanza su valor mayor cuando el número de procesadores involucrados es menor a 5, esto significa que en esos casos es cuando se está más cerca de tener un speedup ideal, sin embargo para cuando se tiene más de 5 procesadores se observa que la eficiencia desciende paulatinamente en todos los casos. No obstante, es notable cómo las mayores eficiencias se logran cuando se trabaja con densidades mayores, esto se debe a que mayores densidades significan un mayor número de vehículos en el modelo y ello implica que el procesamiento para la parte de evolución del autómatas es mayor, por lo que es en estos casos cuando es más útil utilizar un algoritmo paralelo, logrando un mayor aprovechamiento del tiempo de procesamiento. Esto último también nos indica que cuando se tienen mayores densidades se tiene un valor mayor en la relación procesamiento/comunicaciones, puesto que el tiempo de comunicación es prácticamente independiente de la densidad, mientras que el tiempo de procesamiento es directamente proporcional a la densidad.

Lo anterior también se verifica en la primera gráfica de tiempo total, puesto que puede verse cómo para densidades bajas el tiempo total aumenta conforme aumenta el número de procesadores utilizado, esto es, no conviene utilizar el algoritmo paralelo con más de tres procesadores cuando la densidad es menor a 0.2 ya que entre más procesadores se usen, más tiempo tardará en terminar. Sin embargo, cuando la densidad es mayor a 0.2 es notable como el tiempo va disminuyendo entre más procesadores se utilicen hasta que, cuando se tienen entre 11 y 13 procesadores, el tiempo de ejecución comienza a subir lentamente. Esto continúa hasta que cuando se utilizan cerca de 29 procesadores, el tiempo es mayor al que se tenía utilizando sólo 5 procesadores. En este aspecto, se tiene que el menor tiempo de procesamiento se alcanza cuando se emplean 5 procesadores si la densidad es menor a 0.2, mientras que cuando la densidad es mayor a dicho valor, el menor tiempo de procesamiento se alcanza con entre 15 y 17 procesadores.

De la última gráfica puede verse como el tiempo de ejecución total es directamente proporcional a la densidad cuando se utiliza un solo procesador (algoritmo secuencia). Mientras que cuando utilizamos un algoritmo paralelo, el tiempo total de ejecución no depende tanto de la densidad, esto es, al usar entre 7 y 25 procesadores el tiempo de respuesta del sistema se vuelve poco sensible a la densidad con la que se esté trabajando. Por su parte, cuando empleamos 29 procesadores es claro como el tiempo de respuesta es mayor para densidades bajas, lo que significa que el overhead de comunicaciones está rebasando al tiempo de procesamiento haciendo que se invierta más tiempo en comunicaciones que en procesamiento.

Así mismo, de la última gráfica puede observarse como cuando se utilizaron 11 procesadores se tuvieron los mejores tiempos para prácticamente todas las densidades mayores a 0.25, por lo que puede concluirse que en términos generales éste número de procesadores es el más conveniente para utilizar la implementación en paralelo aquí presentada. Mientras que cuando la densidad sea menor a 0.25 será más conveniente utilizar el algoritmo secuencial.

En conclusión, es de suma importancia analizar con qué valores de densidad se trabajará para determinar la relación procesamiento/comunicaciones y aprovechar realmente el beneficio de la utilización de cómputo paralelo, ya que si la carga de procesamiento es pequeña en relación al número de comunicaciones que se necesita, la inversión necesaria para realizar la implementación en paralelo no se verá realmente redituada en mejores tiempos de procesamiento.

De igual forma, determinar la granularidad con la que se trabajará es otro elemento clave, pues si se divide en

porciones demasiado pequeñas el dominio, la relación procesamiento/comunicaciones será demasiado pequeña como para provechar la ventaja de usar una arquitectura de cómputo paralelo.

En cuanto a extender esta implementación para incluir las reglas propuestas en esta tesis para el estudio de convergencias, se vislumbra que habrá que definir qué nodo será el que se encargará de la porción de vía donde se encuentre la rampa de acceso, de tal forma que este nodo ejecute un subpaso previo donde se encargaría de los cálculos para determinar qué vehículos ingresan a la vía. Una vez ingresados los vehículos a la vía principal, se puede realizar la ejecución de la actualización de velocidades y posiciones de la misma forma en todos los nodos, en una manera semejante a la expuesta en este apéndice.

El caso de la rampa con semáforo de control es un caso muy similar al antes mencionado, ya que las reglas del modelo fueron establecidas de tal forma que permitan la ejecución de la operación del semáforo en un subpaso previo a la actualización de velocidades y posiciones, por lo que podría emplearse un esquema similar al aquí expuesto.

Por último es de resaltar que la realización del algoritmo paralelo permitió simular los pasos de tiempo equivalentes a 8 horas de una vía con una longitud de 30[km] equivalente a la distancia que recorre el metrobús que va del caminero a indios verdes con una densidad vehicular de 0.95 (95%) en tan sólo 4.5 segundos, mientras que cuando se utilizó el algoritmo secuencial se necesitó un tiempo de más de 14 segundos.

Referencias

- [1] C. Gershenson (2007). Design and Control of Self-organizing Systems. CopIt ArXives, Mexico. TS0002EN.
- [2] S. Wolfram (1984). Universality and Complexity in Cellular Automata, *Physica D*, 10, 1-35.
- [3] K. Nagel and M. Schreckenberg (1992). A cellular automaton model for freeway traffic, *J. Phys. I France* 2, 2221-2229
- [4] G. Martínez Mekler (2000). Una aproximación a los sistemas complejos. *Revista Ciencias* no. 59. Universidad Nacional Autónoma de México.
- [5] G. Juárez, C. R. Stephens (2011). *Complex Systems as Computing Models*. Luniver Press, United Kingdom.
- [6] Von Neumann (1966), *Theory of Self Reproducing Automata*. University of Illinois Press, Illinois. Edited and completed by A.W. Burks
- [7] S. Ulam (1970). On some mathematical problems connected with pattern of growth of figures. *Essays on Cellular Automata*, University of Illinois Press, Ed. A.W. Burks.
- [8] S. Wolfram (1983). *Cellular Automata*, *Science* 9, Los Alamos, 2-21.
- [9] S. Wolfram (1986). *Theory and Applications of Cellular Automata*, World Scientific Press, Singapore.
- [10] A. Schadschneider (2000). Towards a realistic microscopic description of highway traffic, *Phys. Rep.* 329:199.
- [11] R. Barlovic, L. Santen, A. Schadschneider and M. Schreckenberg (1998), Metastable states in cellular automata for traffic flow, *Eur. Phys. J. B* 5 793.
- [12] D. Helbing and M. Schreckenberg (1999), Cellular automata simulating experimental properties of traffic flow, *Phys. Rev. E* 59 R2505.
- [13] R. Jiang and Q.S. Wu (2005), First order phase transition from free flow to synchronized flow in a cellular automata model, *Eur. Phys. J. B* 46 581.
- [14] G. Juárez, C. R. Stephens (2011). *Complex Systems as Computing Models*. Luniver Press, United Kingdom.
- [15] Toffoli, et.al., 1987; *Cellular Automata Machines*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts
- [16] Cattaneo, et.al., 1999; On the dynamical behavior of chaotic cellular automata, *Theoretical Computer Science*, 217, 31-51.
- [17] Hernández, et. al., 2002; Aplicaciones de los autómatas celulares a la generación de bits, *Bol. Soc. Esp. Mat. Apl.* no. 21, 65-87.
- [18] Gutowitz, 1991; *Cellular Automata, Theory and Experiment*, MIT Press.
- [19] Seck, 1997; Tuoh Mora Juan Carlos (1997), *Autómatas Celulares Lineales Reversibles*, Tesis,
- [20] Kerner, et.al., (2004). *The Physics of Traffic*, Springer.
- [21] Helbing, et.al., (2002). Critical discussion of synchronized flow *Cooperative Transportation Dynamics* 1, 2.1-2.24 (Internet journal).
- [22] Schonhof, (2009). Criticism of three-phase traffic theory, *Transportation Research Part B* 43, 784-797.
- [23] Treiber, (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
- [24] Yo-Sub Han, Sang-Ki Ko (2012). Analysis of a cellular automaton model for car traffic with a

- junction. *Theor. Comput. Sci.* 450, 54-67. (2011).
- [25] P. Stewart. Ramp Metering. Sias limited, Dundee, Reino Unido, 2003
- [26] A. Chaudhary y J. Messer (2000). Report on design criteria for ramp metering. Texas Transportation Institute, Texas.
- [27] D. Chowdury, L. Santen, A. Schadschneider (2000). Simulation of vehicular traffic: a statistical physics perspective, *Computers Science & Engineering, Computer Simulation*, 2:80-87.
- [28] D. Helbing (2001). Traffic and related self-driven many-particle systems. *Rev. Mod. Phys.* 73:1067.
- [29] A. Schadschneider, T. Pöschel, R. Kühne, M. Schreckenberg. D. Wolf (eds), *Traffic and Granular Flow '05*. Springer.
- [30] R. Rothery (1992) Car following models. In: Gartner N, Messer CJ, Rathi AK (eds) *Traffic Flow Theory*. Transportation Research Board, Special Report 165.
- [31] S. Maerivoet, B. De Moor (2005). Cellular Automata Models of Road Traffic, *Physics Reports*. 419, 1 p. 64.
- [32] A. Schadschneider, D. Chowdhury, K. Nishinari (2011). *Stochastic Transport in Open Systems, From Molecules to vehicles*, Elsevier B. V.
- [33] D. Gerlough (1956) in *Proceedings of the 35th Annual Meeting* edited by Burggrat, F. and Ward, E.M., Highway Research Board, Washington, D.C., 543.
- [34] M. Cremer, J. Ludwig. (1986) A fast simulation model for traffic flow on basis of boolean operations, *Mathematics and Computers in Simulation* , 28, 297-303.
- [35] J. Wahle, L. Neubert, J. Esser, M. Schreckenberg (2001). A cellular automaton traffic flow model for online simulation of traffic, *Parallel Computing, Volume 27, Issue 5*, 719-735.
- [36] S. Krauss, P. Wagner, C. Gawron (1997). Metastable states in a microscopic model of traffic flow, *Physical Review E* 55, 5597.
- [37] B. Kerner (2012). Complexity of spatiotemporal traffic phenomena in flow of identical drivers: Explanation based on fundamental hypothesis of three-phase theory, *Physical Review E*, 85, 036110.
- [38] M. E. Lárraga, J. A. del Rio, L. Álvarez-Icaza (2005). Cellular Automata for One-Lane Traffic Flow Modelling: Safety and Automation, *Transp. Res. C* 13, (1) 63.
- [39] M. E. Lárraga, L. Álvarez-Icaza (2010). Cellular Automaton Traffic Flow Model with Safe Driving Policies. *Journal of Cellular Automata*, 2010. Vol 5, Issue 6, pp. 421-429.
- [40] M. E. Lárraga, L. Álvarez-Icaza (2010). Cellular automaton model for traffic flow based on safe driving policies and human reactions, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Volume 389, Issue 23, 5425-5438.
- [41] L. Alvarez, R. Horowitz. (1999) *Veh. Syst. Dyn.* 32, 23-56.
- [42] J. Carbaugh, D. Godbole, R. Sengupta (1997), Tools for safety analysis of vehicle automation systems, *Proceedings of the 1997 American Control Conference*, vol.3, 2041 - 2045.
- [43] M. E. Lárraga, L. Álvarez-Icaza (2012). Towards a higher fidelity traffic simulation model based on cellular automata, enviado a *Transportation Research*
- [44] Gipps. (1986), A model for the structure of lane changing decisions, *Transportation Research B*, 20B(5):403-414.
- [45] Helbing, et.al. (1998), Coherent moving states in highway traffic, *Nature*, 396: 738-740.
- [46] W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider, M. Schreckenberg (1999), Disorder effects in cellular automata for two lane traffic, *Physica A*, 265: 614-633.
- [47] 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
- [48] H. Guzmán, M. E. Lárraga, L. Álvarez-Icaza (2012). Towards a realistic multilane traffic simulation model using Cellular automata. Preimpreso.
- [49] H. A. Guzmán (2012). Un modelo realista para el tráfico vehicular heterogéneo basado en el paradigma de autómatas celulares. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencia e Ingeniería de la Computación, UNAM.
- [50] S. C. Benjamin et al (1996). Cellular automata models of traffic flow along a highway containing a junction. *J. Phys. A: Math. Gen.* 29 3119
- [51] M. Pederson, R. Ruhoff (2002). *Phys. Rev. E* 65 056705
- [52] F. Li, X. Zhang, Z. Gao (2007). *Physica A* 374 827

- [53] Y. Song, X. Zhao (2009). *Chin. Phys. B* 18 52428
- [54] B. Jia, R. Jiang, Q Wu (2005). *Physica A* 345 218
- [55] W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider, M. Schreckenberg, (2000). *J. Phys. A* 33 L477
- [56] B. Kerner, S. Klenov, D. Wolf (2002). *J. Phys. A* 35 9971
- [57] G. Diedrich, L. Santen, A. Schadschneider, and J. Zittartz (2000). Effects of on- and offramps in cellular automata models for traffic flow, *IJMPC* 11, 335–345.
- [58] Z. Csahok, T. Vicsek (1994). Traffic models with disorder, *J. Phys.: Condensed Matter* 27, no. 16, L591.
- [59] H. Emmerich, E. Rank, Investigating traffic flow in the presence of hindrances by cellular automata, *Physica A* 216 (1995), no. 4, 435.
- [60] A. Pottmeier, R. Barlovic, W. Knospe, A. Schadschneider, M. Schreckenberg (2002). Localized defects in a cellular automaton model for traffic flow with phase separation, *Physica A* 308, 471–482.
- [61] 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
- [62] M. Treiber and D. Helbing (1999). Macroscopic Simulation of Widely Scattered Synchronized Traffic States, *J. Phys. A* 32, L17–L23.
- [63] J. Wahle, L. Neubert, and M. Schreckenberg (2001). A cellular automaton traffic flow model for online simulation of traffic, *Parallel Comp.* 27, 719–735.
- [64] Xin-Gang Li, Zi-You Gao, Bin Jia (2010). Properties of Cellular Automaton Model for On-ramp System. *Lecture Notes in Computer Science Volume 6350*, 2010, pp 613-618
- [65] Yo-Sub Han, Sang-Ki Ko (2012). A Cellular Automaton Model for Car Traffic with a Form-One-Lane Rule. *CIAA 2011, LNCS 6807*, pp. 154–165, 2011
- [66] Xin-Gang Li, Zi-You Gao, Bin Jia and Rui Jiang (2010). Traffic dynamics of an on-ramp system with a cellular automaton model. *Phys. B Vol. 19, No. 6*.
- [67] S. Kotz and N.L. Johnson (1982). *Encyclopedia of Statistical Sciences*, volume 3. Wiley, New York.
- [68] J. Treiterer, (1965). Investigation and measurement of traffic dynamics. Appendix IX to Final Report EES202-2, Ohio State University, Columbus,
- [69] A. Chaudhary, Z. Tian, J. Messer y Chi-Leung Chu (2004). Ramp metering algorithms and approaches for Texas. Texas Transportation Institute, Texas.
- [70] C. H. Bennett y R. Landauer (1985). Limitaciones físicas fundamentales de los procesos de cómputo. *Revista Investigación y Ciencia*
- [71] A. H. Karp y H. P. Flatt (1990). Measuring parallel processor performance. *Communications of the ACM*, Vol 33, No. 5, May 1990.
- [72] G. M. Amdahl. (1967). Validity of the single processor approach to achieving large scale computing capabilities. *AFIPS '67 (Spring) Proceedings of the April 18-20, 1967, spring joint computer conference*
- [73] J. L. Ortega Arjona and G. Roberts (1998). *Architectural Patterns for Parallel Programming*. Department of Computer Science University College London.

Índice de Tablas y Figuras

Figura 1.1 Vecindad simétrica, la cual se muestra en las celdas sombreadas	10
Figura 1.2 Un caso particular de vecindad asimétrica, la cual se muestra en las celdas sombreadas	10
Figura 1.4 AC unidimensional con condiciones de frontera absorbentes	11
Figura 1.5 Esquema del diagrama fundamental.....	14
Figura 1.6 Esquematización de una convergencia en carretera.....	16
Figura 1.7 Diagrama que ilustra las 3 zonas principales de una convergencia.....	16
Figura 1.8 Rampa de acceso.....	17
Figura 1.9 Entronque de la autopista de cuota México-Cuernavaca con la carretera a Cuautla.....	17
Figura 1.10 Reducción de carriles.....	18
Figura 1.11 Single-Lane One Car per Green.....	20
Figura 1.12 Single-Lane Multiple Cars per Green.....	20
Figura 1.13 Dual-Lane Metering.....	21
Figura 1.14 Clasificación de los modelos de tráfico vehicular con base en el nivel de detalle.....	24
Figura 2.1 Ejemplo de una sección de calle representada mediante el modelo NaSch.....	25
Tabla 2.2 Descripción de las variables y parámetros del modelo LAI para varios carriles.....	33
Figura 2.3 Vecinos de un vehículo n considerados en un cambio de carril.....	33
Tabla 2.3 Descripción de los parámetros del modelo LAI para múltiples carriles.....	35
Figura 2.4 Esquema de la red vial simulada de Duisburg.....	37
Figura 3.1 Esquema de la rampa de acceso representada con AC.....	40
Figura 3.2 Esquematización de una convergencia en carretera.....	41
Figura 3.3 Esquema ilustrativo de los elementos considerados para el modelo propuesto sin mecanismo de control de acceso.....	42
Figura 3.5 Esquema del sistema de dos carriles con una rampa de acceso.....	45
Tabla 3.1 Descripción de las variables principales y los parámetros del modelo propuesto para múltiples carriles con rampa de acceso sin mecanismo de control específico y vehículos heterogéneos.....	48
Figura 3.6. Diagrama espacio-temporal para $(q_{in}, q_{on}) = (2000, 1200)$ veh/h.....	50
Figura 3.7 Mediciones de los detectores ubicados en la vía principal en las posiciones indicadas para $(q_{in}, q_{on}) = (2000, 1200)$ veh/h.....	51
Figura 3.8. Diagrama espacio-tiempo para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 800)$ veh/h.....	51
Figura 3.9 Mediciones de los detectores ubicados en la vía principal en las posiciones indicadas para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 800)$ veh/h.....	52
Figura 3.10 Diagrama espacio-tiempo para $(q_{in}, q_{on}) = (1000, 100)$ veh/h.....	52
Figura 3.11 Mediciones de los detectores ubicados en la vía principal en las posiciones indicadas para $(q_{in}, q_{on}) = (1000, 100)$ veh/h.....	53
Figura 3.12. Ampliación de una sección del diagrama espacio-tiempo para $(q_{in}, q_{on}) = (1000, 100)$ veh/h.....	53
Figura 3.13 Diagrama de Fases de tráfico congestionado en la vía principal para el modelo propuesto.....	54
Figura 3.14 Flujo promedio medido cada minuto en la vía principal a través de la ecuación (3.3) para los diferentes valores de L_{merge} estudiados.....	55
Figura 3.15 Flujo efectivo de ingreso a la vía principal a través de la rampa para diferentes valores de L_{merge} estudiados.....	55
Figura 3.16 Tiempo promedio para que un vehículo logre ingresar a la vía principal desde la rampa para los diferentes valores de L_{merge} estudiados.....	56
Figura 3.17 Diagramas espacio-tiempo para $q_{in}=1500$ y $q_{on}=1200$ veh/h para diferentes longitudes de la zona de <i>merge</i>	57
Figura 3.18 Esquema ilustrativo de los elementos considerados para el modelo con control mediante semáforo.....	59

Figura 3.19 Diagrama de la secuencia de pasos del modelo propuesto para rampas de acceso con semáforo como mecanismo de control.	60
Figura 3.20 Diagrama de la fase verde para rampas de acceso con semáforo de control específico.	61
Figura 3.21 Esquema que representa al vehículo en estudio denominado n ante una luz roja.	62
Figura 3.22 Representación del cambio de fase de verde a rojo en la rampa de acceso.	62
Figura 3.23. Representación del vehículo <i>break</i> deteniéndose ante la luz roja del semáforo.	63
Tabla 3.2 Descripción de las variables principales y los parámetros del modelo propuesto vía principal de múltiples carriles con rampa de acceso controlada mediante semáforo de tiempo fijo y vehículos heterogéneos.	65
Tabla 3.3. Duración de las fases del semáforo para permitir el paso de 1, 2 o 3 vehículos por cada ciclo.	67
Tabla 3.4 Porcentaje de vehículos que rebasan el semáforo para diferentes valores de demanda.	67
Tabla 3.5 Error relativo de la capacidad medida respecto a la teórica.	67
Tabla 3.6 Error relativo de la capacidad medida respecto a la esperada.	68
Tabla 3.7 Tiempos de espera en la rampa, velocidades y flujos promedio en la vía principal para diferentes demandas en la rampa con las 3 estrategias de control.	69
Figura 3.24 Tiempos de espera en la rampa, velocidades y flujos promedio en la vía principal para las 3 estrategias de control con flujos de entrada $(q_{in}, q_{on}) = (1900, 700)$ veh/h.	69
Figura 3.25 Tiempos de espera en la rampa, velocidades y flujos promedio en la vía principal para 2 estrategias de control con flujos de entrada $(q_{in}, q_{on}) = (1400, 800)$ veh/h.	70
Figura 3.26 Tiempos de espera en la rampa, velocidades y flujos promedio en la vía principal para 2 estrategias de control con flujos de entrada $(q_{in}, q_{on}) = (1200, 1000)$ veh/h.	71
Figura 3.27 Tiempos de espera en la rampa, velocidades y flujos promedio en la vía principal para 2 estrategias de control con flujos de entrada $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 900)$ veh/h.	71
Figura 3.28 Tiempos de espera en la rampa, velocidades y flujos promedio en la vía principal para 2 estrategias de control con flujos de entrada $(q_{in}, q_{on}) = (1700, 1100)$ veh/h.	71
Figura 3.29 Tiempos de espera en la rampa, velocidades y flujos promedio en la vía principal para 2 estrategias de control con flujos de entrada $(q_{in}, q_{on}) = (1600, 1200)$ veh/h.	72
Figura 3.30 Tiempos de espera en la rampa, velocidades y flujos promedio en la vía principal para 2 estrategias de control con flujos de entrada $(q_{in}, q_{on}) = (2000, 1200)$ veh/h.	72
Figura 3.31 Ubicación de los detectores virtuales colocados sobre la vía principal y la rampa.	73
Figura 3.32 Velocidades medidas en los detectores para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 900)$ veh/h sin emplear mecanismo de control.	74
Figura 3.33 Flujo medido en los detectores para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 900)$ veh/h sin emplear mecanismo de control.	74
Figura 3.34 Velocidades medidas en los detectores para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 900)$ veh/h cuando se permite el paso de un vehículo por ciclo.	75
Figura 3.35 Flujo medido en los detectores para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 900)$ veh/h cuando se permite el paso de un vehículo por ciclo.	76
Figura 3.36 Velocidades medidas en los detectores para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 900)$ veh/h cuando se permite el paso de dos vehículos por ciclo.	76
Figura 3.37 Flujo medido en los detectores para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 900)$ veh/h cuando se permite el paso de dos vehículos por ciclo.	77
Figura 3.38 Velocidades medidas en los detectores para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 900)$ veh/h cuando se permite el paso de tres vehículos por ciclo.	77
Figura 3.39 Flujo medido en los detectores para $(q_{in}, q_{on}) = (1800, 900)$ veh/h cuando se permite el paso de tres vehículos por ciclo.	78
Figura 3.40 Velocidades medidas en los detectores para $(q_{in}, q_{on}) = (2000, 1200)$ veh/h sin emplear mecanismo de control.	79
Figura 3.41 Flujo medido en los detectores para $(q_{in}, q_{on}) = (2000, 1200)$ veh/h sin emplear mecanismo de control.	79
Figura 3.42 Velocidades medidas en los detectores para $(q_{in}, q_{on}) = (2000, 1200)$ veh/h cuando se permite el paso de tres vehículos por ciclo.	80
Figura 3.43 Flujo medido en los detectores para $(q_{in}, q_{on}) = (2000, 1200)$ veh/h cuando se permite el paso de tres vehículos por ciclo.	80
Figura A- 1 Esquema de bloques con tiempos para el programa secuencial.	86
Figura A- 2 Esquema de comunicaciones utilizado.	87
Figura A- 3 Comunicaciones entre workers.	88
Figura A- 4 SpeedUp por densidad y número de procesadores.	89
Figura A- 5 Eficiencia por densidad y número de procesadores.	90
Figura A- 6 Tiempo totales de ejecución por densidad y número de procesadores.	90
Figura A- 7 Tiempo Total de Ejecución vs densidad, por número de Procesadores.	90