



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE LA COMPUTACIÓN**

**DISEÑO DE MODELOS DE COMPORTAMIENTO PARA CONDUCTORES
EN TRÁFICO VEHICULAR UTILIZANDO UNA COMBINACIÓN DE TEORÍA
DE JUEGOS Y EL PARADIGMA BASADO EN AGENTES**

TESIS

Qué para optar por el grado de:

Doctor en Ciencias (Computación)

Presenta:

M. en C. Luis Enrique Cortés Berruero

Tutores:

Dr. Christopher R. Stephens
Instituto de Ciencias Nucleares, Unam
Centro de Ciencias de la Complejidad, Unam

Dr. Carlos Gershenson
Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas, Unam
Centro de Ciencias de la Complejidad, Unam

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, mayo de 2017



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.

*Dedicado a
mi amada esposa
Pam*

Agradecimientos

A la vida, por permitirme tomar este camino de estudio y por colocar en el camino a todas aquellas personas que me apoyaron.

Un agradecimiento muy especial a mi esposa Pamela por apoyarme en los momentos más difíciles de andar y por ser el motor que me impulsa hacia adelante.

A mis padres sin cuyas bases éticas, morales, culturales, sociales y académicas nada de esto hubiera sido posible.

A mi hermana y mi tía Elsa por sus consejos y opiniones a lo largo del camino.

A mi comité tutor, el Dr. Carlos Gershenson, el Dr. Christopher R. Stephens y el Dr. Luis Álvarez-Icaza, por ser excelentes ejemplos a seguir tanto en el ámbito académico y profesional como en el ámbito personal.

A los miembros del jurado, La Dra. María Elena Lárraga y el Dr. David Rosenblueth, por sus enseñanzas y correcciones para poder mejorar este trabajo.

Al Dr. Nelsón Fernández, el Dr. Jesús Mario Siqueiros, el Dr. Carlos Piña, al M. En C. Gustavo Carreón y el M. en C. Jorge Zapotecatl por el apoyo y el buen ambiente de trabajo.

A los miembros de la Coordinación del Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación, Amalia, Cecilia y Lulú por su excelente labor y calidez al ayudarnos con los trámites que se requerían.

Finalmente, al CONACYT por la confianza y el apoyo económico proporcionado a través de su programa de becas.

Resumen

En el presente trabajo se expone la investigación realizada para desarrollar un marco de trabajo que permite aplicar modelos de teoría de juegos sobre modelos de tráfico vehicular. Se detalla también el resultado de aplicar este marco de trabajo: un modelo de comportamiento de tráfico vehicular que hereda la dinámica realista alcanzada por un modelo de tráfico vehicular en carretera que incluye cambio de carril y que además incorpora fenómenos provocados por las interacciones entre vehículos. Para lograr esto se realizó también una descripción, basada en la teoría de juegos, de las interacciones entre conductores. Esta descripción permite dos cosas: modelar diferentes comportamientos en los conductores al momento de ejecutar un cambio de carril y, al mismo tiempo, poder llevar un registro del desempeño de la vialidad. Se realizaron varias simulaciones para poder realizar estudios de la evolución de la cooperación, flujo vehicular y desempeño de la movilidad para diferentes comportamientos y escenarios que fueron modelados.

Abstract

This work presents the development of a framework created to apply game theory models to vehicular traffic models. The resulting model of applying this framework is detailed. This new model inherits the realistic dynamic achieved by a two-lane traffic model and aims to incorporate phenomena caused by driver-driver interactions. To achieve this goal, a game-theoretic description of driver interactions was developed. This game-theoretic formalization allows one to model different lane-changing behaviors and to keep track of mobility performance. We simulate the evolution of cooperation, traffic flow, and mobility performance for different modeled behaviors and different scenarios.

Índice general

Agradecimientos	V
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XVII
Introducción	1
1. Evolución de la cooperación	7
1.1. Teoría de juegos	7
1.1.1. Solución de un juego	8
1.1.2. Tipos de juegos	9
1.2. Teoría de juegos evolutiva	10
1.3. Las reglas de Nowak para la evolución de la cooperación .	11
1.3.1. Conceptos generales a las tres reglas	12
1.3.2. Selección por parentesco	12
1.3.3. Reciprocidad directa	18
1.3.4. Reciprocidad indirecta	24
1.4. Evolución de la cooperación mediante propagación social .	30
1.4.1. De selección natural a propagación social	30
1.4.2. Marco de trabajo propuesto	33
1.5. Conclusiones del capítulo	41
2. Modelos de tráfico vehicular	43
2.1. Revisión a la historia del modelo GLAI	44
2.1.1. Modelo Nagel-Schreckenberg	44
2.1.2. Modelo LAI	47
2.2. Modelo GLAI	55
2.2.1. Descripción del modelo	55
2.2.2. Alcances del modelo GLAI	61

3. Modelando tráfico vehicular en carreteras con teoría de juegos	63
3.1. Categorización de comportamientos	63
3.2. Resumen del proceso de unión de los modelos	64
3.3. Descripción del modelo	65
3.3.1. Sección GLAI	65
3.3.2. Sección para la evolución de la cooperación	78
3.4. Metodología y análisis de las simulaciones	84
3.4.1. Metodología	84
3.4.2. Resultados de las simulaciones	87
3.5. Conclusiones del capítulo	98
4. Estudio de caso: Modelado de un escenario conflictivo	101
4.1. Problemática	101
4.1.1. Analizando la configuración original de la infraestructura	103
4.2. Modelado del escenario	104
4.2.1. Extendiendo el modelo GLAI	106
4.3. Modelado de posible solución	117
4.4. Metodología y análisis de simulaciones	122
4.5. Conclusiones del capítulo	129
5. Conclusiones generales	131
5.1. Novedad del modelo	131
5.2. Evolución de la cooperación	132
5.3. Optimización de la movilidad	134
5.4. Trabajo futuro	136
5.4.1. Juegos Bayesianos	136
5.4.2. Vehículos autónomos	136
5.4.3. Expresividad del modelo	136
A. Juegos derivados de la regla de selección por parentesco	139
A.1. Dilema del prisionero	139
A.2. La piedad del otro	140
A.3. Trabajo en equipo	141
A.4. Sinergia cooperativa	142

B. Juegos derivados de la regla de reciprocidad directa	145
B.1. Dilema del prisionero	145
B.2. Caza invernal del ciervo	145
B.3. La caza del ciervo	146
C. Juegos derivados de la regla de reciprocidad indirecta	149
C.1. Dilema del prisionero	149
C.2. Caza invernal del ciervo	149
C.3. La caza del ciervo	149
C.4. Cooperación mutua o perder	149
D. Metodología utilizada para validar el marco de trabajo propuesto	151
E. Pseudocódigo de las tres reglas estudiadas.	157
E.1. Selección por parentesco (KS)	157
E.2. Reciprocidad Directa (DR)	158
E.3. Reciprocidad Indirecta (IR)	158

Índice de figuras

1.1. Bloqueo vehicular en intersección	11
1.2. Comportamiento de la matriz de pago de selección por parentesco	14
1.3. Ejemplos de la matriz de pago de selección por parentesco	17
1.4. Condiciones de juego para la regla de selección por parentesco	18
1.5. Comportamiento de la matriz de ganancias reciprocidad directa	20
1.6. Ejemplos de la matriz de pago de reciprocidad directa . . .	21
1.7. Acercamiento a las gráficas de comportamiento de reciprocidad directa	22
1.8. Condiciones de juego para la regla de reciprocidad directa	24
1.9. Comportamiento de la matriz de ganancias reciprocidad indirecta	26
1.10 Ejemplos de la matriz de pago de reciprocidad indirecta .	28
1.11 Condiciones de juego para la regla de reciprocidad indirecta	29
1.12 Función de pertenencia de los agentes	33
1.13 Ejemplo de modelo en NetLogo	35
1.14 Comportamiento característico del marco de trabajo. . . .	41
2.1. Ejemplo del modelo Na-Sch.	45
3.1. Ejemplo del modelo GLAI.	66
3.2. Resultados Evolución de la Cooperación	88
3.3. Resultados Evolución de la Cooperación Selección por Parentesco	89
3.4. Resultados Evolución de la Cooperación Reciprocidad Indirecta	90
3.5. Comparación entre diferentes comportamientos	90
3.6. Velocidades Promedio	91

3.7. Diagramas fundamentales	92
3.8. Acercamiento a diagramas de flujo	92
3.9. Índice de Movilidad	94
3.10Acercamiento a índice de movilidad	94
3.11Gráfica Espacio-Temporal 1	96
3.12Gráfica Espacio-Temporal 2	97
3.13Probabilidad de Frenados de Emergencia	98
4.1. Cruce de churubusco y Tlalpan	102
4.2. Modificación al cruce de Churubusco y Tlalpan.	102
4.3. Cruce de churubusco y Tlalpan Señalizado	104
4.4. Imágenes de puntos problemáticos	105
4.5. Nuevos casos de seguridad	108
4.6. Implementación del modelo extendido	117
4.7. Implementación del modelo extendido con barrera	121
4.8. Impacto de las rampas en la evolución de la cooperación .	123
4.9. Diagrama de flujo para diferentes distancias entre rampas	124
4.10Diagrama de flujo para diferentes distancias entre rampas	125
4.11Diagrama de flujo para diferentes distancias entre rampas	125
4.12Mapa de calor de frenado	126
4.13Mapa de calor de aceleración	127
4.14Mapa de calor de frenado con barrera	128
4.15Mapa de calor de aceleración con barrera	128

Índice de cuadros

1.1. Ejemplo de un juego	8
1.2. Ejemplo de una familia de juegos	9
1.3. Regla selección por parentesco	13
1.4. Regla reciprocidad directa	19
1.5. Regla reciprocidad indirecta	25
1.6. Lista de parámetros del marco de trabajo	38
1.7. Impacto de los parámetros en las tres reglas.	40
2.1. Parámetros del modelo Na-Sch.	47
2.2. Parámetros del modelo LAI.	54
2.3. Variables del modelo LAI.	54
2.4. Variables para cambios de carril.	57
2.5. Parámetros del modelo GLAI.	60
3.1. Parámetros del modelo GLAI.	66
3.2. Variables para cambios de carril.	67
3.3. Reglas de comportamiento	81
A.1. Ejemplo del dilema del prisionero	140
A.2. Ejemplo de la piedad del otro	141
A.3. Ejemplo de trabajo en equipo	142
A.4. Ejemplo de sinergia cooperativa	143
B.1. Ejemplo de la caza invernal del ciervo	146
B.2. Ejemplo de la caza del ciervo	148
C.1. Ejemplo de cooperación mutua o perder	150
D.1. Lista de parámetros para medir el impacto de la afinación de la tendencia	152

D.2. Lista de parámetros para medir el impacto de la probabilidad cooperativa inicial.	153
D.3. Lista de parámetros para medir el impacto del tamaño de la población.	154
D.4. Lista de parámetros para medir el impacto de la proporción inicial de cooperadores.	154
D.5. Lista de parámetros para medir el impacto del tamaño de la población.	155

Introducción

Problemática

La dinámica del tráfico vehicular, independientemente de cómo se modele (urbano, en carretera, monocarril, multicarril, etc.), es un ejemplo representativo de los sistemas adaptativos complejos (Cools et al., 2013; Jia et al., 2005; Nagatani, 2005; Nagel y Schreckenberg, 1992; Toledo et al., 2004). Esta es la razón por la que crear modelos de tráfico vehicular no es una tarea trivial. El paradigma utilizado inicialmente para esta tarea (modelos macroscópicos) consistía en considerar al tráfico vehicular como un fluido cuyas partículas correspondían a los vehículos, mientras que las calles y/o autopistas que éstos recorren se representaban como el medio por el que el fluido se desplazaba. Conforme los estudios fueron avanzando a los modelos macroscópicos, se fueron dotando a las partículas de múltiples formas de interactuar ya sea entre ellas mismas o con el medio por el que fluyen (circulan). Al ser este último el paradigma mayormente utilizado en diversos estudios de tráfico vehicular, también es el paradigma que se encuentra como fundamento de múltiples técnicas y tecnologías utilizadas en el diseño de los Sistemas de Control de Tráfico (SCT) (Bretherton et al., 2005; Ibrahim et al., 2005; Katsaros et al., 2011; Wada et al., 2005).

La mayoría de estos SCT, tecnologías y modelos centran su atención en interacciones vehículo-SCT o en interacciones físicas vehículo-vehículo, asumiendo un comportamiento semi-idealizado por parte del conductor, dejando fuera del alcance del estudio aspectos importantes como la imprevisibilidad humana y comportamientos que los conductores podrían realizar para mejorar las condiciones de circulación vial (Jia et al., 2005). De tal manera que, no se toma en cuenta que los vehículos son operados por conductores humanos que toman decisiones y adoptan diferentes comportamientos con el propósito de alcanzar

sus objetivos.

El estudio de las interacciones vehículo-vehículo inducidas por las decisiones tomadas por los conductores ofrece un campo abierto para responder preguntas como: ¿Cómo afectan a las diferentes soluciones ya establecidas las perturbaciones causadas por el comportamiento de los conductores?, ¿cuál es la naturaleza de las interacciones entre conductores?, ¿cómo modelar el comportamiento de los conductores de forma más realista?

Recientemente han surgido modelos de tráfico vehicular que incluyen aspectos sociales (interacciones vehículo-vehículo). El modelo de intersección de Wastavino *et al.* (Wastavino *et al.*, 2007) analiza, entre otros aspectos, los efectos que pueden causar los conductores al cruzar la intersección de modo agresivo o de modo precavido. El modelo de cambio de carril MOBIL (Kesting *et al.*, 2007) incluye un factor de cortesía (*politeness factor*) que indica en que medida un conductor se preocupa por las condiciones viales de los demás conductores al realizar un cambio de carril; este factor tiene una gran influencia en la proporción de cambios de carril. También existen algunos estudios, como el que llevaron a cabo Nakata *et al.*, acerca de estructuras de juego tipo Dilema del Prisionero dentro del flujo vehicular al presentarse reducciones de carriles (Nakata *et al.*, 2010).

También existen estudios que centran su atención en los procesos de toma de decisiones involucrados en el tráfico vehicular (Hollander y Prashker, 2006; Zhang *et al.*, 2010). Estos incluyen desde análisis a nivel macroscópico de políticas (entre autoridades, entre conductores y autoridades, y entre conductores) hasta descripciones a nivel microscópico de comportamientos ya sea, entre conductores y autoridades, o entre conductores.

Los resultados de los modelos anteriormente mencionados subrayan la importancia de contar con descripciones más realistas de los conductores dentro de los modelos de tráfico vehicular. Es importante recordar que representar un grado apropiado de heterogeneidad entre los conductores es un problema constante al modelar. Un bajo nivel de heterogeneidad limita los resultados al sobre simplificar el comportamiento de los conductores, mientras que un nivel alto nos llevará a modelos sobre complicados con resultados difíciles de interpretar.

La actividad de conducir un vehículo puede describirse como un proceso de toma de decisiones. Una vez que el vehículo empieza a moverse el conductor debe tomar múltiples decisiones. Por ejemplo: en qué mo-

mento se cambiará de carril, en qué momento debe frenar, cuando cruzar o cuando esperar en una intersección no semaforizada (Wastavino et al., 2007). Existen estudios que describen varias de estos procesos de toma de decisiones que utilizan paradigmas de teoría de juegos y aplican estas descripciones a estudios de vehículos autónomos (Wang et al., 2015) y estudios de comunicaciones vehículo-vehículo (V2V) Talebpour et al. (2015). Este tipo de modelos generalmente asumen agentes con racionalidad perfecta, es decir, los agentes son capaces de determinar que acción los puede llevar a obtener ganancias óptimas tanto para el agente que toma la decisión como para todos los demás agentes con los que se encuentra interactuando. Para estudios de vehículos autónomos, determinar qué acciones conducen a beneficios óptimos para cada participante es un objetivo importante. Sin embargo, estudios que incluyan conductores humanos podrían beneficiarse de otros enfoques. Se ha señalado (Zhang et al., 2010) que el comportamiento humano podría tomar otros factores además de la racionalidad. También se ha señalado que los conductores probablemente no cuentan con toda la información para poder determinar las acciones que deben realizar para obtener ganancias óptimas mientras conducen.

En (Zhang et al., 2010) también se hace mención de que para obtener soluciones óptimas, los modelos deben utilizar algoritmos con un alto costo computacional. Un ejemplo de esto es el modelo presentado en (Talebpour et al., 2015) que, a pesar de ser un rubusto tuvo que ser simplificado para poderlo hacer computacionalmente práctico y poder así ofrecer resultados. Esta característica provoca que los modelos no puedan ser utilizados como base para desarrollar sistemas de control de tráfico en tiempo real.

Los objetivos de la investigación son los siguientes:

1. Analizar el impacto que tienen diferentes tipos de comportamientos de conductores en el desempeño del tráfico vehicular.
2. Proponer un marco de trabajo que evite comportamientos semi-idealizados, racionalidad perfecta y el uso de algoritmos computacionalmente costosos; y que a su vez permita la inclusión de los elementos propios de la toma de decisiones dentro de un modelo

computacional de tráfico vehicular.

3. Desarrollo de un modelo computacional de tráfico vehicular que incorpore el marco de trabajo mencionado, incluyendo así los procesos de toma de decisiones que los conductores pueden llevar a cabo.
4. Por medio del modelo desarrollado: estudiar, evaluar y proponer soluciones (en las circunstancias que así lo requieran) de diversos escenarios que se puedan encontrar en el tráfico vehicular.

Estructura del documento

El desarrollo del trabajo seguirá el curso que a continuación se resume:

- Cap.1 : Se expondrá el proceso que se llevó a cabo para la creación del marco de trabajo que nos permite incluir procesos de toma de decisiones dentro de un modelo computacional basado en agentes. Este capítulo comienza con una introducción a la teoría de juegos y teoría de juegos evolutiva para después poder ampliar más sobre la evolución de la cooperación en una población de agentes computacionales. Los resultados de este capítulo fueron presentados en el International Workshop on Self-Organizing Systems (IWSOS) 2013 y publicados en [Cortés-Berrueco et al. \(2014\)](#).
- Cap.2 : En esta sección se realizará una breve introducción a los modelos de tráfico vehicular basados en autómatas celulares. Se explicará con detalle el modelo al cual aplicaremos el marco de trabajo expuesto en el primer capítulo. Finalmente se expondrá el proceso realizado para cambiar dicho modelo del paradigma en que fue fundamentado, autómatas celulares, a la modelación basada en agentes.
- Cap.3 : En este capítulo se detallará el modelo de comportamiento de tráfico vehicular propuesto. Se explicará como aplicar el marco de trabajo expuesto en el primer capítulo sobre el modelo de tráfico vehicular explicado en el segundo capítulo. Se mostrarán los resultados obtenidos en las simulaciones de escenarios base.

Finalmente, este capítulo cerrará con una discusión de dichos resultados. El contenido de este capítulo se presentó en la European Conference on Complex Systems (ECCS) 2014 y posteriormente fue publicado en [Cortés-Berrueco et al. \(2016\)](#).

- Cap.4 : Se planteará un caso de estudio donde la intervención sea necesaria y las soluciones propuestas puedan verse afectadas por los diferentes comportamientos que los conductores puedan exhibir. Se comenzará por analizar las condiciones iniciales del escenario; posteriormente se expondrán algunas posibles soluciones y se implementarán algunas de ellas. Por medio de simulaciones que incluyan nuestro marco de trabajo se analizará la eficiencia de las soluciones implementadas. Se expondrán los resultados obtenidos y finalmente se discutirán con el objetivo de obtener la mejor solución. El contenido de este capítulo fue presentado en la Conference on Complex systems (CCS) 2016.
- Conclusiones: En esta sección se elaborarán las conclusiones correspondientes al trabajo presentado.
- Apéndices: En ellos se puede encontrar información complementaria para una mejor comprensión del primer capítulo.

Capítulo 1

Evolución de la cooperación

Hace algunas décadas, la teoría de juegos se creó como una herramienta que nos ayuda a entender de mejor manera los procesos de toma de decisiones ([Osborne y Rubinstein, 1994](#); [von Neumann y Morgenstern, 1944](#)). Actualmente la teoría de juegos se utiliza para estudiar procesos de toma de decisiones tales como: subastas, formación de oligopolios, votaciones ([Brams, 1994](#)), división de recursos justa ([Aumann y Maschler, 1985](#)), estrategia militar ([O'Neill, 1994](#)), comunicación animal ([Johnstone, 1996](#)), comportamiento animal ([Dugatkin y Godin, 1992](#)), entre otras. También se usa como marco para entender fenómenos asociados a la toma de decisiones, por ejemplo: evolución de la equidad (o justicia) ([Ichinose y Sayama, 2014](#)), evolución de la cooperación ([Nowak, 2006](#)), dinámica evolutiva de dilemas sociales ([Santos et al., 2006](#)) y gobernabilidad de bienes comunes en riesgo ([Vasconcelos et al., 2014](#)).

1.1. Teoría de juegos

Como ya se mencionó, la teoría de juegos engloba diferentes herramientas analíticas para estudiar los fenómenos de toma de decisiones. Sin embargo, todas estas herramientas asumen que los tomadores de decisiones (jugadores) persiguen algún objetivo en particular y que para alcanzar dicho objetivo los jugadores toman en cuenta su conocimiento o expectativa acerca de las acciones que realizarán los otros jugadores.

Las herramientas, o modelos, de la teoría de juegos son representaciones abstractas de diferentes tipos de interacciones que pueden darse

en la vida real. Estos modelos reciben el nombre de juegos y constan de:

- Un conjunto de tomadores de decisiones (comúnmente llamados jugadores).
- Un conjunto de acciones que puede tomar cada uno de los jugadores.
- Un conjunto de consecuencias para cada acción que puede tomar cada uno de los jugadores. Se acostumbra expresar las consecuencias de forma numérica de tal forma que un conjunto determinado de decisiones ofrecerá pérdidas o ganancias a los jugadores.

En el cuadro 1.1 puede observarse una matriz de pagos (o ganancias) en la que se encuentran expresados todos los elementos anteriormente descritos de un juego en particular.

		J2	
		A1	A2
J1	A1	1 , -1	-1 , 1
	A2	-1 , 1	1 , -1

Cuadro 1.1: Ejemplo de un juego. Se tiene a los jugadores J1 y J2, cada uno de ellos puede tomar una de dos acciones (A1 o A2) y para este caso en particular si los jugadores realizan la misma acción el jugador 1 recibirá una unidad de ganancia y el jugador 2 perderá una unidad de ganancia; si los jugadores realizan acciones diferentes el que recibirá ganancias será el jugador 2 mientras el jugador 1 tendrá pérdidas.

1.1.1. Solución de un juego

Se le denomina solución a la descripción sistemática de las decisiones resultantes que emergen en una familia de juegos.

Por familias de juegos se entiende que, dada la estructura de los juegos, pueden existir una infinidad de ellos (infinidad de matrices de pagos). Sin embargo, habrá varias de ellas que compartan ciertas características. Por ejemplo, se puede pensar en variaciones de la matriz del cuadro 1.1. En lugar de que en las casillas haya números 1 podrían

cambiarse por números 2 o cualquier otro número siempre y cuando se respete la relación que hay en las casillas. En una matriz de pagos podría verse como el cuadro 1.2.

		J2	
		A1	A2
J1	A1	$x, -x$	$-x, x$
	A2	$-x, x$	$x, -x$

Cuadro 1.2: Ejemplo de una familia de juegos. En este caso la x puede ser reemplazada por cualquier número.

No importa que valor tome la variable x los múltiples juegos que resulten de colocar diferentes valores a ésta variable conservarán las mismas características: si los jugadores realizan la misma acción el jugador 1 tendrá ganancias y el jugador 2 tendrá pérdidas mientras que si los jugadores realizan acciones diferentes, el jugador 1 tendrá pérdidas y el jugador 2 tendrá ganancias.

Las decisiones resultantes de esta familia de juego dependerá de la forma en como se lleven a cabo los juegos. Podemos pensar, por ejemplo, en que dos personas se sienten a jugar. Se les muestra la matriz de pagos del cuadro 1.1 y se les solicité que al mismo tiempo tomen una decisión (elegir una de los dos posibles acciones). Si solamente se les permite jugar una vez por pareja, para este juego en particular, no se encontrará que los jugadores tomen de manera sistemática una acción. Si, por otro lado, se permite que los jugadores puedan realizar este juego varias veces probablemente se pueda observar que los jugadores lancen una moneda para determinar que acción escogerán.

Las condiciones que dan origen a un resultado común de diferentes parejas de jugadores para una misma familia de juegos comprenderán la descripción sistemática de las decisiones resultantes.

1.1.2. Tipos de juegos

Actualmente existe una gran cantidad de juegos y diferentes puntos de vista para estudiarlos. Esto a dado como resultado que la teoría de juegos se subdivide en diversas ramas para poder realizar estudios a profundidad de las variaciones que deseen incluirse en el estudio.

1.2. Teoría de juegos evolutiva

Existe una rama dentro de la teoría de juegos que permite modelar situaciones en que las acciones de los jugadores están determinadas por fuerzas evolutivas (Osborne y Rubinstein, 1994). La estructura que presentan los juegos estudiados por esta rama generalmente consta de una población de organismos (animales, seres humanos, plantas, agentes, etc.) que interactúan entre ellos. Esta interacción típicamente se especifica para pares de organismos que, se considera, no pueden escoger sus acciones conscientemente; en vez de eso, ellos heredan sus comportamientos de sus antecesores y solamente pueden llegar a cambiar por efecto de mutaciones. Dentro del modelo debe existir una función que indique la capacidad que un individuo tiene para sobrevivir en el medio ambiente, y esta capacidad se verá modificada por las ganancias o pérdidas que tengan los jugadores al interactuar. La solución, o equilibrio, para este tipo de juegos se presenta al emerger un estado estacionario en el que todos los organismos de la población ejecuten una misma acción y los mutantes que surjan no sean capaces de sobrevivir.

Dentro de la teoría de juegos evolutiva existe un amplio estudio (Axelrod, 1984; Cortés-Berruero et al., 2014; Nowak, 2006; Santos et al., 2006; Vasconcelos et al., 2014) sobre el fenómeno denominado como evolución de la cooperación. En términos generales se asume que la evolución está basada en una competencia entre los individuos donde aquel que sea más apto para sobrevivir se verá mejor recompensado. Sin embargo, es muy común observar cooperación aún en distintos niveles organizacionales biológicos (células eucariontes, organismos multicelulares, cardúmenes, manadas, civilizaciones, etc.). Parecería que la cooperación es necesaria para la construcción de nuevos niveles de organización y aun así debería estar fundamentada en las estrictas condiciones competitivas de la selección natural.

El estudio de cómo evoluciona la cooperación a partir de comportamientos puramente competitivos cobra una especial relevancia al observar ciertos escenarios cotidianos en el tráfico vehicular Fig. 1.1.

Aunque ya existen SCT implementados y que dan buenos resultados en escenarios similares al de la Fig. 1.1, éstos llegan a ser costosos y se limita así su uso en países en vías de desarrollo. Esto nos lleva a la pregunta: ¿se podría llegar a resultados similares a los alcanzados por los SCT mediante alguna estrategia que haga uso de las motivaciones de los conductores? Otro aspecto importante para empezar a desarrollar

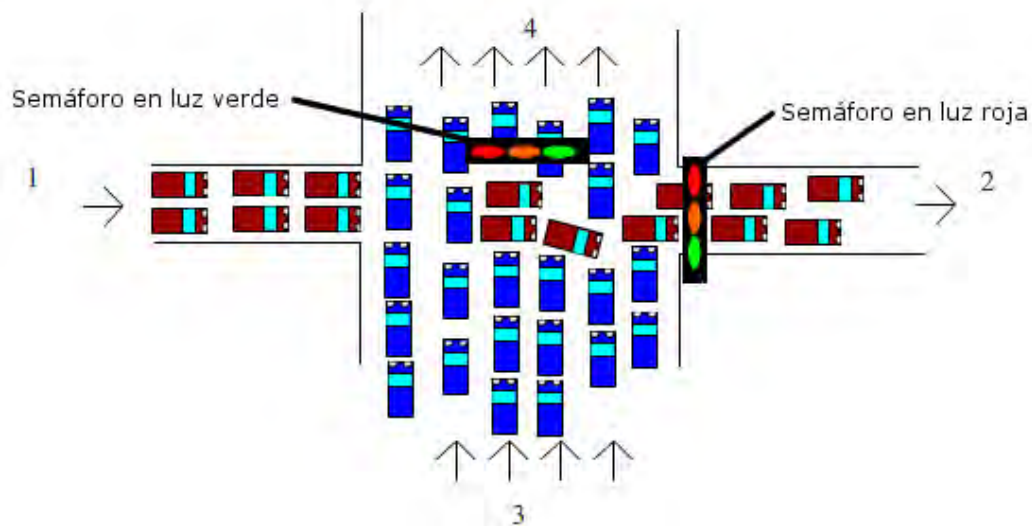


Figura 1.1: Bloqueo causado por vehículos (rojos) que no logran cruzar cuando llega la fase que da el paso a los vehículos azules.

modelos de evolución de la cooperación aplicados al tráfico vehicular sería identificar las perturbaciones que generan los diversos comportamientos que los conductores pueden exhibir y cómo afectan estas a los SCT.

1.3. Las reglas de Nowak para la evolución de la cooperación

En (Nowak, 2006) podemos encontrar un amplio estudio sobre la evolución de la cooperación bajo diferentes escenarios. Este estudio está condensado en cinco reglas que explican cómo surge la cooperación a partir de condiciones estrictamente competitivas. Cada una de estas reglas corresponde a un modelo de la teoría de juegos evolutiva. En este trabajo solamente nos enfocaremos en tres de esas cinco reglas, pues fueron aquellas que de una forma un poco más intuitiva se lograron trasladar a escenarios de tráfico vehicular. A continuación se detallará cada una de esas tres reglas retomando gran parte de la explicación que podemos encontrar en (Nowak, 2006) y complementando estas ideas con algunos estudios que se realizaron para este texto en particular y que parcialmente pueden encontrarse en (Cortés-Berrueco

et al., 2014).

1.3.1. Conceptos generales a las tres reglas

Previo a la explicación de las tres reglas, es importante mencionar conceptos que son comunes en éstas:

- Cooperador (**C**): individuo que paga un costo (c) para que otro individuo lo reciba como beneficio (b).
- Desertor (**D**): individuo que no paga costos y, por lo tanto, no proporciona beneficios.
- Costo/Beneficio: cantidad que es pagada/recibida cuantificada en términos de "aptitud".
- Estrategia evolutivamente estable: punto de equilibrio en la que la población de cooperadores permanece a través del tiempo, es decir, la población de cooperadores logra resistir la invasión de individuos desertores. Por sus siglas en inglés ESS.
- Riesgo-dominante: punto de equilibrio que se alcanza cuando la población de los desertores es menor a la mitad de la población total. Por sus siglas tanto en inglés como en español RD.
- Ventajoso: punto de equilibrio que se alcanza cuando la la población de desertores es menor a un tercio de la población total. Por su abreviación en inglés AD.

A continuación se explicará cada una de las tres reglas y por qué es que se generan los puntos de equilibrio.

1.3.2. Selección por parentesco

La regla de selección por parentesco modela el comportamiento de "genes egoístas". Estos genes, además de incrementar la aptitud del organismo en su medio ambiente, también incluyen un comportamiento de protección hacia aquellos otros individuos que puedan portar un "gen egoísta". La forma más sencilla para determinar que algún otro individuo porte estos genes es mediante una relación consanguínea. De esta manera, el comportamiento de protección hacia otro individuo se

activará mientras mayor sea la probabilidad de compartir genes. En el cuadro 1.3 podemos encontrar este comportamiento expresado como un modelo de teoría de juegos evolutiva.

Matriz de ganancias			ESS	RD	AD	Variables
	C	D	$\frac{b}{c} > \frac{1}{r}$	$\frac{b}{c} > \frac{1}{r}$	$\frac{b}{c} > \frac{1}{r}$	b =beneficio c =costo r =probabilidad de estar relacionados
C	$(b - c)(1 + r)$	$br - c$				
D	$b - rc$	0				

Cuadro 1.3: Regla selección por parentesco presentada como un modelo de teoría de juegos evolutiva. Tanto el jugador 1 (renglones) como el jugador 2 (columnas) tienen dos posibles acciones: cooperar (C) o desertar (D).

Este modelo, presentado en (Nowak, 2006), tiene la misma condición para sus tres puntos de equilibrio (ESS, RD y AD). Esta condición se alcanza cuando la razón b/c es mayor que el cociente $1/r$. Otra forma de expresar esto es: la probabilidad de estar relacionados debe ser mayor a la razón costo-beneficio.

$$r > \frac{c}{b}$$

Se puede obtener más información del cuadro 1.3 si observamos el comportamiento de cada una de las casillas (CC, CD, DC y DD) de la matriz de pago al variar los valores de las variables (b , c y r) que en ellas encontramos. Este análisis puede encontrarse resumido en (Cortés-Berruero et al., 2014) y aquí será abordado en profundidad.

En la Fig. 1.2 se pueden observar los comportamientos que siguen CC, CD, DC y DD al colocar diferentes valores para b , c y r . Cada una de las casillas de la matriz de ganancias puede tomarse como una función dependiente de tres variables. Para poder visualizar estas funciones en espacios tridimensionales se optó por fijar un valor arbitrario para b y expresar uno de los ejes como la diferencia de $b - c$. También es importante hacer notar que, al igual que las reglas de (Nowak, 2006), solamente se toman en cuenta valores para b y para c tales que $b > c$ forzosamente. Cada tupla de valores (b , c , r) define condiciones de juego específicas para los participantes. Esto último quiere decir que cada

uno de los puntos que observamos en las gráficas de la Fig. 1.2 corresponde a condiciones de juego diferentes a las de los demás puntos.

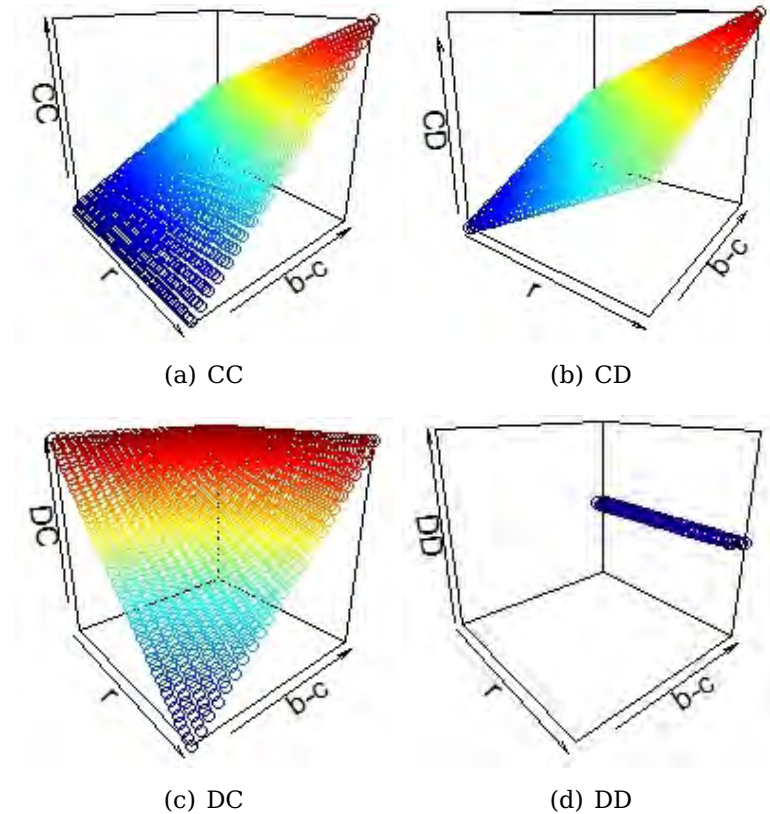


Figura 1.2: Comportamiento de la matriz de pago de la regla selección por parentesco. Para poder mostrar el comportamiento en gráficas de tres dimensiones, uno de los ejes se expresa tomando solamente la diferencia positiva $b - c$.

Las gráficas de la Fig. 1.2 evidencian algunos aspectos que se pueden deducir desde las expresiones contenidas en la matriz de pagos:

- CC: el valor que esta interacción otorga a los participantes se ve altamente influenciada por la diferencia entre b y c . Mientras mayor sea su diferencia, mayor ganancia otorgará a los jugadores. Esto se debe a que en la expresión $(b - c)(1 + r)$, el primer término tiene más influencia que el segundo. Mientras la única restricción que tiene el primer término es que $b > c$ forzosamente; el valor del segundo término se encuentra limitado al conjunto $[1, \dots, 2]$ pues $0 \leq r \leq 1$.

- CD: aquí puede observarse que el valor de r es el que tiene más relevancia en esta interacción. Al multiplicar el valor de r por el valor de b , r tiene la capacidad de reducir incluso a valores negativos la diferencia entre b y c .
- DC: aquí r tiene el efecto contrario que en CD; puede hacer que el desertor obtenga todo el beneficio sin tomar en cuenta el costo (cuando $r=0$) o puede hacer que el beneficio recibido por el desertor sea casi cero (cuando $r=1$ y $c \simeq b$).
- DD: tal como se ve en la matriz de pago, tenemos una constante en cero para cualquier combinación de valores de b , c y r .

Si ponemos especial atención en CD y DC, podemos entender más fácilmente cómo funciona el mecanismo de los "genes egoístas". Siendo el jugador que cooperó en CD, mis "genes egoístas" se estarían beneficiando en la misma proporción en que el desertor comparte conmigo los mismos "genes egoístas". Es por esta razón que b se multiplica por la probabilidad de estar relacionados (r). Para el caso DC, siendo el desertor, estaría recibiendo un beneficio y al no aportarle nada al otro jugador, que tiene una probabilidad r de portar mis mismos "genes egoístas", estaría afectándolos en proporción al costo que están pagando por ayudarme (c). Es por esta razón que al valor de b se le resta una fracción del costo proporcional a la probabilidad de estar relacionados. Para explicar de mejor forma el impacto que tienen los comportamientos de CC, CD, DC y DD, fijaremos valores arbitrarios para b y para c de tal forma que nos sea más fácil ver su comportamiento en dos dimensiones. En la Fig. 1.3 se pueden observar dos casos diferentes. En el primero de ellos tenemos $b = 4$ y $c = 2$, mientras en el segundo tenemos $b=10$ y $c=4$. Entre ambas gráficas existen diferencias y similitudes que proporcionan información relevante. En ambas gráficas podemos observar puntos de intersección CC con DC, CD con DC y CD con DD. Estos puntos de intersección son de gran relevancia para el funcionamiento de la regla y los explicaremos ampliamente más adelante. Por ahora nos enfocaremos en que a pesar de que en ambas gráficas existen estos puntos de intersección, podemos apreciar que estos puntos no se dan sobre los mismos valores de r . Podemos identificar que el valor de b define el punto de inicio de DC, de igual forma c determina el punto de inicio de CD mientras $b - c$ fija el punto de inicio de CC. Las pendientes de cada función, y por lo tanto los puntos de intersección entre

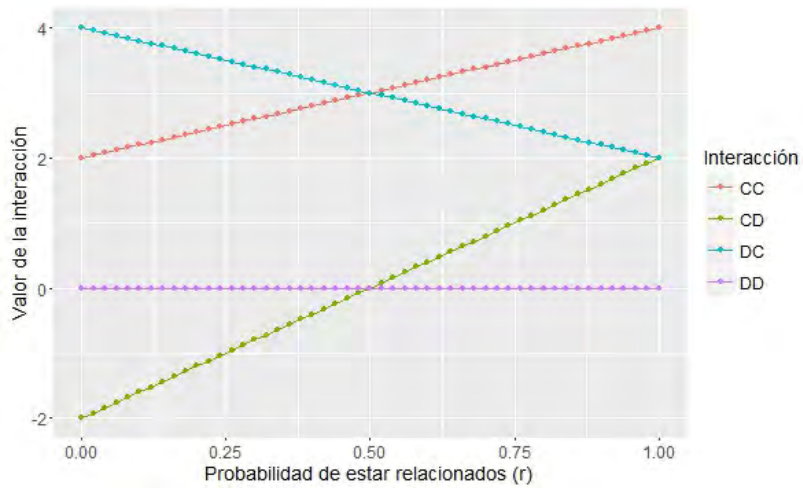
ellas, están determinados por los valores finales que pueden alcanzar. CC puede alcanzar un valor de hasta $2(b - c)$, CD tiene su valor máximo en $(b - c)$ y DC tiene su valor mínimo en $(b - c)$.

Ahora pongamos atención en los puntos de intersección. En la Fig.1.3 podemos observar que DC y CC intersectan en el mismo valor de r en que DD y CD también intersectan. Esto genera cuatro condiciones de juego distintas para ciertos rangos de valores de r . Estas cuatro condiciones están señaladas en la Fig.1.4.

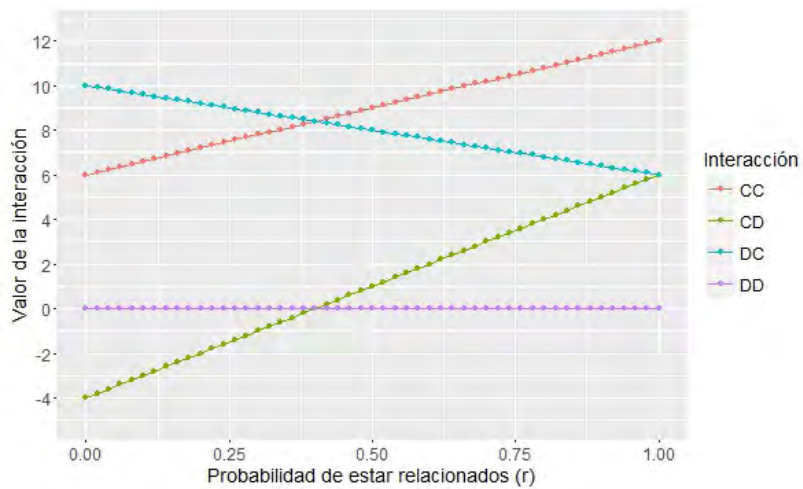
Varias de estas condiciones han sido identificadas y dan lugar a juegos, denominados dilemas sociales (Macy y Flache, 2002; Santos et al., 2006). En la Fig. 1.4 podemos encontrar uno de estos dilemas y tres juegos más que no han tenido tanta difusión y que se tratan un poco más a fondo en el apéndice A. Además podemos notar que al ir variando el valor de r nos podemos mover de un juego al otro. Esto último es una característica que tienen las reglas y nos podría ser de utilidad para desarrollar nuestro modelo de comportamiento de tráfico vehicular.

Interés en la regla de selección por parentesco

La regla de selección por parentesco nos interesa porque, por su descripción, es la que menos complicaciones tiene para implementarse. Las demás tienen condiciones espaciales al momento en que interactúan los agentes. También es una regla que podría utilizarse para modelar algunos fenómenos interesantes del tráfico vehicular. Uno de ellos se presenta al ir conduciendo por las calles y encontrarnos a un conductor que es un "pariente" nuestro (familiar). Lo más probable es que al interactuar con ella en el tráfico seamos más amables (cooperadores) de lo que seríamos con otros conductores. Esta regla se adecua de manera transparente a este tipo de situaciones. Pensemos ahora un poco más allá. ¿Qué pasaría si extendemos un poco más el concepto de "pariente"? ¿Qué pasaría si "pariente" lo utilizamos para distinguir a alguien que conozco (familiar, amigo o conocido del área de trabajo) o se va más allá y lo usamos para distinguir a aquellos que reconozco como iguales? A ese igual le estaría reconociendo características (derechos) similares a las propias (muy parecido a tener "genes egoístas" pero con rasgos abstractos). Pensando de esa forma esta regla podría tener usos más amplios como modelar diferentes tipos rasgos culturales (relacionados con la percepción de "igual") o incluso intentar modelar la percepción de un individuo como miembro de un grupo.



(a) Selección por parentesco $b=4, c=2$



(b) Selección por parentesco $b=10, c=4$

Figura 1.3: Ejemplos del comportamiento de la matriz de pago de la regla selección por parentesco con valores fijos para b y c . (a) Fijamos $b = 4$ y $c = 2$ mientras variamos el valor de r . (b) Fijamos $b = 10$ y $c = 4$ mientras variamos el valor de r .

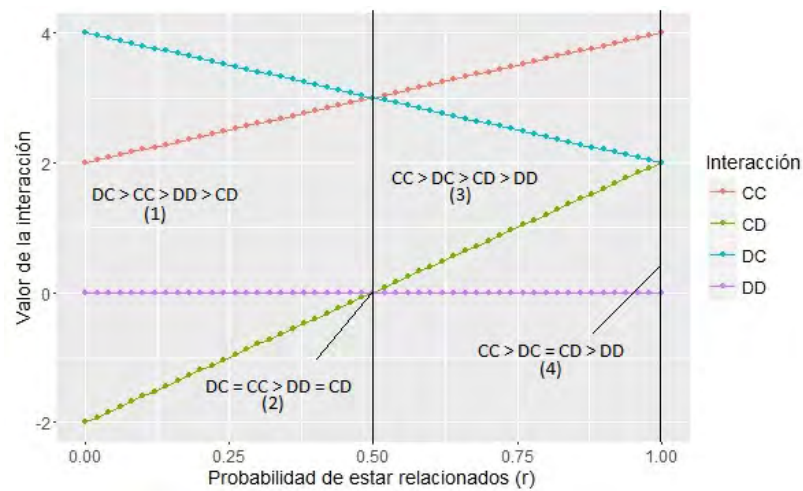


Figura 1.4: Condiciones de juegos para la regla de selección por parentesco con $b = 4$, $c = 2$ y diferentes valores de r . (1) Dilema del prisionero, (2) La piedad del otro, (3) Trabajo en equipo y (4) Sinergia cooperativa.

1.3.3. Reciprocidad directa

La regla de reciprocidad directa, también presentada en (Nowak, 2006), fue pensada para modelar cooperación entre organismos que no están relacionados entre si. Se asume que dos participantes pueden encontrarse en más de una ocasión. En cada uno de estos encuentros lo más probable que ocurra es que aquellos jugadores que cooperaron y sus compañeros que también cooperaron quieran volver a cooperar al reencontrarse. De forma contraria, aquellos jugadores que cooperaron con desertores lo más seguro es que decidan volverse desertores al reencontrarse. Siguiendo este razonamiento, los jugadores cooperadores tendrán como primer movimiento cooperar y posteriormente harán uso de su memoria para cooperar con aquellos oponentes que cooperaron con ellos y serán desertores con aquellos que no cooperaron con ellos. Finalmente los jugadores desertores no cooperarán sin importar a qué clase pertenezca su compañero de juego. Este comportamiento expresado como un modelo de la teoría de juegos evolutiva puede encontrarse en el cuadro 1.4.

Matriz de ganancias			ESS	RD	AD	Variables
	C	D	$\frac{b}{c} > \frac{1}{w}$	$\frac{b}{c} > \frac{2-w}{w}$	$\frac{b}{c} > \frac{3-2w}{w}$	<i>b</i> =beneficio <i>c</i> =costo <i>w</i> = probabilidad de reencontrarse
C	$(b-c)/(1-w)$	$-c$				
D	b	0				

Cuadro 1.4: Regla reciprocidad directa presentada como un modelo de teoría de juegos evolucionaria

A diferencia de la regla de selección por parentesco, podemos observar que existen condiciones diferentes para cada uno de sus puntos de equilibrio. Para entender por qué en esta regla existen tres condiciones diferentes debemos realizar estudios similares a los mostrados en la sección anterior describiendo el comportamiento de las casillas (CC, CD, DC y DD) de la matriz de ganancias al colocar diferentes valores en sus variables (*b*, *c* y *w*).

Al igual que se hizo con la regla de selección por parentesco, comenzaremos mostrando qué pasa si fijamos el valor de *b* mientras variamos los demás y expresamos uno de los ejes como la diferencia $b - c$.

Podemos identificar un aspecto importantes a partir de lo que apreciamos en las gráficas de la Fig. 1.5: A diferencia de la regla de selección por parentesco, aquí el valor más importante para promover la cooperación es *w*. Esto se puede observar al comparar el comportamiento de CC con los demás. Mientras el valor de *w* se aproxime cada vez más a 1, el valor de la cooperación aumentará más rápidamente.

Observemos ahora, en la Fig. 1.6, el comportamiento de CC, CD, DC y DD en gráficas de dos dimensiones. De igual forma fijaremos valores para *b* y para *c*.

Tanto en la Fig. 1.5 como en la Fig. 1.6 podemos apreciar que al llegar *w* a cierto valor crítico ($w \approx 0.5$) y al irse acercando 1, el valor de CC empieza a subir rápidamente. La altura que alcanza CC está determinada por la diferencia $b - c$.

Se puede observar que solamente existe un punto de intersección de CC con DC. Sin embargo, en el cuadro 1.4 podemos observar tres condiciones distintas para sus puntos de equilibrio (ESS, RD y AD). En la Fig. 1.8 se señala el punto de intersección de CC con DC y los valores de *w* que dan inicio a las condiciones necesarias para cada punto

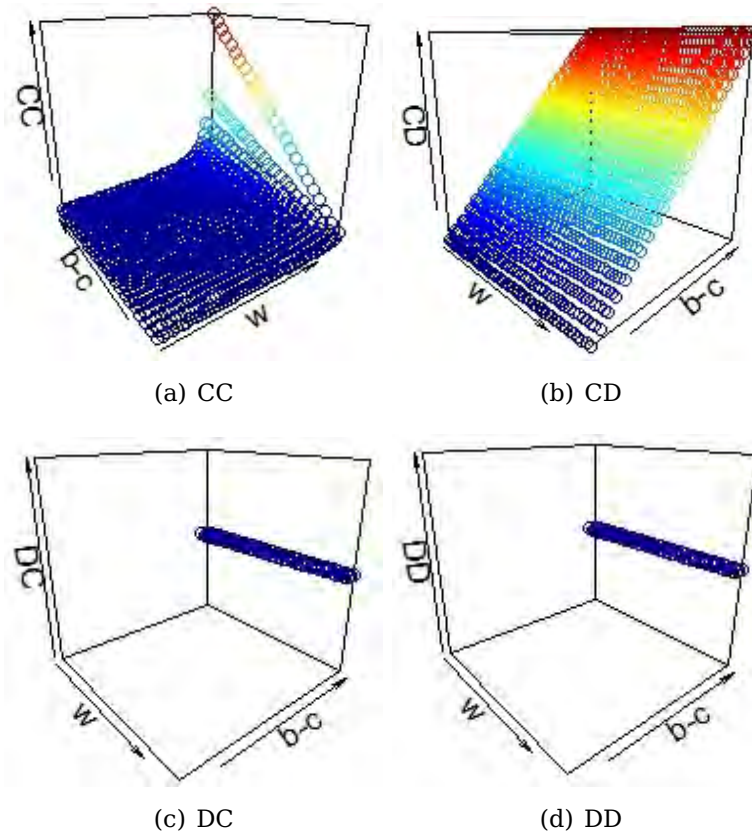
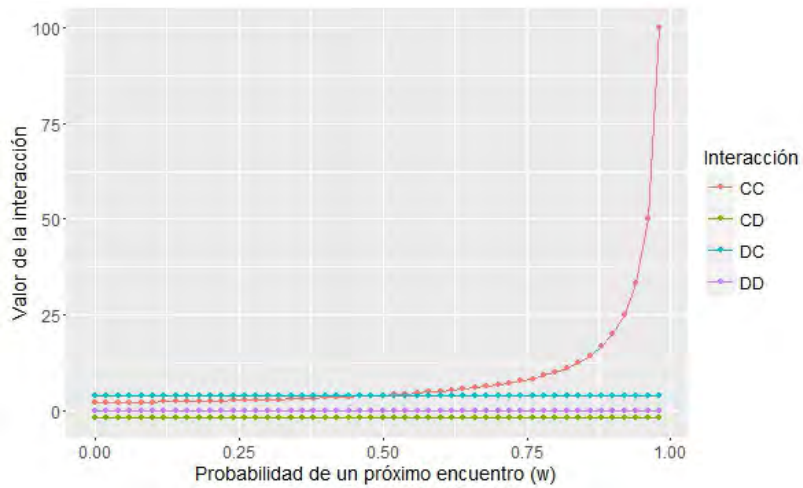
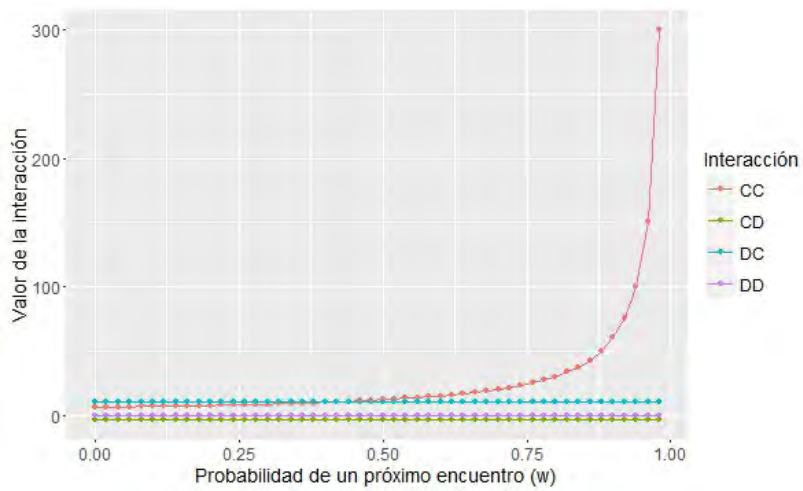


Figura 1.5: Comportamiento de la matriz de ganancias de la regla reciprocidad directa. Para poder mostrar el comportamiento en gráficas de tres dimensiones, uno de los ejes se expresa tomando solamente la diferencia positiva $b - c$. Es muy importante hacer notar que el origen de las gráficas no necesariamente coincide con el punto $(0,0,0)$ dando como resultado que DC y DD tengan el mismo comportamiento pero sobre valores diferentes.

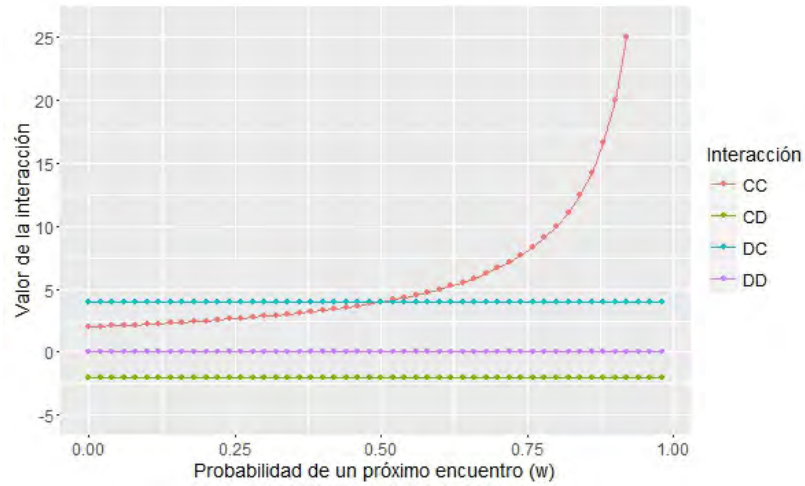


(a) Reciprocidad directa $b=4, c=2$

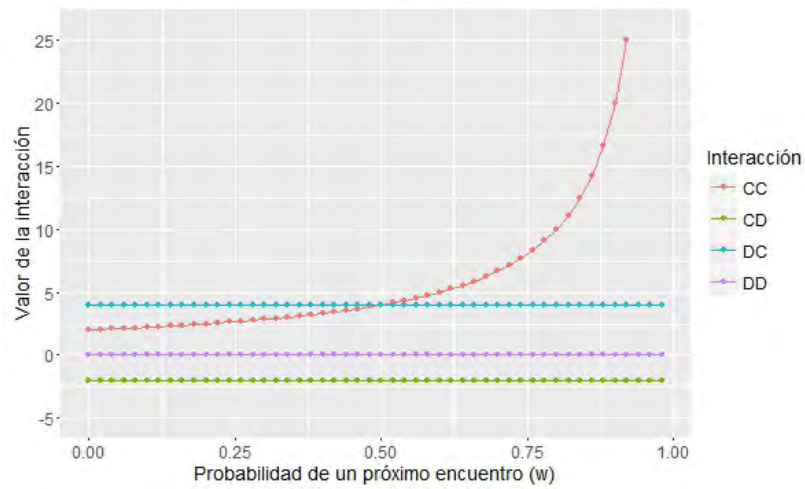


(b) Reciprocidad directa $b=10, c=4$

Figura 1.6: Ejemplos del comportamiento de la matriz de pago de la regla de reciprocidad directa con valores fijos para b y c . (a) Fijamos $b=4$ y $c=2$ mientras variamos el valor de w . (b) Fijamos $b=10$ y $c=4$ mientras variamos el valor de w .



(a) Reciprocidad directa $b=4,c=2$



(b) Reciprocidad directa $b=10,c=4$

Figura 1.7: Acercamiento a la secciones críticas de las gráficas que aparecen en la Fig. 1.6. (a) Fijamos $b=4$ y $c=2$ mientras variamos el valor de w . (b) Fijamos $b=10$ y $c=4$ mientras variamos el valor de w .

de equilibrio considerando $b = 4$ y $c = 2$. Una vez que $w = 0.5$, se pasa de condiciones del dilema del prisionero a condiciones de la caza invernal del ciervo (Apéndice B). Dichas condiciones siguen favoreciendo a los desertores pues $CC = DC$ pero CD sigue siendo el peor caso por lo que, si coopero, a lo más puedo alcanzar la misma ganancia que DC pero si el otro jugador no coopera obtendré la peor ganancia. Una vez que $w > 0.5$ se pasa a condiciones de la caza del siervo, juego que promueve la cooperación mutua sobre las demás posibilidades de acción. Estas condiciones de juego se mantienen para el resto de valores de w . ¿Entonces por qué existen tres condiciones diferentes para ESS, RD y AD?. La respuesta la encontramos en la expresión que indica la ganancia para el caso CC . En la sección en que se cumple la condición para ESS pero no se cumplen las demás tenemos que $0.5 < w < 0.6667$. Esto genera valores para CC tales que $4 < CC < 6.0006$. Si los comparamos contra DC ($DC = b = 4$ para este caso) veremos que no existe mucha diferencia; sobre todo si observamos que el rango de valores para w que corresponde a RD es tal que $0.6667 \leq w \leq 0.75$ y genera que $6.0006 \leq CC \leq 8$. Se observa que para este caso $b - c = 6$ y $2b = 8$. Esto quiere decir que para todo el rango de valores que cumplen con la condición de RD arriesgarse a intentar obtener CC podría pagar más que hacer el intento y no lograrlo ($CD = b - c = 6 < CC = 6.0006$). Para los casos más altos de w que cumplen con las condiciones de RD, tenemos que al intentar obtener CC podríamos ganar el doble que DC (la siguiente mejor paga en la matriz de ganancias). Para el rango de valores de w que cumplen con la condición de AD tenemos que los valores de CC empiezan a subir de tal manera que rápidamente la diferencia entre los valores de DC , DD y CD comienza a perderse. Si $CC = 100$ entonces podríamos pensar que $DC \approx DD \approx CD$ ($100 > 4 \approx 0 \approx -2$) favoreciendo en gran medida el intentar alcanzar CC .

Interés en la regla de reciprocidad directa

La regla de reciprocidad directa parecería tener poca utilidad considerando la probabilidad que existe de que dos conductores se encuentren interactuando continuamente. La única situación imaginable sería pensar en circunstancias de tráfico con alta densidad (embotellamientos). Sin embargo, podemos ir un poco más allá y pensar en las interacciones SCT-vehículo. ¿Cuántas veces debe ser multado un conductor para que éste aprenda que es mejor seguir las reglamentaciones viales

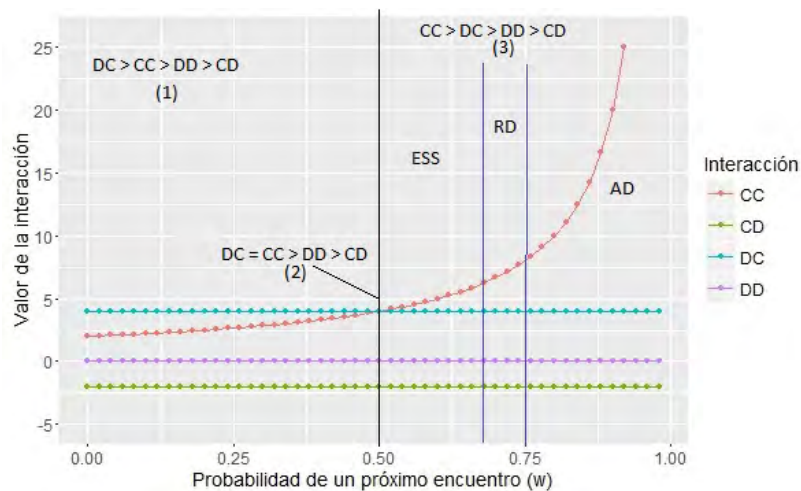


Figura 1.8: Condiciones de juegos para la regla de reciprocidad directa con $b = 4$, $c = 2$, diferentes valores de r y acercamiento a la intersección de CC con DC. (1) Dilema del prisionero, (2) La caza invernal del ciervo, (3) La caza del ciervo. ESS está dada por $0.5 < w < 0.6667$, RD corresponde a los valores $0.6667 \leq w \leq 0.75$ y AD se origina cuando $0.75 < w < 1$.

a romperlas? ¿A qué porcentaje de conductores se debe sancionar para promover el cumplimiento de las reglas viales en toda una población? Un modelo de tráfico vehicular que incorpore esta regla de reciprocidad directa podría dar respuesta a este tipo de preguntas.

1.3.4. Reciprocidad indirecta

En (Nowak, 2006) podemos encontrar que la regla de reciprocidad indirecta tiene la intención de incluir algunos aspectos que la regla de reciprocidad directa deja fuera. Como se discutía en la sección 1.3.3 donde hablamos del interés hacia la regla de reciprocidad directa, las circunstancias que dos personas puedan estar interactuando frecuentemente no siempre se dan. Además para que la regla de reciprocidad directa pueda funcionar en estos encuentros, ambos participantes deben estar en circunstancias de poder ayudar; lo único que cambia entre un cooperador y un desertor es que el desertor, aunque está en posibilidades de ayudar, decide no hacerlo. Para poder incluir interacciones asimétricas (un participante está en condiciones de ayudar y el otro no) e inconstantes (la probabilidad de un próximo encuentro es muy baja)

esta regla hace uso de la reputación. Esto quiere decir que si un agente coopera y es visto por una cierta fracción de la población, a ojos de ésta ese agente tendrá una reputación de cooperador. Aunque la reciprocidad indirecta podría incluir una gran cantidad de elementos a considerar, se nos proporciona un modelo expresado en términos de la teoría de juegos evolutiva en el cuadro 1.5.

Matriz de ganancias			ESS	RD	AD	Variables
	C	D	$\frac{b}{c} > \frac{1}{q}$	$\frac{b}{c} > \frac{2-q}{q}$	$\frac{b}{c} > \frac{3-2q}{q}$	b =beneficio c =costo q =probabilidad de conocimiento social
C	$b - c$	$-c(1 - q)$				
D	$b(1 - q)$	0				

Cuadro 1.5: Regla reciprocidad indirecta presentada como un modelo de teoría de juegos evolucionaria

La forma de modelar esta regla en (Nowak, 2006) consiste en que al establecerse una interacción entre dos jugadores, los desertores siempre elegirán no cooperar mientras que los cooperadores cooperarán con aquellos otros jugadores que identifiquen como cooperadores y desertarán con aquellos jugadores que identifiquen como desertores. Al interactuar un cooperador con un desertor, el cooperador será capaz de reconocer al desertor con una probabilidad de $1 - q$. En el caso de que el reconocimiento falle, el cooperador tratará al desertor como si fuera un cooperador.

Se puede apreciar que esta regla tiene condiciones, para sus puntos de equilibrio, muy parecidas a los de la regla de reciprocidad directa. Para observar si el comportamiento de sus casillas (CC, CD, DC y DD) también son parecidos colocamos diferentes valores en sus variables.

Al igual que con las dos reglas anteriores, mostramos qué pasa si se fijan valores en b y variamos las demás mostrando uno de los ejes como la diferencia $b - c$.

En la Fig. 1.9 se puede observar que el comportamiento que tienen las funciones que determinan las ganancias no tienen similitud con las dos reglas anteriores (salvo DD). En el caso de CC podemos notar una gran dependencia del valor de $b - c$. Esto es de esperarse si ponemos atención a la casilla CC del cuadro 1.5. El caso contrario lo podemos ver en la gráfica correspondiente a DC. En ésta, el valor de $b - c$ no tiene relevancia. De nuevo, esto no es extrañar si vemos que se está

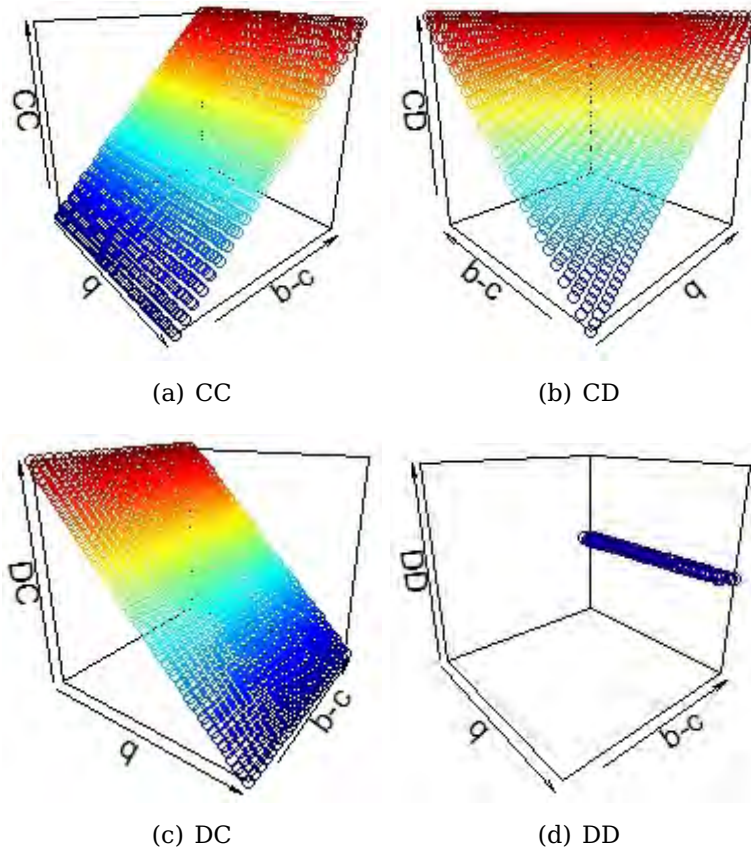


Figura 1.9: Comportamiento de la matriz de ganancias de la regla reciprocidad indirecta. Para poder mostrar el comportamiento en gráficas de tres dimensiones, uno de los ejes se expresa tomando solamente la diferencia positiva $b - c$. Es muy importante hacer notar que el origen de las gráficas no necesariamente coincide con el punto $(0,0,0)$.

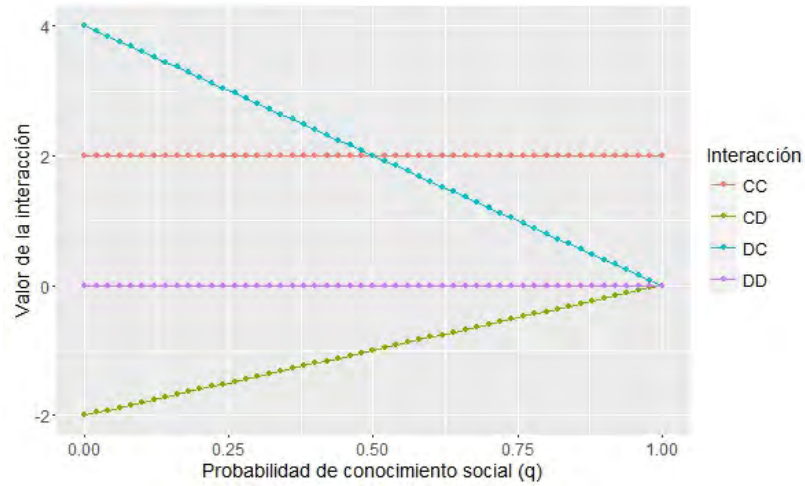
graficando la función $b(1 - q)$ de la casilla correspondiente. Finalmente la gráfica de CD denota una influencia de ambas tanto de q como de la diferencia $b - c$.

En la Fig. 1.10 podemos estudiar el comportamiento de CC, CD, DC y DD en gráficas de dos dimensiones. Para estas gráficas fijamos valores para b y para c mientras variamos q .

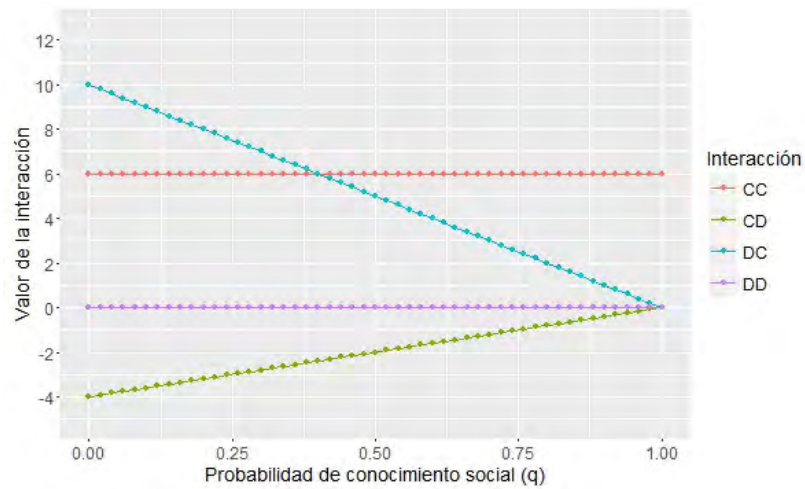
En ambas gráficas de la Fig. 1.10 se pueden observar dos puntos de intersección (en cada una). Uno de ellos es DC con CC y el segundo incluye los valores de DC, DD y CD. Es importante mencionar que a pesar de que el comportamiento que siguen los valores CC, CD, DC y DD son muy distintos a los de la regla de reciprocidad directa, las condiciones para sus puntos de equilibrio sí son semejantes. En la Fig. 1.11 se encuentran indicadas las diferentes condiciones de juego que se presentan al variar q .

En la Fig. 1.11 se pueden apreciar condiciones para cuatro juegos diferentes. En la primera parte ($0 \leq q < 0.5$) tenemos condiciones del juego conocido como el dilema del prisionero. Justo cuando $q = 0.5$ tenemos condiciones de la caza invernal del ciervo, este juego empieza a promover la cooperación mutua pero aún castiga severamente la cooperación cuando el otro jugador detracta (CD). Para los valores tales que $0.5 < q < 1$ tendremos condiciones de la caza del ciervo, éste promueve la cooperación mutua antes que detractar con un cooperador (DC) lo que un poco menos probable que un jugador obtenga la peor paga (CD), pues si yo coopero tengo posibilidades de obtener la mejor paga mientras que si detractó aseguro no tener acceso a dicha ganancia. Finalmente cuando $q = 1$ tenemos que la única forma de obtener una ganancia es mediante la cooperación mutua es decir tenemos condiciones del juego Cooperación mutua o perder C.

Observamos que al igual que en la regla de reciprocidad directa tenemos las mismas condiciones para los juegos que se presentan al variar w y q respectivamente. Esto nos da indicios de por qué se generan las mismas condiciones para los puntos de equilibrio ESS, RD y AD. Recordemos que en el caso de reciprocidad directa (Fig. 1.8), para el caso en que $b = 4$ y $c = 2$, cuando $0.5 < w$ tenemos que CC empieza a incrementar su valor de manera exponencial. Si observamos la Fig. 1.11 veremos que, para el caso en que $b = 4$ y $c = 2$, tener $0.5 < q$ hace que CC mantenga su valor mientras DC y CD empiezan a parecerse; finalmente sin importar el valor de b y c siempre tendremos que $DD = 0$.



(a) Reciprocidad indirecta $b=4, c=2$



(b) Reciprocidad indirecta $b=10, c=4$

Figura 1.10: Ejemplos del comportamiento de la matriz de pago de la regla de reciprocidad indirecta con valores fijos para b y c . (a) Fijamos $b=4$ y $c=2$ mientras variamos el valor de q . (b) Fijamos $b=10$ y $c=4$ mientras variamos el valor de q .

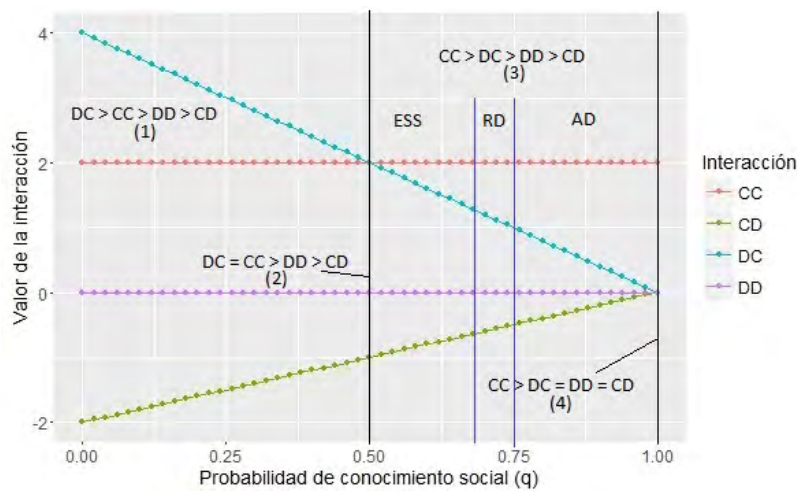


Figura 1.11: Condiciones de juegos para la regla de reciprocidad indirecta con $b = 4$, $c = 2$ y diferentes valores de q . (1) Dilema del prisionero, (2) La caza invernal del ciervo, (3) La caza del ciervo, (4) Cooperación mutua o perder. Una ESS está dada por $0.5 < q < 0.6667$, RD corresponde a los valores $0.6667 \leq q \leq 0.75$ y AD se origina cuando $0.75 < q \leq 1$.

De esta forma tenemos que para ambas reglas, reciprocidad directa y reciprocidad indirecta, al tener que $\frac{b}{c} > \frac{1}{x}$ (donde $x = w$ o $x = q$ según corresponda) y al ir aumentando el valor de x los valores de DC, DD y CD se irán aproximando de tal forma que: para el caso de reciprocidad indirecta CC se vuelve tan alto que genera $CC > DC \approx DD \approx CD$ y para el caso de reciprocidad indirecta los valores de DC y CD se van acercando al valor de DD hasta que se cumple $CC > DC = DD = CD$. De esta forma tenemos que mientras el valor de x genera valores tales que $CC \approx DC > DD > CD$, tendremos que la cooperación logra sobrevivir, es decir, tenemos condiciones para una ESS. Al tener valores de x tales que $CC > DC > DD > CD$ los cooperadores empiezan a ganar terreno a los desertores generándose así condiciones para RD y al tener valores de x tales que $CC > DC \approx DD \approx CD$ tendremos que la población es en su mayoría cooperadora (condiciones para AD).

Interés en la regla de reciprocidad indirecta

En un principio podría parecer que la regla de reciprocidad indirecta presenta casi las mismas limitaciones que la regla de reciprocidad directa, si pensamos en un contexto de tráfico vehicular. Sin embargo,

al conducir es más probable que encontremos situaciones en las que a partir de observar el comportamiento que un conductor tiene con los demás podamos deducir el tipo de interacción que tendrá con nosotros y actuar de la forma más conveniente para mejorar nuestras condiciones de seguridad o de desplazamiento. La situación antes descrita se puede modelar utilizando esta regla. Otro punto importante que se tomó en cuenta sobre esta regla es el uso cada vez mayor que están teniendo las redes sociales. Conforme el avance tecnológico lo permita, se podría llegar a pensar en una red social que tome en cuenta nuestros vehículos y la forma en como se desempeñan los conductores de tal forma que podríamos llegar a conocer la reputación de un conductor por medio de las calificaciones de los demás conductores. Esto podría hacer que los conductores más descuidados o agresivos empezarán a cambiar su forma de conducir para mejorar su reputación en las vías.

1.4. Evolución de la cooperación mediante propagación social

En la sección anterior se han explicado y revisado tres reglas que podrían ser utilizadas para modelar algunos comportamientos observados en el tráfico vehicular. Sin embargo, existe una limitante importante que nos exige realizar modificaciones para que podamos utilizar las reglas revisadas anteriormente(1.3.2, 1.3.3 y 1.3.4).

1.4.1. De selección natural a propagación social

En los modelos tratados en (Nowak, 2006) los agentes siguen acciones que semejan las etapas de un ciclo biológico, es decir, los agentes nacen, se desarrollan, tienen descendencia y finalmente mueren. Los agentes nacen siendo cooperadores o desertores y permanecen de esta forma hasta que mueren. En la etapa que podríamos etiquetar como desarrollo, los agentes se encuentran interactuando con otros agentes. En cada una de estas interacciones toma lugar un juego entre dos participantes. En estos juegos los participantes actuarán de acuerdo con el fenotipo (cooperador o desertor) con el que nacieron. Resultante de estos juegos los agentes tendrán ganancias o pérdidas que modificarán la aptitud de los agentes para sobrevivir en su medio ambiente. Existen dos maneras de determinar en qué momento un agente se reproduce:

un agente se reproduce al alcanzar una cierta edad (número de iteraciones de su ciclo de vida, por ejemplo) o bien, un agente se reproduce al alcanzar un cierto nivel de aptitud (generalmente esto implica una pérdida de aptitud). En cuanto a la forma en como un agente se reproduce, se puede pensar en asexual (al alcanzar cierta edad o aptitud se crea otro agente) o de forma sexual (se requiere la interacción de dos agentes). De ambas formas la reproducción asexual es la más usada en este tipo de modelos porque es más fácil de implementar que la sexual. Al reproducirse, el nuevo agente heredará el fenotipo de su progenitor con cierta probabilidad de mutar y cambiar al otro fenotipo. La forma de determinar el momento en que un agente muere a menudo radica en alcanzar una cierta edad o al alcanzar un umbral (bajo) de aptitud. Incluso puede pensarse en una implementación que tome en cuenta ambas opciones.

Si se observa el tráfico vehicular, puede resultar difícil de pensar cómo ajustar el ciclo de vida de los agentes para que pueda aplicarse a vehículos moviéndose a través de una vía. Resultaría más natural pensar en agentes que, dependiendo del comportamiento de los demás agentes que se encuentran en su medio ambiente, se puedan ir adaptando y decidir si es más conveniente ser cooperador o desertor. Esta idea no es nueva y en (Nowak, 2006) se menciona que ha sido aplicada en forma de estrategias para determinar cuál de ellas deja más ganancias al estar participando iterativamente en un juego (el Dilema del prisionero es el juego más estudiado bajo esta perspectiva).

Modelar interacciones de tráfico vehicular con agentes que interactúan entre ellos mediante ciclos de vida no es imposible. Por cuestiones de practicidad y para hacer un poco más natural el enfoque del modelo al que deseamos llegar, desarrollamos un marco de trabajo que permita implementar tres de las cinco reglas de Nowak en términos de agentes que se adaptan al comportamiento de una población constante. Queremos desarrollar este proceso de adaptación como un proceso de evolución de la cooperación mediante propagación cultural.

Dicho proceso debe cumplir con las siguientes premisas y condiciones:

- **Población constante:** el número de agentes en los modelos implementados debe permanecer constante. De esta forma se excluyen nacimientos y muertes.

- **Agentes adaptables:** los agentes deben decidir entre ser cooperadores o desertores en función de aquello que les sea más conveniente (maximizar o minimizar ganancias) tomando en cuenta sus interacciones con los demás agentes en la población.
- **Agentes móviles:** los agentes deben ser capaces de interactuar con otros agentes mientras se van desplazando por una superficie virtual.
- **Juegos en parejas:** las interacciones de los agentes estarán especificadas por un modelo de teoría de juegos en el cual solamente puedan estar participando dos agentes.
- **Interacciones con vecinos:** los participantes de un juego deberán tener una localización cercana entre ellos. Se puede pensar en un área umbral de juego para cada agente; los demás agentes que estén fuera de esa área no podrán ser considerados como parejas de juego.
- **Juegos simultáneos:** una vez que los agentes hayan identificado una pareja de juego viable, la implementación debe considerar que los juegos se estén llevando de forma simultánea.
- **Participación excluyente:** los agentes sólo podrán participar en un juego a la vez. Una vez que un agente está considerado como compañero de juego no podrá participar con ningún otro agente.
- **Participación poblacional incompleta:** debido a las condiciones impuestas para que sólo haya interacciones entre vecinos, puede darse el caso de que uno o más agentes de la población no encuentren parejas de juego. Esto estará permitido y esos agentes no tendrán interacciones.
- **Pertenencia difusa:** en situaciones cotidianas un cooperador no siempre cooperará, es decir, habrá situaciones o condiciones bajo las cuales aunque quiera cooperar no podrá hacerlo (esta es una de las razones por las que en (Nowak, 2006) se plantea el uso de la reciprocidad indirecta). El modelo propuesto debe ser capaz de representar tal situación.

1.4.2. Marco de trabajo propuesto

Los modelos que utilicen el marco de trabajo propuesto deberán tener una población constante (n) de agentes, es decir, esta población no podrá incrementarse ni disminuirse durante el tiempo. Cada agente tendrá una variable (p_c) que indica su grado de apego a comportarse como un cooperador. Esta variable toma valores dentro del conjunto $[0.01, \dots, 0.99]$. Los valores $p_c = 0$ y $p_c = 1$ no son tomados en cuenta porque provocan que los agentes queden fijos como desertores ($p_c = 0$) o como cooperadores ($p_c = 1$) evitando que los agentes tengan la habilidad de adaptarse al comportamiento de los demás.

Utilizando el valor de p_c podemos etiquetar a los agentes como cooperadores o como desertores. Aquellos agentes con $p_c > 0.5$ serán considerados cooperadores y aquellos con $p_c \leq 0.5$ serán considerados como desertores. De esta forma pasamos la categorización de los agentes (cooperador o desertor) a un enfoque de lógica difusa (Zadeh, 1965) con funciones de pertenencia que pueden observarse en la Fig. 1.12. Con esta conceptualización de pertenencia buscamos que los agentes tengan un comportamiento muy similar al descrito en el modelo de Pareo de centavos (matching pennies) de Skyrms (Skyrms, 1990).

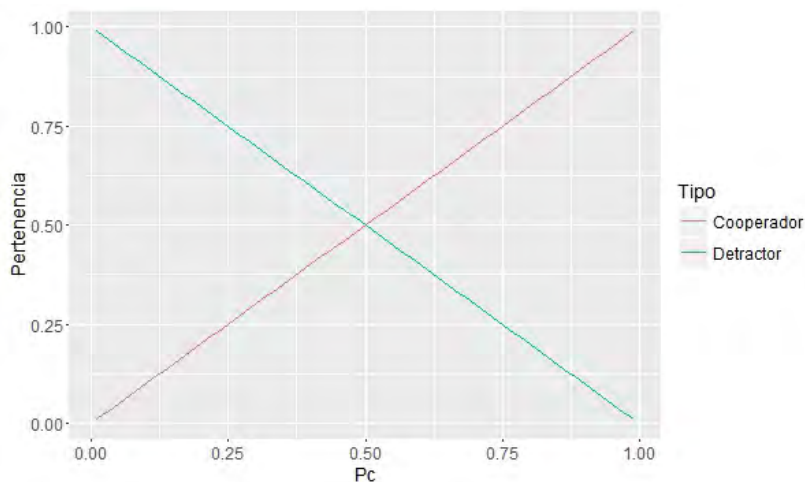


Figura 1.12: Función de pertenencia de los agentes para determinar si son cooperadores o desertores.

Para generar las condiciones iniciales de estos modelos es necesario especificar el número inicial de agentes que serán cooperadores (in_c), el número inicial de agentes que serán desertores (in_d) y el valor inicial

de p_c tanto para cooperadores (ip_cC) como para desertores (ip_cD). Las condiciones iniciales deben cumplir que $in_c + in_d = n$.

Aunque se podría pensar que $ip_cC + ip_cD \approx 1$ también sea una condición necesaria, esto no es así, ya que debemos recordar que el valor de p_c es individual a cada agente. Aunque al inicializar el modelo todos los cooperadores compartan $p_c = ip_cC$, en los pasos de tiempo subsecuentes lo más probable es que esto deje de ser así.

Con el objetivo de evitar posibles confusiones haremos la siguiente aclaración. Si pensamos en el valor de p_c para un determinado agente i , es decir $p_c(i)$, estaremos hablando del apego que tiene el agente i a comportarse de manera cooperadora. Si pensamos en $1 - p_c(i)$, estaremos hablando del apego que tiene el agente i de comportarse como un desertor. Podríamos etiquetar a este apego de comportarse de manera desertora como p_d , y esto llevaría a que debe cumplirse que $p_d = 1 - p_c$ y $p_c = 1 - p_d$. Sin embargo, para mantener las explicaciones en términos más simples evitaremos hablar de p_d y hacer toda la especificación del marco de trabajo en términos de p_c .

Como ya hemos explicado anteriormente, nuestra meta es que los agentes interactúen al irse desplazando sobre una superficie. Esto puede implementarse sobre distintas plataformas y para este trabajo se utilizó la plataforma Netlogo (Wilensky, 1999) que nos proporciona todos los elementos básicos para cumplir con esta condición (Fig.1.13).

Los agentes cuentan con una variable llamada *aptitud* (de forma similar a los modelos de (Nowak, 2006)) donde almacenarán las ganancias y de donde sustraerán las pérdidas resultado de los juegos en los que participen. Una unidad de tiempo de los modelos que implementen este marco de trabajo equivaldrá a un segundo y consistirá en que cada uno de los agentes de la población (n) ejecute una iteración completa de las siguientes acciones:

- **Deambular:** implica que los agentes se muevan aleatoria o semialeatoriamente a través de la superficie. Para este trabajo se optó por que los agentes se movieran semialeatoriamente.
- **Identificar vecinos:** En NetLogo la superficie por la que se desplazan los agentes está conformada por celdas cuadradas (o parches). En nuestra implementación cada agente es del tamaño de una celda, por lo que al buscar vecinos, los agentes buscan otros agentes en la misma celda en la que ellos están y en las ocho celdas que rodean su posición.

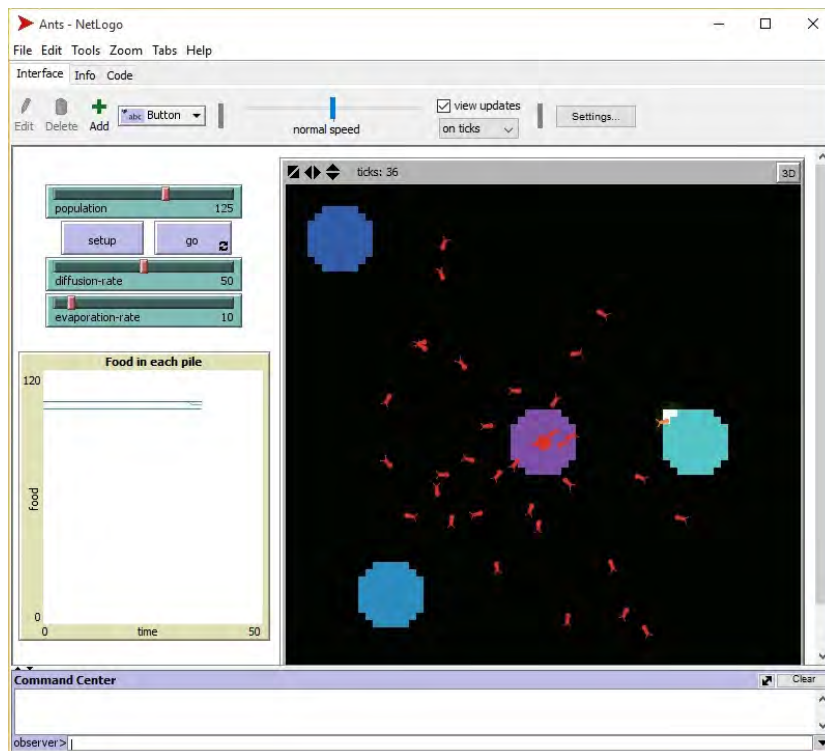


Figura 1.13: Ejemplo de cómo se ve un modelo ya implementado en Netlogo.

- **Acoplar:** se selecciona aleatoriamente a uno de los vecinos y se realizan los ajustes necesarios para que, tanto el agente en cuestión como el vecino seleccionado, queden establecidos como pareja de juego. De esta forma ningún otro agente puede elegirlos como pareja de juego.
- **Jugar:** utilizando p_c y una variable aleatoria (va) cuyo valor esté en el conjunto $[0, 0.01, 0.02, \dots, 0.98, 0.99, 1]$ los agentes determinarán si cooperarán ($va \leq p_c$) o si serán desertores ($va > p_c$).
- **Obtener consecuencias:** dependiendo de las acciones elegidas por cada pareja de jugadores, cada uno de ellos restará o sumará al valor de su *apetitud* la cantidad indicada por la matriz de pago que se esté empleando.
- **Afinar tendencia:** después de saber si sus acciones resultaron en ganancias o pérdidas, los agentes deben decidir si la tendencia

que tienen (a ser cooperador o desertor) necesita algún ajuste o puede quedarse como está. Esto lo hacen modificando el valor de p_c .

Afinación de la tendencia

Una de las partes más críticas del marco de trabajo es la forma en cómo los agentes ajustan la tendencia que tienen a ser cooperadores o desertores. Este ajuste debe permitirles a los agentes adaptarse a su medio ambiente social. En la literatura existen diversas formas de realizar este ajuste (Axelrod, 1984; Santos et al., 2006; Skyrms, 1990). Estas técnicas de ajuste podrían denominarse como exógenas pues suelen definir el ajuste mediante factores externos al agente, por ejemplo: la cantidad de vecinos cooperadores que tiene un agente, valores de ganancias del compañero de juego, ganancias de todos los demás agentes, entre otras. Para este trabajo se optó por utilizar dos formas de realizar este ajuste que nos dieron buenos resultados que están basados en características internas del agente, es decir, endógenas:

- **Afinación por aptitud:** los agentes se centran en su propia *aptitud* para determinar el ajuste que debe realizar. Si el agente coopera o detracta y su *aptitud* se incrementa, entonces incrementará también la posibilidad de cooperar o detractar según corresponda. Si su *aptitud* decrece, el agente también decrementará la probabilidad de cooperar o detractar, según corresponda. En caso de que no existan cambios en la *aptitud* del agente, tampoco habrá cambios su p_c .
- **Afinación por ganancia:** esta técnica es similar a la anterior; la única diferencia es que los agentes se fijarán en los valores de las ganancias que obtengan en lugar de fijarse en el valor de su *aptitud* (suma de todas las ganancias obtenidas). Los agentes actúan basados en la comparación de la ganancia obtenida en el tiempo inmediato anterior ($t - 1$) y la ganancia recién obtenida (t). De esta forma si un agente coopera o detracta y la ganancia actual es superior a la ganancia inmediata anterior, el agente incrementará la probabilidad correspondiente. Si el agente coopera o detracta y la ganancia actual es menor a la ganancia anterior entonces, el agente disminuirá la probabilidad correspondiente. Si

no hay diferencia entre la ganancia anterior y la actual, no habrá modificaciones al valor de p_c .

Implementación del marco de trabajo

Para probar nuestro marco de trabajo se realizaron implementaciones en NetLogo en donde los agentes utilizan las tres reglas (Selección por Parentesco, Reciprocidad Directa y Reciprocidad Indirecta) de Nowak (Nowak, 2006) que revisamos en la sección anterior (1.2).

Estas implementaciones cuentan con varios parámetros por lo que se ejecutaron diversas simulaciones para poder determinar y reportar el impacto de cada uno ellos sobre la dinámica de los modelos. Un objetivo adicional de las simulaciones fue encontrar si existía algún conjunto de valores que generaran resultados similares, en cuanto a evolución de la cooperación, como a los presentados en (Nowak, 2006).

Los parámetros utilizados por estas implementaciones se pueden encontrar listados en el cuadro 1.6. Los valores que se colocaron en los parámetros para los diferentes análisis se pueden encontrar en el apéndice D.

Para cada regla existen algunos requerimientos que son necesarios para su funcionamiento y que no están especificados en las reglas. Estos requerimientos implícitos pueden encontrarse en el apéndice E. Los pseudocódigos donde se especifica el comportamiento que siguen los agentes de las implementaciones también pueden encontrarse en el apéndice E.

Parámetro	Descripción
Tipo de afinación de la tendencia	Dependiendo del valor elegido se usará afinación por aptitud o por ganancia.
Beneficio (b)	Cantidad, de algún recurso, que pagará un cooperador al participar en un juego.
Costo (c)	Cantidad, de algún recurso, que recibirá un jugador al participar en algún juego con un compañero cooperador.
Probabilidad cooperativa inicial de los cooperadores (ip_cC)	Define el valor de p_c de la fracción de agentes cooperadores al inicio de la simulación. Por lo tanto este valor debe cumplir: $1 > ip_cC > 0.5$

Probabilidad cooperativa inicial de los desertores (ip_cD)	Define el valor de p_c de la fracción de agentes desertores al inicio de la simulación. Por lo tanto debe cumplir: $0.5 \geq ip_cD > 0$
Población (n)	Número de agentes que estarán interactuando en la simulación
Proporción inicial de cooperadores (in_c)	Fracción de agentes cooperadores que habrá al iniciar la simulación con $p_c = ip_cC$.
Proporción inicial de desertores (in_d)	Fracción de agentes desertores que habrá al iniciar la simulación con $p_c = ip_cD$. Siempre estará definido como $in_d = n - in_c$.
Regla	Indica que regla se va a utilizar y por lo tanto que matriz de pago seguirán los agentes (selección por parentesco, reciprocidad directa o reciprocidad indirecta).
Característica clave (x)	Rasgo del que hace uso la regla para promover la cooperación. Selección por parentesco hace uso de la probabilidad de que dos agentes estén relacionados (r). Reciprocidad directa hace uso de la probabilidad de que dos agentes se puedan volver a encontrar (w). Reciprocidad indirecta hace uso de la probabilidad de que las acciones de los agentes sean conocidas por los demás (q).
Intervalo de muestreo en x	El efecto de la característica que explota cada regla se expresa mediante una probabilidad. Para explorar el efecto de esta probabilidad se toman lecturas en el rango (0,1), este parámetro indica la frecuencia de esas lecturas dentro del rango de x .

Cuadro 1.6: Lista de los parámetros utilizados por las implementaciones del marco de trabajo.

Los resultados de estas implementaciones también pueden encontrarse en (Cortés-Berruero et al., 2014) y de forma más detallada en (Cortés-Berruero et al., 2013). Para facilidad del lector los incluiremos a continuación.

Impacto de los parámetros en la dinámica del sistema

En el cuadro 1.7 se muestra el impacto que tiene cada uno de los parámetros sobre las tres reglas estudiadas. Este análisis ayudó a determinar valores para los parámetros que resultarán en un comportamiento de los puntos de equilibrio (ESS, AD y RD) similar al mostrado para las tres reglas (KS, DR e IR) en (Nowak, 2006).

Parámetro	Efecto en la Dinámica		
	Selección por Parentesco (KS)	Reciprocidad Directa (DR)	Reciprocidad Indirecta (IR)
Afinación por aptitud	La interacción entre los agentes y los demás parámetros permiten la emergencia de los comportamientos ESS, AD y RD.	No se puede apreciar un patrón distinguible.	La interacción entre los agentes y los demás parámetros permiten la emergencia de los comportamientos ESS, AD y RD.
Afinación por ganancia	Si $b/c < 1/r$ todos los jugadores serán desertores. Si $b/c > 1/r$ todos los jugadores serán cooperadores. Para ambos casos los demás parámetros son irrelevantes.	La interacción entre los agentes y los demás parámetros permiten la emergencia de los comportamientos ESS, AD y RD.	La interacción entre los agentes y los demás parámetros permiten la emergencia de los comportamientos ESS, AD y RD pero a diferencia de afinación por aptitud, estos comportamientos surgen más adelante en el rango de x .
Beneficio (b)	Indica la ganancia máxima que se puede obtener de CC. Marca el valor inicial de DC en el rango de x . Junto con x y c indica el valor que tiene CC.	Indica el valor de DC para todo el rango de x . Junto con x y c indica el valor que tiene CC.	Indica el valor inicial de DC en el rango de x . Junto con c indica el valor de CC.

Costo (c)	Indica el valor inicial de DC. Indica el valor inicial y final de CD para el rango de x . Junto con b y x indica el valor que tiene CC.	Indica el valor de CD. Marca el valor inicial de CC en el rango de x . Junto con b y x indica el valor de CC.	Indica el valor inicial de CD en el rango de x . Junto con b y x indica el valor de CC.
ip_cC	No tiene impacto relevante.	Variable generadora de ruido. Con valores altos se incrementa el ruido en los valores de x que cumplen $b/c < 1/x$.	Variable generadora de ruido. A valores más bajos, mayor ruido.
ip_cD	Variable generadora de ruido. A valores más bajos, mayor ruido.	No tiene impacto relevante.	Variable generadora de ruido. A valores más bajos, mayor ruido.
Población (n)	No tiene impacto relevante	Variable generadora de ruido. A valores más grandes, mayor ruido.	Variable generadora de ruido. A valores más pequeños, mayor ruido.
in_c	No tiene impacto relevante.	A mayores valores la fracción final de cooperadores aumenta.	A mayores valores la fracción final de cooperadores aumenta.

Cuadro 1.7: Impacto de los parámetros en cada una de las reglas estudiadas.

Puntos de equilibrio (ESS , RD y AD)

Las reglas mostradas en (Nowak, 2006) presentan ciertas condiciones bajo las cuales la población de agentes cooperadores logran sobrevivir (estrategia evolutivamente estable, ESS por sus siglas en inglés), logra superar la mitad de la población (riesgo-dominante, RD por sus siglas en inglés) o logra alcanzar dos terceras partes de la población total (ventajoso, AD por sus siglas en inglés). Después de determinar el efecto que tiene el valor de cada parámetro en la dinámica del modelo elegimos un grupo de valores (se encuentran especificado en la sección **Comportamiento** del apéndice D) que muestran resultados equiparables a los mostrados en (Nowak, 2006).

En Fig. 1.14 se muestra el comportamiento característico obtenido. Analizando los resultados obtenidos pudimos encontrar que las condiciones para ESS, RD y AD se mantienen pero, para observar su efecto se debe iniciar respectivamente la población de cooperadores como $2/3$, $1/2$ ó $1/3$ de la población total y obtener una gráfica similar a la

mostrada en la Fig. 1.14 .

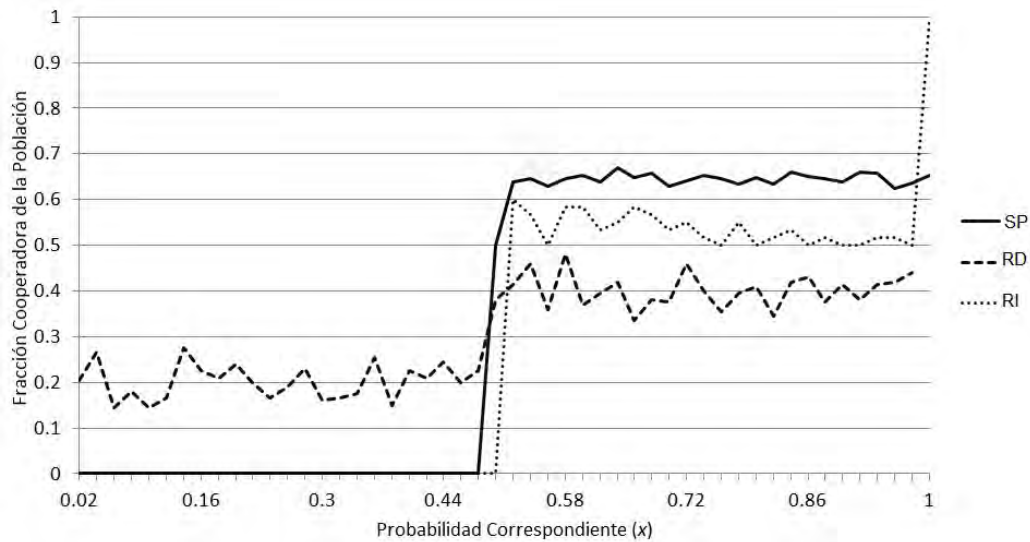


Figura 1.14: Ejemplo del comportamiento característico que tienen las implementaciones del marco de trabajo.

1.5. Conclusiones del capítulo

Hasta este punto contamos con un marco de trabajo que consta de una población de agentes capaces de adaptarse a su medio ambiente social (en términos de cooperación). Para lograr adaptarse, los agentes son capaces de elegir la frecuencia con que cooperarán o desertarán durante la serie de juegos iterados de los que constará una simulación. Los agentes adaptan esta frecuencia de acuerdo con las ganancias o pérdidas individuales que ellos vayan obteniendo de los juegos. Dentro de los modelos que implementan este marco de trabajo existen variables que modifican las condiciones de las matrices de pago con las que agentes están interactuando. Por la estructura de dichas matrices (Nowak, 2006), pequeños cambios en las variables antes mencionadas crean condiciones de juego diferentes. Esto significa que para cada valor de dichas variables corresponden matrices de pago que podemos identificar como un juego en particular, por ejemplo: el dilema del prisionero. Pero a cada valor corresponderá, por ejemplo, un dilema del prisionero con condiciones diferentes a las generadas por otro valor

determinado. El impacto de dichas variables sobre las matrices de pago es tal que incluso pueden cambiar de juego completamente, es decir, se puede pasar del dilema del prisionero a la caza del ciervo tan solo modificando el valor de dichas variables. A pesar de estos cambios a las condiciones de juego, los agentes son capaces de adaptarse. Los resultados fueron presentados en el International Workshop on Self-Organizing Systems (IWSOS) 2013 y publicados en [Cortés-Berrueco et al. \(2014\)](#).

En los siguientes capítulos detallaremos un modelo de tráfico vehicular para, posteriormente, explicar cómo aplicar este marco de trabajo de agentes cooperativos al modelo de tráfico vehicular y poder realizar estudios de evolución de la cooperación en diferentes escenarios de tráfico vehicular.

Capítulo 2

Modelos de tráfico vehicular

En este capítulo se realizará una breve introducción a los modelos de tráfico vehicular basados en autómatas celulares (modelos matemáticos para sistemas dinámicos que evolucionan en pasos discretos que generalmente constan de un conjunto de celdas que tienen un conjunto finito de estados. La evolución de un autómata consiste en un procedimiento que modifica el estado de las celdas. Estos procedimientos generalmente toman en cuenta a algunas, o todas, las celdas vecinas de la celda que se está modificando). Se explicará con detalle el modelo al cual aplicaremos el marco de trabajo expuesto en el primer capítulo. Finalmente se expondrá el proceso realizado para cambiar dicho modelo del paradigma en que fue fundamentado, autómatas celulares, a la modelación basada en agentes.

Para poder crear un marco de trabajo que nos permita estudiar el impacto que tienen las decisiones tomadas por los conductores en un escenario determinado de tráfico vehicular, es necesario implementar un modelo de tráfico vehicular. Para poder determinar qué modelo de tráfico vehicular es el más adecuado para fundamentar nuestro modelo de comportamiento, realizamos una investigación exhaustiva entre los modelos existentes. Existen muchos modelos de tráfico vehicular y pueden catalogarse de diversas formas ([Helbing, 2001](#)). Una de las formas más aceptadas para clasificar los modelos de tráfico vehicular es agrupándolos de acuerdo a su nivel de detalle como macroscópicos o microscópicos. Siguiendo esta clasificación los modelos macroscópicos son aquellos en donde se considera al conjunto de vehículos como una sola entidad. Ya sea como partículas de un fluido (vehículos) corriendo a través de una tubería (carretera) ([Helbing, 2001](#)) o como participan-

te de un juego con la autoridad (Zhang et al., 2010). Los modelos microscópicos representan a cada vehículo como una entidad individual (Brackstone y McDonald, 1999).

Como pretendemos modelar y estudiar las interacciones a nivel de los conductores, lo más apropiado será utilizar un modelo de nivel microscópico. Después de realizar un revisión de varios modelos, se decidió utilizar un modelo de tráfico vehicular basado en el paradigma de autómatas celulares que es capaz de representar una carretera de dos carriles en la que los vehículos son capaces de realizar cambios de carriles. En este modelo se toman en cuenta distancias seguras entre vehículos basadas en sus velocidades relativas, cambios de carril basados en las distancia seguras, aceleración retardada (pequeño retraso que sufren aquellos vehículos que están casi detenidos) y tasas de aceleración/desaceleración realistas (por ejemplo, no hay desaceleraciones de 50 km/h a 0 km/h en un segundo). El modelo al que nos referimos se presentó en (Guzmán et al., 2015) y de aquí en adelante nos referiremos a este modelo como modelo GLAI.

2.1. Revisión a la historia del modelo GLAI

No es materia de este trabajo mostrar una revisión exhaustiva de los diversos modelos de tráfico vehicular. En gran parte esto se debe a que ya existen revisiones exhaustivas publicadas y que pueden considerarse actuales (Guzmán, 2012; Helbing, 2001). Se recomienda ampliamente al lector la lecturas de estas revisiones.

Para comodidad del lector en esta sección se presentarán dos modelos que fueron fundamentales en la creación del modelo GLAI.

2.1.1. Modelo Nagel-Schreckenberg

El modelo Nagel-Schreckenberg (Na-Sch) (Nagel y Schreckenberg, 1992) cobra gran relevancia por ser el primer modelo de tráfico vehicular basado en el paradigma de los autómatas celulares. Este paradigma es muy útil debido a que los autómatas celulares discretizan tanto el tiempo como el espacio. Esto hace que las variables de estado que se utilicen también deban discretizarse, permitiendo así que sus valores puedan convertirse fácilmente a valores de datos reales. Otra ventaja del uso de autómatas celulares es su eficiencia computacional, que

permite realizar simulaciones masivas a bajo costo computacional.

El modelo Na-Sch utiliza un autómata celular estocástico para reproducir el diagrama fundamental del tráfico real. El modelo Na-Sch consta de una población de N vehículos que se encuentran circulando sobre una carretera de longitud L . La carretera se representa mediante un arreglo unidimensional de L celdas. Este arreglo puede ser circular dando como resultado una carretera con condiciones de frontera periódica (cuando un vehículo llega a la última celda del arreglo la siguiente celda sería la primer celda del arreglo). Se considera que cada celda tiene un espacio suficiente para albergar a un vehículo más el espacio que debe dejar dicho vehículo con respecto al vehículo que se encuentra delante de él (aproximadamente 7.5 m). Cada celda puede estar vacía u ocupada por un vehículo. Cada vehículo se encuentra viajando a una velocidad v que toma valores $v = 0, 1, \dots, v_{max}$. La variable v_{max} corresponde a la velocidad máxima en *celdas/segundo* (Fig. 2.1).

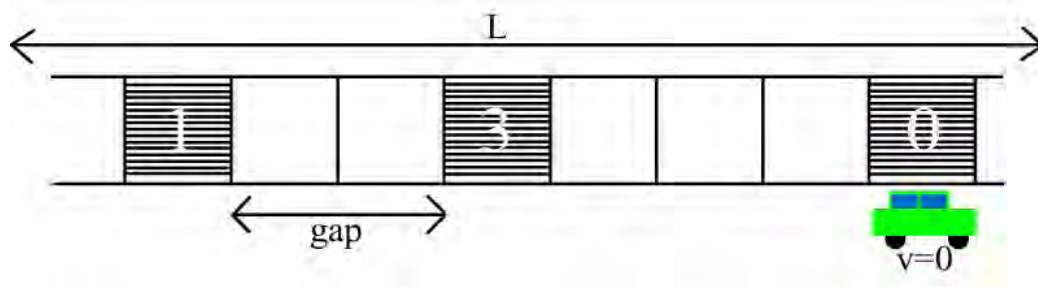


Figura 2.1: Ejemplo de una sección de la carretera del modelo Na-Sch. Cada celda puede estar vacía u ocupada por un vehículo con velocidad discreta. Los valores de velocidad van de 0 a una velocidad máxima.

En el modelo Na-Sch el tiempo es discreto. Cada paso de tiempo (Δt) corresponde a un segundo. Si consideramos la longitud típica de una celda como Δx y los pasos de tiempo son de $t \rightarrow t + 1$, un vehículo moviéndose en un paso de tiempo a la celda vecina siguiendo la dirección del flujo vehicular tendría una velocidad $v = 1$ y esto correspondería a 27 km/h. La velocidad máxima utilizada originalmente fue $v = 5$ (135 km/h).

Para obtener la distancia (en celdas) que hay entre un vehículo y el vehículo que tiene enfrente (esta distancia es conocida como espaciamiento entre vehículos o *gap*), se utiliza la expresión: $d_i = x_p - x_i - 1$. La variable x_p corresponde a la posición del vehículo que precede al vehículo i y x_i corresponde a la posición del vehículo i .

Para transitar de un tiempo a otro cada vehículo debe ejecutar cada una de las siguientes reglas (cada una debe ejecutarse por cada uno de los N vehículos de forma paralela, es decir, al mismo tiempo):

R1: Aceleración

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

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

R2: Desaceleración

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

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

R3: Desaceleración aleatoria

Si $v_i > 0$, la velocidad del vehículo i se decrementará en una unidad con probabilidad R .

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

R4: Movimiento

Cada vehículo se desplaza hacia adelante el número de celdas indicada por la velocidad resultante de ejecutar las tres reglas anteriores.

$$x_i \rightarrow x_i + v_i$$

Breve explicación de las reglas

R1: Cada uno de los vehículos pretenderá ir lo más rápido que le sea posible, sin exceder la velocidad máxima.

R2: Esta regla es la encargada de prevenir alcances entre los vehículos.

R3: Permite modelar diferentes patrones de desempeño de los conductores. Da como resultado la aceleración no determinista de los vehículos permitiendo así modelar la formación espontánea de embotellamientos.

R4: Esta regla es la encargada de manifestar el efecto de las tres reglas anteriores sobre las celdas del autómata celular.

Parámetros del modelo Na-Sch

Los parámetros requeridos por este modelo pueden encontrarse a continuación (Cuadro 2.1):

Parámetro	Descripción
v_{max}	Velocidad máxima que pueden alcanzar los vehículos.
R	Probabilidad empleada en la determinación de la desaceleración aleatoria.
Densidad (ρ)	Densidad global. Cantidad de celdas ocupadas entre el número total de celdas.

Cuadro 2.1: Lista de parámetros utilizados por el modelo Na-Sch.

Alcance del modelo Na-Sch

El modelo Na-Sch es capaz de reproducir características macroscópicas básicas del tráfico vehicular. Sin embargo, realiza simplificaciones importantes de las condiciones del mundo real. Por esta razón surgieron numerosas extensiones y modificaciones para incluir la mayor cantidad de elementos, observados en la realidad, a este tipo de modelos.

Una revisión de varios de estos modelos, el orden en el que fueron surgiendo y sus aportaciones, puede encontrarse en (Guzmán, 2012). En este trabajo continuaremos con un modelo reciente que engloba varias de estas extensiones y las presenta bajo el paradigma de los autómatas celulares.

2.1.2. Modelo LAI

El modelo LAI (Lárraga y Alvarez-Icaza, 2010), al igual que el modelo Na-Sch, representa el flujo vehicular de una carretera bajo el paradigma de los autómatas celulares. Tiene la ventaja de incluir políticas de espaciamiento utilizadas por los conductores reales. Además

incorpora políticas de ingeniería de transporte que garantizan un comportamiento microscópico de los vehículos más apegados a los comportamientos vehiculares observados en el mundo real.

Para lograr esto, este modelo introduce un conjunto nuevo de reglas simples para cambiar la velocidad de los vehículos que incorporan distancia seguras de seguimiento. El modelo también evita la desaceleración irreal en varios de los modelos previos de autómatas celulares.

Dentro de las capacidades del modelo LAI también se encuentran la reproducción de los tres estados del flujo vehicular y las velocidades de salida cuando un vehículo se encuentra el frente de un congestionamiento vehicular.

Al igual que el modelo Na-Sch, el modelo LAI también asume que los vehículos se mueven de izquierda a derecha y la carretera también esta conformada por L celdas que pueden estar vacías u ocupadas. La velocidad que los vehículos pueden tener se encuentra dentro del conjunto $[0, 1, \dots, v_{max}]$. A diferencia del modelo Na-Sch, el modelo LAI considera que los vehículos ocupan más de un celda.

El modelo LAI considera que los conductores son sensibles a las condiciones locales que se presentan en el tráfico vehicular para poder determinar las capacidades de aceleración y desaceleración limitadas de los vehículos. Cuando existen grandes distancias entre los conductores, éstos tienden a alcanzar la velocidad máxima posible (v_{max}). Para distancias consideradas como intermedias, los conductores reaccionan a los cambios de velocidad del vehículo líder. Esto hace que para actualizar el valor de la velocidad de cada vehículo se toma en cuenta tanto la velocidad relativa como las distancias relativas positivas de los vehículos vecinos. En distancias pequeñas los conductores ajustan su velocidad para poder conducir de forma más segura. Al percibir situaciones inseguras (distancias muy pequeñas entre vehículos) los conductores aplicarán frenado de emergencia.

En la definición de las reglas que actualizan las velocidades se toman en cuenta tres distancias por un vehículo seguir para acelerar (d_{acc}), frenar (d_{dec}) y mantener su velocidad (d_{keep}) en el siguiente paso de tiempo. Las reglas también toman en cuenta los efectos estocásticos del comportamiento de los conductores (capacidades de aceleración/desaceleración aleatorias). Las reglas son las siguientes:

S1: Distancias seguras

Obtener los valores de las distancias necesarias para conducir de forma segura. $d_{dec_n} = d_{dec}(t, v_n(t), v_{n+1}(t))$, $d_{acc_n} = d_{acc}(t, v_n(t), v_{n+1}(t))$ y $d_{keep_n} = d_{keep}(t, v_n(t), v_{n+1}(t))$.

S2: Aceleración retardada

Obtener el valor correspondiente al ruido estocástico (R_a) basado en la velocidad del vehículo (v_n).

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

donde v_s es una constante ligeramente mayor a 0.

S3: Actualización de la velocidad

Sea Δv la máxima magnitud en celdas para acelerar/desacelerar un vehículo en una situación normal. La actualización de la velocidad de cada uno de los vehículos se realiza simultáneamente de acuerdo con las siguientes reglas:

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

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

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

S3b: Desaceleración aleatoria. Si $d_{acc_n} > d_n(t) \geq d_{keep_n}$, la velocidad del vehículo n se decrementará 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 $d_{keep_n} > d_n(t) \geq d_{dec_n}$, 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 .

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

donde M es el máximo decremento posible, en la velocidad, para un paso de tiempo.

Nota: Es importante hacer notar que para evitar velocidades negativas o mayores a la velocidad máxima se hace uso de las funciones $\max()$ y $\min()$, respectivamente, al momento de realizar las actualizaciones en las velocidades de los vehículos.

S4: Movimiento

Cada vehículo se desplaza hacia adelante de acuerdo con la nueva velocidad determinada por las reglas S3a:S3d:

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

donde $x_n(t)$ y $v_n(t)$ denotan la posición y la velocidad, respectivamente, del vehículo n al paso de tiempo t .

Explicación de las reglas

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

La magnitud para incrementar/decrementar la velocidad de un vehículo en un paso de tiempo bajo condiciones normales (Δv) se determina de la siguiente manera:

$$\Delta v = \frac{2.5 \text{ m}}{\Delta x}$$

donde Δx denota el tamaño de las celdas en metros. Este valor se utiliza en la discretización del sistema. En el artículo donde se presentó este modelo (Lárraga y Alvarez-Icaza, 2010) se utiliza el valor $\Delta x = 2.5$ metros.

La actualización del estado de este modelo se puede dividir en dos etapas. La primera etapa corresponde a la actualización de la velocidad (reglas S3a a S3d); la segunda etapa corresponde a la actualización de la posición.

S1: La primera regla de este modelo de autómatas celulares es el cálculo de las tres distancias de seguimiento seguro (d_{acc} , d_{keep} y d_{dec}), encargadas de mantener condiciones de manejo seguras. Estos cálculos indican la distancia que un vehículo seguidor (vehículo detrás de otro vehículo) debe mantener con el vehículo que le precede (vehículo líder) para poder acelerar, mantener su velocidad o frenar de manera segura.

Para definir estas tres distancias de seguimiento seguro, el modelo, asume el peor escenario después de que cualquiera de estas tres maniobras (acelerar, mantener velocidad o frenar) es ejecutada. El peor escenario consiste en que el vehículo líder frene de manera abrupta, provocando que el vehículo seguidor tenga que frenar de manera abrupta en pasos de tiempos sucesivos para evitar así una colisión. Las ecuaciones que definen las distancias de seguimiento seguro son las siguientes:

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

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

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

donde $X_{div}Y$ denota una división entera, esto es, $X_{div}Y = [X/Y]$ en donde "/" denota una división normal y $[z]$ denota la función suelo ($floor(z)$).

Dentro de las funciones, la parte que se encuentra al lado derecho del signo de resta calcula la distancia que el vehículo seguidor (vehículo en el que estamos enfocados) viajará si éste acelera (d_{acc_n}), mantiene su velocidad (d_{keep_n}) o frena (d_{dec_n}) en el siguiente paso de tiempo ($t + 1$) y en el paso de tiempo posterior ($t + 2$) comienza a frenar con la capacidad de desaceleración máxima (M) y continua así hasta detenerse por completo. La parte que se encuentra al lado derechos del signo de resta determina la distancia que recorrerá el vehículo líder ($n + 1$) si en el siguiente paso de tiempo ($t + 1$) éste comienza a frenar a máxima capacidad de desaceleración (M).

De esta forma, la resta en las ecuaciones corresponde a la distancia de seguimiento seguro para detener a un vehículo en una situación de emergencia (que los obligue a frenar a máxima capacidad) considerando que el vehículo seguidor acelere, mantenga su velocidad o frene en el paso de tiempo $t + 1$.

La función $\max()$ que aparece en las ecuaciones se utilizan para estar seguros de no obtener distancias negativas.

En el artículo (Lárraga y Alvarez-Icaza, 2010) se hace mención que para un tamaño de celda determinado se pueden obtener los valores para los diferentes valores de v que pueden tener los vehículos y así poder almacenar los valores en una tabla y reducir así el costo computacional. Esto quiere decir que en lugar calcular los valores de las distancias cada vez que son requeridos, solamente se tomaría el valor correspondiente de una tabla.

S2: Durante este paso se obtiene el valor estocástico para R_a que denota la probabilidad para acelerar tomando en cuenta la velocidad del vehículo. Asume que los vehículos con velocidades inferiores a v_s para el paso de tiempo anterior ($t - 1$), en el paso de tiempo t tendrán

una probabilidad más baja que el resto de los vehículos en movimiento (vehículos con $v > v_s$ en el paso de tiempo $t - 1$). Esto provoca que los vehículos más lentos tengan que esperar más tiempo antes de continuar con su viaje. El parámetro estocástico R_a (< 1) en S2 interpola linealmente entre R_0 y R_d ($R_0 < R_d$) si v_n es más lenta que v_s . De esta forma, esta regla modela que los vehículos que salen del frente de un congestionamiento aceleran suavemente.

S3a: Al igual que la regla R1 del modelo Na-Sch, esta regla también asume que los conductores se esfuerzan por alcanzar la máxima velocidad posible. A diferencia de la regla R1, esta regla si considera la aceleración no uniforme de los vehículos. Esto lo logra mediante el parámetro R_a que provoca una aceleración retardada dependiendo de la velocidad del vehículo. Mientras más pequeña sea la velocidad de un vehículo más tiempo tendrá que esperar un vehículo para continuar su viaje.

S3b: Este paso refleja la tendencia de los conductores a mantener su velocidad si ellos perciben como segura la distancia entre ellos y el vehículo que tienen enfrente. También introduce perturbaciones de tráfico vehicular que provocan que los conductores reduzcan su velocidad sin razón aparente. Esta desaceleración aleatoria se controla mediante el valor de R_s y contribuye a la generación de embotellamientos espontáneos. Para evitar un doble frenado esta regla sólo se aplica a los vehículos que se encuentran en condiciones de movimiento y no requieren desacelerar.

S3c: Cuando el espacio que separa a un vehículo de su vehículo de enfrente no es lo suficiente para mantener su velocidad, el vehículo desacelerará de forma moderada. Esta regla evita el uso de desaceleraciones irreales por lo que al frenar moderadamente se aplicará una desaceleración limitada por el valor de Δv .

S3d: Para los casos en que la distancia entre un vehículo y su vehículo líder sea considerada demasiado pequeña, los vehículos considerarán que se encuentran en una circunstancia crítica y aplicarán un frenado de emergencia (mayor al utilizado en desaceleraciones moderadas)

utilizando el valor de M . Este valor se define de la siguiente manera:
 $M = 5.00/\Delta x$.

Parámetros del modelo LAI

Parámetro	Descripción
v_{max}	Velocidad máxima que pueden alcanzar los vehículos.
v_s	Velocidad lenta.
l_s	Longitud de los vehículos (en celdas).
M	Máximo decremento de velocidad en una unidad de tiempo.
R_s	Probabilidad de desaceleración aleatoria.
R_0, R_d y R_a	R_a es un valor estocástico empleado en el paso S2. tiene u valor entre R_0 y R_d .
ρ	Densidad global. Cantidad de celdas ocupadas entre el número total de celdas.

Cuadro 2.2: Lista de parámetros utilizados por el modelo LAI.

VARIABLES IMPORTANTES DEL MODELO LAI

Variable	Descripción
x_n	Posición del vehículo n .
v_n	Velocidad del vehículo n .
Δx	Tamaño de la celda en metros.
Δv	Magnitud para incrementar/disminuir la velocidad en un paso de tiempo.
d_{dec}	Distancia para frenar de manera segura en el siguiente paso de tiempo.
d_{keep}	Distancia para mantener la velocidad de manera segura en el siguiente paso de tiempo.
d_{dacc}	Distancia para acelerar de manera segura en el siguiente paso de tiempo.

Cuadro 2.3: Lista de las variables importantes del modelo LAI.

Alcance del modelo LAI

El modelo LAI, además de ser capaz de reproducir las mismas características macroscópicas del tráfico vehicular que reproduce el modelo Na-Sch, también modela aceleraciones/desaceleraciones realistas con valores límite y espaciamiento seguro entre vehículos basado en las velocidades relativas de los mismos.

El modelo resuelve varias de las limitaciones que se encontraban en los modelos de tráfico vehicular basados en autómatas celulares para carreteras monocarril pero, en la realidad, las carreteras cuentan con más de un carril. Es por esto que el modelo GLAI ([Guzmán et al., 2015](#)) retoma todas las ideas y características del modelo LAI y lo extiende para poder modelar carreteras de dos carriles.

2.2. Modelo GLAI

El modelo GLAI ([Guzmán et al., 2015](#)) es capaz de simular características macroscópicas y maniobras de cambio de carril en el tráfico heterogéneo (vehículos de diferentes tamaños) de una carretera con dos carriles tomando en cuenta distancias seguras entre vehículos basadas en las velocidades relativas de los mismos y aceleraciones/desaceleraciones realistas.

Además de lo anteriormente mencionado, el modelo cuenta con parámetros, variables y condiciones incentivas y de seguridad (para los cambios de carril) que facilitan la integración de este modelo de tráfico vehicular con los modelos de evolución de la cooperación mencionados en el primer capítulo de este trabajo.

2.2.1. Descripción del modelo

El modelo GLAI consta de dos carriles, cada uno de los cuales se define como un modelo LAI ([Lárraga y Alvarez-Icaza, 2010](#)) independiente (de un solo carril) funcionando en paralelo. El modelo GLAI considera tráfico vehicular heterogéneo mediante la inclusión de dos tipos de vehículo: automóviles (autos compactos) y camiones. La diferencia entre ellos es el tamaño (los camiones tienen mayor longitud que los autos compactos) y la velocidad máxima que pueden alcanzar (los autos compactos pueden alcanzar una velocidad máxima mayor a la de los camiones).

El modelo GLAI comparte algunas variables con el modelo LAI y a su vez requiere de algunas otras variables (2.4) para poder manejar los cambios de carril (que podrían observarse como el tránsito de un vehículo entre los modelos tipo LAI que conforman cada carril).

Descripción de las reglas de cambio de carril

Las reglas de los cambios de carril están basadas en la definición del distanciamiento seguro y las aceleraciones/desaceleraciones realistas introducido por el modelo LAI. Estas reglas son asimétricas, es decir, la regla que regula el cambio al carril derecho es diferente de la regla que regula el cambio al carril izquierdo.

Al haber dos tipos distintos de vehículos, también existe diferencia en la aplicación de las reglas de cambio de carril a cada tipo de vehículo. Esta diferenciación se hace mediante el uso de distintas probabilidades dependiendo del tipo de vehículo al momento que intentan realizar cambios de carril.

Además de lo anterior, las reglas toman en cuenta las normas de vialidad Mexicanas (y Europas) sobre el uso de carriles en carretera:

1. Por regulación legal se obliga a conducir sobre el carril derecho tan frecuentemente como sea posible.
2. Por regulación legal sólo se permiten las maniobras de rebase mediante la utilización del carril izquierdo.

Cambio de carril izquierdo: un vehículo que va a cambiar al carril izquierdo debe considerar al vehículo delante de él en el mismo carril (f), al vehículo delante de él en el carril izquierdo (lf) y al vehículo detrás de él en el carril izquierdo (lb).

- Paso 1: Inicializar. Para cada vehículo n determinar sus vecinos f , lf , rf , lb , rb y hacer $cl_n = listo$.
- Paso 2: Determinar el cambio de carril (valor de cl_n).

Criterio incentivo

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

ó

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

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

Cuadro 2.4: Lista de las variables utilizadas por las reglas de cambio de carril.

Criterio de seguridad

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

- Paso 3: Realizar cambio de carril

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

El primer criterio incentivo (*ci1*) modela el caso en que un conductor deseará cambiarse al carril izquierdo si sus condiciones actuales mejorarán con este cambio. $d_{keep}(v_n, v_f) \leq gap_{n,f} < d_{acc}(v_n, v_f)$ implica que la distancia entre el vehículo n y el vehículo f no es suficiente para que el vehículo n pueda acelerar (pero sí es suficiente para poder mantener la velocidad) mientras que $gap_{n,lf} \geq d_{acc}(v_n, v_{lf})$ implica que la distancia entre el vehículo n y el vehículo delante de él en el carril izquierdo lf es suficiente para que el vehículo n pueda acelerar. El cambio hacia el carril izquierdo sería innecesario si el vehículo n alcanza la máxima velocidad permitida. Es por esto que se incluye la condición $v_n < v_{max}$. La condición *ci2* identifica otra posible condición que podría promover un cambio de carril. $gap_{n,f} < d_{keep}(v_n, v_f)$ implica que la distancia entre el vehículo n y el vehículo que tiene enfrente (f) no es suficiente para que el vehículo n pueda continuar con su velocidad y, por lo tanto, deberá empezar a desacelerar mientras que $gap_{n,lf} \geq d_{keep}(v_n, v_{lf})$ la distancia que hay entre el vehículo n y el vehículo delante de él en el carril de la izquierda (lf) es suficiente para que al menos pueda mantener la velocidad que tiene. Si alguna de las condiciones anteriores se satisface, se ha identificado que hay condiciones que promueven el cambio de carril del vehículo n hacia el carril izquierdo y es entonces cuando se verifica que el cambio sea posible. El criterio de seguridad (*csi1*) verifica que la distancia entre el vehículo n y su futuro vehículo seguidor (lb) sea suficiente para que, en caso de ser necesario, el vehículo lb sea capaz de frenar sin colisionar con el vehículo n una vez que se efectúe el cambio.

Cambio de carril derecho: un vehículo que va a cambiarse al carril derecho debe considerar al vehículo delante de él en el mismo carril (f), al vehículo delante de él en el carril derecho (rf) y al vehículo detrás de él en el carril derecho (rb).

- Paso 1: Inicializar. Para cada vehículo n determinar sus vecinos f , lf , rf , lb , rb y hacer $cl_n = listo$.
- Paso 2: Determinar el cambio de carril (valor de cl_n).

Criterio incentivo

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

Criterio de seguridad

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

- Paso 3: Realizar cambio de carril

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

El criterio incentivo (*cid1*) modela las normas viales del tránsito vehicular en carreteras (de México y Europa) que indican que el carril derecho debe ser utilizado tanto como sea posible y que se prohíben rebasar por la derecha. $gap_{n,f} \geq d_{keep}(v_n, v_f)$ implica que la distancia entre el vehículo n y el vehículo delante de él (f) es suficiente, al menos, para que el vehículo n mantenga su velocidad. A su vez $gap_{n,rf} \geq d_{keep}(v_n, v_{rf})$ implica que la distancia ente el vehículo n y el vehículo que se encuentra detrás de él en el carril derecho es suficiente para que el vehículo rf pueda, al menos, mantener su velocidad. Debido a que la definición de seguimiento seguro para mantener la velocidad de un vehículo (*dkeep*) considera el peor escenario posible (que el vehículo que se encuentra delante puede frenar a máxima capacidad hasta quedar inmóvil) las reglas de cambio garantizan que rebasar no sea posible, al menos en el instante de tiempo actual. El criterio de seguridad (*csd1*) se asegura de que los vehículos sólo regresen al carril derecho si el espacio entre el vehículo en cuestión y su futuro vehículo líder (rf) es suficiente para que, al menos, el vehículo en cuestión alcance a frenar de ser necesario sin provocar una colisión.

El parámetro p_{change} que aparece en el tercer paso de las reglas de cambio de carril tiene varias funciones:

- Permite modelar el hecho (que ocurre en la realidad) de que aunque un vehículo tenga las condiciones necesarias para cambiar de carril, el conductor decide no realizar el cambio.

- Permite tener control sobre el número de cambios de carril derivados de la discretización del tiempo.
- Ayuda a la diferenciación entre tipos de vehículos ya que pueden fijarse distintos valores de p_{change} para cada carril y para cada tipo de vehículo.
- Influye en la reproducción del efecto de inversión de carril que aparece en la realidad y también ayuda a disminuir el efecto ping-pong (vehículos cambiando a un carril y regresando a su carril de origen en pasos de tiempo sucesivos).

Parámetros del modelo GLAI

El modelo GLAI conserva los mismos parámetros que el modelo LAI (un carril) y solamente se agrega el parámetro p_{change} . Los parámetros se pueden encontrar en el cuadro 2.5.

Parámetro	Descripción
v_{max}	Velocidad máxima que puede alcanzar los vehículos.
v_s	Velocidad lenta.
l_s	Longitud de los vehículos (en celdas).
M	Máximo decremento de velocidad en una unidad de tiempo.
R_s	Probabilidad de desaceleración aleatoria.
R_0, R_d y R_a	R_a es un valor estocástico empleado en el paso S2. tiene un valor entre R_0 y R_d .
ρ	Densidad global. Cantidad de celdas ocupadas entre el número total de celdas.
p_{change}	Probabilidad de efectuar un cambio de carril una vez cumplidas las condiciones incentivas y de seguridad. Se utiliza una probabilidad diferente por carril y por tipo de vehículo.

Cuadro 2.5: Lista de parámetros utilizados por el modelo GLAI.

2.2.2. Alcances del modelo GLAI

El modelo GLAI simula un comportamiento de vehículos y conductores en una carretera de dos carriles incluyendo elementos realistas. Permite la inclusión de dos tipos de vehículos diferentes cuya diferencia esta marcada por distintas capacidades de aceleración/desaceleración.

En (Guzmán, 2012) y (Guzmán et al., 2015) se muestra que el modelo es capaz de reproducir características propias del tráfico vehicular real: diagrama fundamental, inversión de carril, disolución de tapones vehiculares (también conocidos con el término plugs) a pesar de que vehículos lentos utilicen el carril designado para rebasar y probabilidades de cambio de carril. Todo esto es reproducido a partir de la consideración de el uso de distancias de seguimiento seguras y reglas de efectuar cambios de carril basadas en esas distancias de seguimiento seguro y las velocidades relativas de los vehículos involucrados en la maniobra.

El modelo GLAI logra todo esto bajo una formalización del paradigma de los autómatas celulares. Esto permite que los recursos computacionales necesarios para las implementaciones de dicho modelo no sean excesivos y pueda pensar en aprovecharse la información que procesa y crea en aplicaciones de tiempo real. Otra ventaja de la implementación original es que fue construida con una orientación de computo en paralelo para poder reducir aún más los tiempos de ejecución.

En el siguiente capítulo detallaremos cómo unir el modelo GLAI con los modelos de evolución de la cooperación detallados en el primer capítulo y así obtener un modelo de comportamiento de tráfico vehicular para poder estudiar el impacto del comportamiento de los conductores en diversos escenarios de tráfico urbano.

Capítulo 3

Modelando tráfico vehicular en carreteras con teoría de juegos

A continuación detallaremos la forma en que se unieron el modelo de tráfico vehicular (GLAI) que permite modelar cambios de carril en una carretera de dos carriles con elementos realistas ([Guzmán et al., 2015](#)) y modelos de evolución de la cooperación que permiten modelar como se adapta un conjunto de agentes (con dos posibles acciones: cooperar y detractar) a su medio ambiente social ([Cortés-Berrueco et al., 2014](#)). Esta unión permitió crear un modelo de comportamiento de tráfico vehicular para poder estudiar el impacto que pueden tener diferentes tipos de comportamiento (cooperador y desertor) en el desempeño del tráfico vehicular en diferentes escenarios. El contenido de este capítulo fue presentado en la European Conference on Complex Systems (ECCS) 2014 y publicado en [Cortés-Berrueco et al. \(2016\)](#).

3.1. Categorización de comportamientos

Al conducir en el tráfico urbano real podemos encontrar diferentes formas de llevar a cabo una misma maniobra (cambio de carril, incorporación a una vía, cruzar una intersección, alcanzar la velocidad máxima, entre otras). En este trabajo nos referiremos a estas distintas formas de realizar maniobras como "comportamiento".

Las maniobras que un conductor puede realizar con su vehículo en la vía pública están consideradas dentro de los reglamentos que regulan el uso de los espacios públicos. Podemos decir que al realizar las diversas maniobras necesarias al conducir, siguiendo los reglamen-

tos estaríamos teniendo un comportamiento "correcto" (cruzar una intersección semaforizada cuando tenemos luz verde, utilizar el espacio asignado por las líneas que marcan los carriles). De esta forma un comportamiento "incorrecto" sería aquel que se puede realizar pero que no está considerado en los reglamentos (manejar a baja velocidad en un carril de alta velocidad), o bien, lo contradicen (usar una vía en sentido contrario al indicado). La mayoría de las reglamentaciones están basadas en el uso seguro y equitativo de las vías públicas (Christie, 2001), sin embargo existen diversas causas que provocan que los conductores desvíen su comportamiento de lo establecido por las reglamentaciones (Dukes et al., 2001).

Queremos enfatizar que en muchas de las reglamentaciones se insta a los conductores a ceder el uso de las vías públicas en favor de algún otro conductor, por ejemplo: esperar la luz verde para poder cruzar una intersección semaforizada. Esta tendencia de las reglamentaciones es parecida al concepto de cooperación que se utiliza en (Nowak, 2006), en donde se menciona que un cooperador es aquel jugador que paga un costo para que otro jugador lo reciba como beneficio (esto último también se revisa en el capítulo 1 de este trabajo). Este hecho conforma nuestro primer punto de unión entre el modelo de tráfico GLAI y los modelos de evolución de la cooperación ya que podemos etiquetar a los comportamientos correctos como "cooperativos" y aquellos comportamientos incorrectos como "desertores". Es evidente que las etiquetas "correcto" e "incorrecto" bien pueden cambiarse por otro par de etiquetas, como por ejemplo: seguro/inseguro, legal/ilegal, conservador/arriesgado, entre otros. Sin embargo, el uso de las etiquetas "cooperativo/desertor" nos es útil para ser consistentes con el lenguaje utilizado en los modelos de evolución de la cooperación.

3.2. Resumen del proceso de unión de los modelos

1. Usando las definiciones de las condiciones incentivas y de seguridad de las reglas de cambio de carril creamos diferentes comportamientos que etiquetamos como "cooperativos" o "desertores".
2. En el modelo presentado en este trabajo, un juego, corresponde a las interacciones entre dos conductores (jugadores) cuando uno

de ellos intenta realizar una maniobra de cambio de carril.

3. Mientras en los modelos de evolución presentados en ([Cortés-Berrueco et al., 2014](#)) las ganancias y pérdidas obtenidas por los jugadores eran abstractas, en el modelo aquí presentado las ganancias obtenidas están relacionadas a mediciones físicas que pueden obtenerse de la sección del modelo que se encarga de reproducir la dinámica del tráfico vehicular.
4. Para crear diversos comportamientos globales para los conductores implementamos dos de las reglas mostradas en ([Nowak, 2006](#)) y agregamos otro par de reglas de nuestra invención. Estas reglas se superponen a las acciones (cooperar/detractar).

3.3. Descripción del modelo

Como ya se mencionó anteriormente, el modelo que aquí se presenta se compone de dos partes. La primera de ellas corresponde a modelar la dinámica vehicular de una carretera de dos carriles con maniobras de cambio de carril (de aquí en adelante nos referiremos a esta parte como la sección GLAI). La segunda parte corresponde a todo aquello que esté relacionado con la evolución de la cooperación (de aquí en adelante nos referiremos a esta parte como al sección de evolución de la cooperación).

3.3.1. Sección GLAI

Para poder representar la dinámica de tráfico vehicular nuestro modelo utiliza una implementación del modelo GLAI ([Guzmán et al., 2015](#)). Por esta razón nuestro modelo tendrá una apariencia similar al modelo GLAI (Fig. 3.1) y compartirá muchas de las variables y parámetros del mismo (los parámetros y variables ya se mostraron en el capítulo anterior, pero para comodidad del lector las repetiremos en este capítulo en los cuadros 3.1 y 3.2). Esto implica que el modelo presentado tiene las características principales del modelo GLAI (distancias de seguimiento seguras basadas en las velocidades relativas de los vehículo, tasas de aceleración/desaceleración realistas y condiciones incentivas y de seguridad basadas en las distancias de seguimiento seguro).

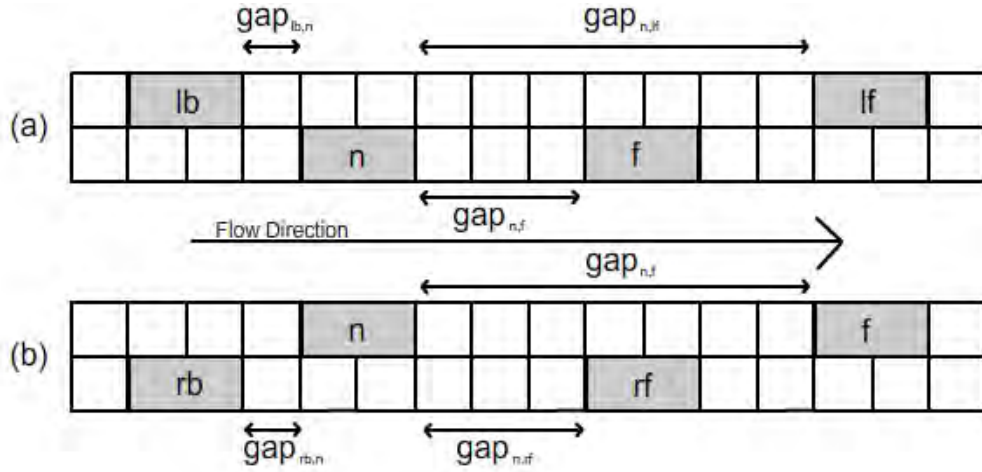


Figura 3.1: Ejemplo de una sección de la carretera del modelo GLAI.

Parámetro	Descripción
v_{max}	Velocidad máxima que puede alcanzar los vehículos.
v_s	Velocidad lenta.
l_s	Longitud de los vehículos (en celdas).
M	Máximo decremento de velocidad en una unidad de tiempo.
R_s	Probabilidad de desaceleración aleatoria.
R_0, R_d y R_a	R_a es un valor estocástico empleado en el paso S2. tiene u valor entre R_0 y R_d .
ρ	Densidad global. Cantidad de celdas ocupadas entre el número total de celdas.
p_{change}	Probabilidad de efectuar un cambio de carril una vez cumplidas las condiciones incentivas y de seguridad. Se utiliza una probabilidad diferente por carril y por tipo de vehículo.

Cuadro 3.1: Lista de parámetros utilizados por el modelo GLAI.

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

Cuadro 3.2: Lista de las variables utilizadas por las reglas de cambio de carril.

Los únicos parámetros del modelo GLAI que el modelo presentado no conserva son los que hacen referencia a la probabilidad de los vehículos a cambiar de carril una vez satisfechas las condiciones incentivas y de seguridad (parámetros p_{change}). Esto se debe a que, como ya se mencionó, realizamos cambios en las condiciones incentivas y de seguridad para poder crear comportamientos que podamos catalogar como cooperativos (condiciones incentivas y de seguridad más cautas o correctas) o desertores (condiciones incentivas y de seguridad más arriesgadas o incorrectas) al momento en que un vehículo realiza o intenta realizar un cambio de carril. De esta forma, si un conductor decide cooperar la probabilidad de efectuar un cambio de carril disminuyen (ya que implica condiciones de seguridad más restrictivas) y si decide desertar las probabilidades de efectuar el cambio de carril serán mayores (condiciones de seguridad más permisivas).

La sección de evolución de la cooperación del modelo es la encargada de determinar la probabilidad de un conductor sea cooperador o desertor y por lo tanto también afectará la probabilidad de que dicho conductor realice cambios de carril. Este se detallará en la sección correspondiente a la evolución para la cooperación.

Modificaciones a las reglas de actualización originales del modelo GLAI

En cada paso de tiempo, tanto el modelo GLAI como nuestro modelo, se debe actualizar todos los vehículos. Cada actualización se realiza en dos sub-pasos o fases. Cada una de estas tiene efecto sobre todos los vehículos de forma paralela.

1. *Intercambio*: en esta fase, los vehículos se desplazan de un carril a otro de acuerdo a las reglas de cambio de carril que se describen más adelante.
2. *Actualización de carril*: para poder modelar la dinámica de tráfico vehicular, los vehículos perciben cada carril como un modelo LAI independiente. Esta segunda fase opera sobre el resultado obtenido por la fase de Intercambio. La fase de actualización consiste en la ejecución de los siguientes pasos:

S1. Distancias de seguimiento seguro. Aquí aparece una de las modificaciones que realizamos al modelo GLAI original. Se obtienen los valores para $d_{dec} = d_{dec}(v_n(t), v_{n+1}(t))$, $d_{keep} = d_{keep}(v_n(t), v_{n+1}(t))$ y $d_{acc} = d_{acc}(v_n(t), v_{n+1}(t))$, que como ya se mencionó anteriormente son las distancias mínimas requeridas para que un vehículo n pueda conducir a velocidad v_n detrás de su vehículo líder ($n + 1$) de manera segura pero utilizando las siguientes reglas modificadas:

$$d_{acc}(t) = \sum_{i=0}^{(v_n(t)+\Delta v)/M} [(v_n(t) + \Delta v) - i * M] - \sum_{i=0}^{(v_{n+1}(t)-M)/M} [(v_{n+1}(t) - M) - i * M]$$

$$d_{keep}(t) = \sum_{i=0}^{v_n(t)/M} [v_n(t) - i * M] - \sum_{i=0}^{(v_{n+1}(t)-M)/M} [(v_{n+1}(t) - M) - i * M]$$

$$d_{dec}(t) = \sum_{i=0}^{(v_n(t)-\Delta v)/M} [(v_n(t) - \Delta v) - i * M] - \sum_{i=0}^{(v_{n+1}(t)-M)/M} [(v_{n+1}(t) - M) - i * M]$$

La modificación realizada consiste en reemplazar la función $X \text{ div } Y$ que denota división entera, $X \text{ div } Y = [X/Y]$, en donde "/" denota división y $[z]$ es la función piso. En su lugar encontraremos indicado nada más (como aparecen las ecuaciones) una división normal ("/"). Este cambio permite expresar las distancias de seguimiento seguro en fracciones lo que permite aprovechar la capacidad que tiene NetLogo (Wielensky, 1999) de expresar fracciones en sus unidades de distancia. Tanto las ecuaciones originales como las nuevas ecuaciones puedan dar como resultado números negativos. Para

evitar tener distancias de seguimiento seguro negativas utilizamos las expresiones; $d_{acc_n}(t) = \max(0, d_{acc}(t))$, $d_{keep_n}(t) = \max(0, d_{keep}(t))$ y $d_{dec_n}(t) = \max(0, d_{dec}(t))$.

S2. Lento para acelerar. En este paso se simula los diferentes tiempos de reacción existentes entre los conductores. Para lograr ésto, se hace uso del parámetro estocástico R_a (original del modelo LAI) que es dependiente de la velocidad v_n del vehículo siendo actualizado y que se determina con la ecuación:

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

en donde v_s es un parámetro ligeramente mayor que 0, $0 < R_a \leq 1$ y $0 < R_0 < R_d \leq 1$. El parámetro estocástico R_a interpola linealmente entre R_0 y R_d ($R_0 < R_d$) si la velocidad del vehículo (v_n) es menor a la "velocidad lenta" v_s . El parámetro R_a indica la probabilidad que tiene un vehículo de acelerar basándose en la velocidad del mismo, es decir, los vehículos lentos (aquellos con $v_n < v_s$) tardaran más en acelerar para poder continuar con su viaje debido a la inercia del vehículo.

S3. Actualización de la velocidad. Al igual que en el modelo GLAI y LAI, la velocidad de todos los vehículos se actualiza de manera simultánea siguiendo los mismos pasos que se utilizan en el modelo LAI y que se detallan en la sección 2.1.2. Aquí sólo los mencionaremos:

S3a. Aceleración.

S3b. Desaceleración aleatoria.

S3c. Desaceleración.

S3d. Desaceleración de emergencia.

S4. Movimiento. Cada vehículo se desplaza hacia adelante de acuerdo con la nueva velocidad determinada por las reglas S3a:S3d:

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

donde $x_n(t)$ y $v_n(t)$ denotan la posición y la velocidad, respectivamente, del vehículo n al paso de tiempo t .

Aclaración: como bien se puede notar, el único cambio realizado a las reglas de actualización originales del modelo GLAI es el cálculo de las distancias de seguimiento seguro. Este cambio se realizó con el propósito de poder expresar las distancias en números fraccionarios.

Modificaciones a las reglas de cambio de carril

Para comodidad del lector, en esta sección se comenzará por recordar las reglas originales que se explican y detallan en 2.2.1:

Derecha → Izquierda

-
- Paso 1: Inicializar. Para cada vehículo n determinar sus vecinos f , lf , rf , lb , rb y hacer $cl_n = listo$.
- Paso 2: Determinar el cambio de carril (valor de cl_n).

Criterio incentivo

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

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

Criterio de seguridad

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

- Paso 3: Realizar cambio de carril

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

Izquierda → Derecha

- Paso 1: Inicializar. Para cada vehículo n determinar sus vecinos f , lf , rf , lb , rb y hacer $cl_n = listo$.
- Paso 2: Determinar el cambio de carril (valor de cl_n).

Criterio incentivo

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

Criterio de seguridad

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

- Paso 3: Realizar cambio de carril

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

Poniendo atención a los criterios incentivos y de seguridad, se puede notar que, si se realizan cambios en éstos obtendremos también cambios en el comportamiento de los conductores. Por ejemplo, en el criterio de seguridad *scd1*, si reemplazamos $d_{dec}(v_{rb}, v_n)$ con $d_{keep}(v_{rb}, v_n)$ los conductores (vehículo n) solamente realizarán cambios de carril si su futuro vehículo sucesor (en este caso el vehículo rb) puede mantener su velocidad después de realizado el cambio de carril.

Nuevo criterio de seguridad para cambio izquierda → derecha

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

Nuevo criterio de seguridad para cambio derecha → izquierda

(csi1') Si $gap_{lb,n} \geq d_{keep}(v_{lb}, v_n)$
entonces $(cl_n = izq)$

El comportamiento creado a partir de estos nuevos criterios de seguridad puede ser etiquetado como "prudente" (debido a que el comportamiento evita el frenado de los futuros vehículos seguidores al haber maniobras de cambio de carril). De acuerdo con descripciones hechas por Nowak (Nowak, 2006), también podríamos considerar este nuevo comportamiento como "cooperativo". Si un conductor encuentra condiciones incentivas, éste revisará el nuevo criterio de seguridad (*scd1'* o *sci1'*) para finalmente poder determinar si realizará el cambio o no. Si $d_{succ} < d_{keep}(v_{succ}, v_n)$ (donde *succ* corresponde a *rb* o *lb* dependiendo

si el cambio es a la derecha o izquierda, respectivamente) entonces el vehículo no ejecutará el cambio de carril. Sin embargo, podría suceder que $d_{succ} \geq d_{dec}(v_{succ}, v_n)$ (el criterio de seguridad original sí se cumpla). De esta forma el conductor que podría haber realizado el cambio estaría pagando el costo de no mejorar las condiciones en las que se encuentra conduciendo y el vehículo que iba a ser su futuro seguidor (*succ*) recibiría el beneficio de, al menos, mantener la velocidad a la que se encuentra conduciendo. En general, un conductor cooperativo (uno que use *scd1'* o *sci1'*) tendrá menos probabilidad de realizar un cambio de carril pero todos los posibles futuros vehículos seguidores tendrán mayor probabilidad de mantener sus condiciones de manejo.

Estableciendo el nuevo modelo de comportamiento para cambios de carril

En el modelo propuesto los conductores pueden elegir exhibir alguno de los dos comportamientos los cuales hemos etiquetado como "cooperativo" y "desertor".

Cooperativo: Derecha → Izquierda

Criterio incentivo

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

ó

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

Criterio de seguridad

(csi1') Si $gap_{lb,n} \geq d_{keep}(v_{lb}, v_n)$
entonces ($cl_n = izq$)

Desertor: Derecha → Izquierda

Criterio incentivo

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

ó

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

Criterio de seguridad

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

Podemos apreciar que el criterio incentivo para cambios de derecha \rightarrow izquierda es el mismo para ambos tipos de comportamiento (cooperativo y desertor) y a su vez es el mismo criterio incentivo para cambios de derecha \rightarrow izquierda que se utiliza en el modelo GLAI. La única diferencia entre el comportamiento desertor y cooperativo es que el comportamiento cooperativo usa la versión modificada del criterio de seguridad (csi1') y el comportamiento desertor usa el criterio de seguridad original (csi1). De ésta forma los conductores cooperadores pagarán el costo de tener menos probabilidad de realizar un cambio de carril para que los posibles futuros vehículos seguidores tengan una mayor probabilidad de conservar sus condiciones de conducción, mientras que los conductores desertores tomarán en mayor proporción la oportunidad de mejorar sus condiciones de manejo sin importar las consecuencias hacia los demás conductores (siempre y cuando las colisiones sean evitadas).

Como estamos trabajando un modelo que concuerde con las regulaciones utilizadas en las carreteras de México y Europa, tenemos las reglas asimétricas correspondientes:

Cooperativo: Izquierda \rightarrow Derecha

Criterio incentivo

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

Criterio de seguridad

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

Desertor: Izquierda \rightarrow Derecha

Criterio incentivo

(cid1') Si $[(d_{keep}(v_n, v_f) \leq gap_{n,f} < d_{acc}(v_n, v_f))] \text{ y } [(gap_{n,r,f} \geq d_{acc}(v_n, v_{rf})) \text{ y } (v_n < v_{max})]$

ó

(cid2) Si $[(gap_{n,f} < d_{keep}(v_n, v_f)) \text{ y } (gap_{n,r,f} \geq d_{keep}(v_n, v_{rf}))]$

Criterio de seguridad

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

El criterio cooperativo para cambios de carril de izquierda \rightarrow derecha casi es idéntico al criterio original para cambios de carril de izquierda \rightarrow derecha del modelo GLAI, pero decidimos hacerlo más precavido. De esta forma los vehículos cooperadores que se encuentren conduciendo en el carril izquierdo regresarán en cuanto les sea posible al carril derecho ($cid1$) y sólo lo harán si al cambiar de carril no afectan a su futuro vehículo seguidor en el carril derecho ($csd1'$). Los conductores desertores, en cambio, utilizarán el carril izquierdo tanto como ellos quieran (se omitió $cid1$), podrán utilizar el carril derecho para rebasar ($cid1'$ y $cid2$) y la única consecuencia que evitarán al realizar sus cambios de carril son las colisiones ($csd1$).

Comportamientos cooperativos/desertores adicionales

Para dar mayor impacto a las decisiones de los conductores sobre la dinámica del sistema, creamos comportamientos cooperativos/desertores adicionales.

En la vida real se realizan varias acciones que pueden etiquetarse como cooperativas o desertoras, en este trabajo consideramos las siguientes:

- *Luces direccionales:* en varios países, se requiere que los conductores utilicen las luces direccionales del vehículo para indicar su intención de cambiar de carril. En México y muchos otros países este requerimiento es comúnmente ignorado, sobre todo durante embotellamientos en donde el uso de las direccionales puede resultar en consecuencias contrarias a las deseadas (los demás conductores al identificar las intenciones de cambio de carril, en lugar de facilitar dicha maniobra, realizan acciones para impedir-la). Para simular ésto le dimos a los conductores la habilidad de escoger entre usar luces direccionales (comportamiento cooperativo) o no usarlas (comportamiento desertor). Justo después de revisar el criterio incentivo, si el conductor ha elegido cooperar y se satisface el criterio incentivo, entonces el conductor utilizará las luces direccionales para indicar sus intenciones de cambiar de

carril. Después de revisar el criterio de seguridad, si éste se satisface, entonces el cambio de carril se efectuará; pero si el criterio de seguridad no se satisface entonces, el conductor permanecerá con las luces direccionales encendidas y continuará ejecutando normalmente los demás pasos de actualización del sistema. Los únicos casos en que un conductor apagará las luces direccionales son: 1) al revisar el criterio incentivo en un paso de tiempo subsecuente, el criterio no se satisface y 2) la maniobra de cambio de carril se ejecuta exitosamente.

- *Facilitar el cambio de carril:* Cuando un conductor enciende sus luces direccionales indicando sus intenciones de realizar un cambio de carril, se supone que el futuro vehículo sucesor en el carril objetivo reconocerá las intenciones del primer conductor y tomará las medidas precautorias que sean necesarias, es decir, si el futuro vehículo sucesor prevé que el cambio de carril va a realizarse entonces una medida precautoria sería empezar a generar una distancia segura para su futuro vehículo líder. Esto puede conseguirse ya sea dejando de acelerar o frenando gradualmente. Frecuentemente en México cuando un conductor reconoce la intenciones de cambio de carril de otro conductor, el conductor que reconoce las intenciones de cambio de carril no facilita dicho cambio de carril, ya sea manteniendo la misma velocidad o incluso acelerando.

Modelamos estos comportamientos de cambio de carril dejando que los conductores escojan aleatoriamente (con la ayuda de la variable p_c) entre facilitar el cambio de carril de otro conductor (cooperativo) o continuar conduciendo, ignorando las intenciones de cambio de carril de los demás conductores (desertor). Cuando un conductor cooperador intenta cambiarse de carril, el futuro vehículo sucesor en el carril objetivo (de aquí en adelante nos referiremos a este vehículo como “vehículo objetivo”) decide si tendrá un comportamiento cooperativo o desertor. Si decide ser cooperador, tratará de facilitar el cambio de carril no incrementando su velocidad o frenando si llega a ser necesario. Para lograr esto en el modelo, se modificaron las condiciones del paso S3c de la sección que corresponde a la Actualización de la Velocidad de la fase encargada de actualizar los carriles.

S3c'.Desaceleración':

Si $[(\text{cooperative-target?} == \text{true and directional-signals-detected?} == \text{true}) \text{ and } (d_{\text{keep-pred}'} > d_{\text{pred}'} \geq d_{\text{dec-pred}'} \text{ and } v_n(t) > 0)]$
or $[(d_{\text{keep}_n} > d_n(t) \geq d_{\text{dec}_n}) \text{ and } (v_n(t) > 0)]$, la velocidad del vehículo n se reduce en Δv .

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

en donde *cooperative-target?* es una variable booleana que indica que el conductor n eligió ser cooperativo y que podría ser el nuevo vehículo sucesor de otro vehículo con intenciones de realizar un cambio de carril; *directional-signals-detected?* es una variable booleana que indica si el conductor con intenciones de realizar un cambio de carril tiene las luces direccionales encendidas (y por lo tanto es cooperador); $d_{\text{pred}'}(t)$ señala la distancia que existe entre el del vehículo objetivo n y su posible futuro vehículo líder; finalmente $d_{\text{keep-pred}'}$ es la distancia segura que debe existir entre el vehículo n y su posible nuevo vehículo líder para permitir que el vehículo n pueda mantener su velocidad sin que haya la posibilidad de una colisión.

La modificación anterior cubre el caso en que el vehículo objetivo requiera frenar para facilitar un cambio de carril. Sin embargo en muchas ocasiones basta con dejar de acelerar. Para modelar ésto modificamos las condiciones de S3a que corresponden a la sección Actualización de la Velocidad de la fase encargada de actualizar los carriles.

S3a'. Aceleración'

Si $[\text{target?} == \text{false or } (\text{cooperative-target?} == \text{true and directional-signals-detected?} == \text{false})]$ and $[d_n(t) \geq d_{\text{acc}_n}]$, la velocidad del vehículo n es incrementada aleatoriamente en Δv con probabilidad R_a .

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

La primera parte de la condicional corresponde a los casos en que los conductores acelerarán como usualmente lo hacen: *target? == false*

indica que los conductores enfrente del vehículo n , ya sea en el mismo carril o en los demás carriles, no tienen intenciones de realizar un cambio de carril; $cooperative-target? == \mathbf{false}$ indica que el vehículo n es el futuro vehículo sucesor de un vehículo con intenciones de cambio de carril pero, el vehículo n ha escogido ser desertor. Finalmente, $(cooperative-target == \mathbf{true} \text{ and } directional-signals-detected? == \mathbf{false})$ indica que el vehículo n participa en un cambio de carril, el conductor n ha elegido ser cooperador pero, el vehículo que realiza el cambio de carril ha elegido ser desertor (y no usa sus luces direccionales) provocando que el vehículo n no pueda reaccionar apropiadamente. Como resultado de excluir el caso $(cooperative-target == \mathbf{true} \text{ and } directional-signals-detected? == \mathbf{true})$, cuando estas condiciones se cumplen el vehículo n no acelerará.

3.3.2. Sección para la evolución de la cooperación

Al igual que en (Cortés-Berrueco et al., 2014), cada agente tiene una probabilidad cooperativa que define su apego a exhibir un comportamiento cooperativo. Al principio de cada decisión de cambio de carril (justo antes de revisar los criterios incentivos), cada conductor decide si va a exhibir un comportamiento cooperativo o desertor de acuerdo con:

$$comportamiento_n = \begin{cases} cooperativo & \text{si } randf() \leq p_{cn} \\ desertor & \text{si } randf() > p_{cn} \end{cases}$$

en donde $randf() \in [0, 1]$ denota un número uniformemente aleatorio.

En la implementación del modelo, una vez que un vehículo activo (vehículo con intenciones de realizar un cambio de carril) encuentra condiciones incentivas favorables para realizar un cambio de carril, éste rastreará al probable futuro vehículo sucesor (vehículo objetivo) correspondiente y lo marcará como “compañero de juego”. Una vez que un vehículo objetivo ha sido marcado como compañero de juego, éste decidirá qué tipo de comportamiento va a exhibir. Es preciso hacer notar que los conductores activos pueden tener solamente un compañero de juego mientras que los vehículos objetivos sí pueden tener más un compañero de juego. Si un vehículo objetivo es marcado como compañero de juego por múltiples vehículos activos, el vehículo objetivo en cuestión solamente decidirá que comportamiento exhibir una vez y

mantendrá esa decisión durante todo ese paso de tiempo.

Una vez que los conductores han elegido qué comportamiento exhibir, los pasos de actualización del modelo GLAI son ejecutados con las modificaciones que ya fueron mencionadas. Justo antes de la sección denominada “Movimiento” de la fase de actualización de los carriles, cada conductor conocerá las consecuencias de sus decisiones reconociendo el costo pagado y/o los beneficios obtenidos. En general, los conductores considerarán cada pérdida de velocidad como un costo y cada incremento de velocidad como un beneficio. No obstante, implementamos diferentes nociones de costo-beneficio para estudiar el impacto que tienen los diferentes comportamientos (cooperativo/desertor) en conjunto con las diferentes nociones costo-beneficio (reglas de comportamiento). Estas reglas nos permiten agregar fácilmente diferentes elementos a la racionalidad limitada de los agentes al modificar las matrices de pago sin necesidad de realizar modificaciones mayores a la dinámica del modelo. En la implementación, se requiere introducir un parámetro para escoger entre las diferentes reglas. Para la implementación de nuestro modelo creamos las siguientes reglas (cuadro 3.3):

Regla de comportamiento	Matriz de pago	Variables																																
Comportamiento natural	<table border="1" data-bbox="571 1462 978 1626"> <thead> <tr> <th colspan="2" data-bbox="571 1462 783 1541">Conductor activo</th> <th colspan="2" data-bbox="783 1462 978 1496">V. Objetivo</th> </tr> <tr> <td data-bbox="571 1541 727 1585"></td> <td data-bbox="727 1541 783 1585">C</td> <td data-bbox="783 1541 839 1585"></td> <td data-bbox="839 1541 978 1585">D</td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th data-bbox="571 1541 727 1585">V. Activo</th> <td data-bbox="727 1585 783 1626">C</td> <td data-bbox="783 1585 839 1626">b</td> <td data-bbox="839 1585 978 1626">b</td> </tr> <tr> <td data-bbox="571 1626 727 1666"></td> <th data-bbox="727 1626 783 1666">D</th> <td data-bbox="783 1626 839 1666">b</td> <td data-bbox="839 1626 978 1666">c</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1" data-bbox="571 1733 978 1897"> <thead> <tr> <th colspan="2" data-bbox="571 1733 783 1812">Conductor objetivo</th> <th colspan="2" data-bbox="783 1733 978 1767">V. Objetivo</th> </tr> <tr> <td data-bbox="571 1812 727 1856"></td> <td data-bbox="727 1812 783 1856">C</td> <td data-bbox="783 1812 839 1856"></td> <td data-bbox="839 1812 978 1856">D</td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th data-bbox="571 1812 727 1856">V. Activo</th> <td data-bbox="727 1856 783 1897">C</td> <td data-bbox="783 1856 839 1897">c</td> <td data-bbox="839 1856 978 1897">c</td> </tr> <tr> <td data-bbox="571 1897 727 1937"></td> <th data-bbox="727 1897 783 1937">D</th> <td data-bbox="783 1897 839 1937">c</td> <td data-bbox="839 1897 978 1937">c</td> </tr> </tbody> </table>	Conductor activo		V. Objetivo			C		D	V. Activo	C	b	b		D	b	c	Conductor objetivo		V. Objetivo			C		D	V. Activo	C	c	c		D	c	c	$b \in \{-M, -\Delta v, 0, \Delta v\}$ variaciones de velocidad para un conductor activo. $c \in \{-M, -\Delta v, 0, \Delta v\}$ variaciones de velocidad para un vehículo objetivo.
Conductor activo		V. Objetivo																																
	C		D																															
V. Activo	C	b	b																															
	D	b	c																															
Conductor objetivo		V. Objetivo																																
	C		D																															
V. Activo	C	c	c																															
	D	c	c																															

<p>Comportamiento cooperativo estilo Nowak</p>	<table border="1" style="margin-bottom: 20px;"> <tr> <td colspan="2" rowspan="2">Conductor activo</td> <td colspan="2">V. Objetivo</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>D</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">V. Activo</td> <td>C</td> <td>$b + c$</td> <td>b</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>b</td> <td>c</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td colspan="2" rowspan="2">Conductor objetivo</td> <td colspan="2">V. Objetivo</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>D</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">V. Activo</td> <td>C</td> <td>$c + b$</td> <td>c</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>c</td> <td>c</td> </tr> </table>	Conductor activo		V. Objetivo		C	D	V. Activo	C	$b + c$	b	D	b	c	Conductor objetivo		V. Objetivo		C	D	V. Activo	C	$c + b$	c	D	c	c	<p>$b \in \{-M, -\Delta v, 0, \Delta v\}$ variaciones de velocidad para un conductor activo. $c \in \{-M, -\Delta v, 0, \Delta v\}$ variaciones de velocidad para un vehículo objetivo.</p>
Conductor activo				V. Objetivo																								
		C	D																									
V. Activo	C	$b + c$	b																									
	D	b	c																									
Conductor objetivo		V. Objetivo																										
		C	D																									
V. Activo	C	$c + b$	c																									
	D	c	c																									
<p>Selección por parentesco</p>	<table border="1" style="margin-bottom: 20px;"> <tr> <td colspan="2" rowspan="2">Conductor activo</td> <td colspan="2">V. Objetivo</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>D</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">V. Activo</td> <td>C</td> <td>$b + (c * r)$</td> <td>$b + (c * r)$</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>$b + (c * r)$</td> <td>$b + (c * r)$</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td colspan="2" rowspan="2">Conductor objetivo</td> <td colspan="2">V. Objetivo</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>D</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">V. Activo</td> <td>C</td> <td>$c + (+ * r)$</td> <td>$c + (b * r)$</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>$c + (b * r)$</td> <td>$c + (b * r)$</td> </tr> </table>	Conductor activo		V. Objetivo		C	D	V. Activo	C	$b + (c * r)$	$b + (c * r)$	D	$b + (c * r)$	$b + (c * r)$	Conductor objetivo		V. Objetivo		C	D	V. Activo	C	$c + (+ * r)$	$c + (b * r)$	D	$c + (b * r)$	$c + (b * r)$	<p>$b \in \{-M, -\Delta v, 0, \Delta v\}$ variaciones de velocidad para un conductor activo. $c \in \{-M, -\Delta v, 0, \Delta v\}$ variaciones de velocidad para un vehículo objetivo. $r =$ probabilidad de estar relacionados.</p>
Conductor activo				V. Objetivo																								
		C	D																									
V. Activo	C	$b + (c * r)$	$b + (c * r)$																									
	D	$b + (c * r)$	$b + (c * r)$																									
Conductor objetivo		V. Objetivo																										
		C	D																									
V. Activo	C	$c + (+ * r)$	$c + (b * r)$																									
	D	$c + (b * r)$	$c + (b * r)$																									
<p>Reciprocidad indirecta</p>	<table border="1"> <tr> <td colspan="2" rowspan="2">Conductor activo</td> <td colspan="2">V. Objetivo</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>D</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">V. Activo</td> <td>C</td> <td>$b * (1 - q)$</td> <td>$b * (1 - q)$</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>$b * (1 - q)$</td> <td>$b * (1 - q)$</td> </tr> </table>	Conductor activo		V. Objetivo		C	D	V. Activo	C	$b * (1 - q)$	$b * (1 - q)$	D	$b * (1 - q)$	$b * (1 - q)$	<p>$b \in \{-M, -\Delta v, 0, \Delta v\}$ variaciones de velocidad para un conductor activo. $c \in \{-M, -\Delta v, 0, \Delta v\}$ variaciones de velocidad para un vehículo objetivo.</p>													
Conductor activo				V. Objetivo																								
		C	D																									
V. Activo	C	$b * (1 - q)$	$b * (1 - q)$																									
	D	$b * (1 - q)$	$b * (1 - q)$																									

	Conductor objetivo		V. Objetivo		$q =$ probabilidad de conocimiento social. $Q = (1 - q)$.
			C	D	
	V. Activo	C	$(c + b) * Q$	$c * Q$	
		D	$c * Q$	$c * Q$	

Cuadro 3.3: Nociones costo-beneficio (reglas de comportamiento) descritas como matrices de pago especificando las interacciones entre agentes.

Comportamiento natural: con este caso representamos formalmente lo que creemos que ocurre durante un cambio de carril. En el caso en que un vehículo activo logre cambiarse de carril, el vehículo siempre recibirá un beneficio, dada la naturaleza de los criterios incentivos (cambiar de carril para mejorar o al menos mantener las condiciones de manejo en términos de velocidad). Dadas las diferentes circunstancias que pueden presentarse en la carretera (diferentes densidades) y los diferentes comportamientos que pueden exhibir los vehículos objetivo, éstos pueden acelerar, mantener su velocidad, frenar o utilizar frenado de emergencia.

En algunos otros casos, los vehículos activos no serán capaces de completar la maniobra de cambio de carril. En estas condiciones, los vehículos activos pueden bien acelerar, mantener su velocidad, frenar o incluso utilizar frenado de emergencia. Para los casos en que esto suceda y estén interactuando con un vehículo objetivo desertor, las probabilidades de que el vehículo activo frene o tenga que utilizar frenado de emergencia se incrementarán.

En resumen, el comportamiento que hemos etiquetado como “natural” tiene una matriz de pagos que sólo reporta, al conductor, las ganancias o pérdidas de velocidad que se obtienen como consecuencia de participar en un cambio de carril, lo que se tomará en cuenta para realizar los ajustes necesarios a la probabilidad cooperativa (p_c) en futuras participaciones en cambios de carril.

Comportamiento cooperativo estilo Nowak: este caso es una versión modificada del comportamiento natural. En todas las reglas de los cinco mecanismos para la evolución de la cooperación estudiados por Nowak (Nowak, 2006), para los casos en que ambos jugadores coope-

ran, la expresión $b - c$ implica que el impacto del costo y del beneficio afectan a ambos jugadores. Esto podría representar, en términos de cambios de carril en tráfico vehicular, empatía entre conductores. Un conductor objetivo que se encuentre cooperando podría compensar, en cierto sentido, sus pérdidas de velocidad mediante una recompensa emocional de satisfacción al “ayudar” a otro conductor. De manera análoga, un conductor activo (realizando un cambio de carril) cooperador podría no “disfrutar” por completo su incremento de velocidad debido a emociones negativas generadas por causar que otro conductor tenga que utilizar frenado de emergencia para no colisionar. No podemos confirmar que ésto suceda en realidad durante los cambios de carril, pero se incluyó para poder explorar las consecuencias de dicho comportamiento.

Selección por parentesco: modelamos este caso porque podría simular algunas circunstancias reales del tráfico vehicular. En (Nowak, 2006), la selección por parentesco se explica cómo una de las formas en que la selección natural favorece la cooperación. Mientras mayor sea la probabilidad de estar relacionados consanguíneamente (probabilidad de compartir genes), mayor será la probabilidad de que los individuos cooperen. Al conducir, esto puede entenderse como una situación en que ambos conductores participando en un cambio de carril estén relacionados entre ellos. No se precisa una relación consanguínea; es suficiente con los conductores sean “conocidos”, por ejemplo: compañeros de trabajo, vecinos, amigos, etc. Cada caso podría representar un valor diferente de probabilidad de estar relacionados de acuerdo con el grado de parentesco (o cercanía) que haya entre los agentes. En la implementación de este comportamiento se supone una probabilidad de estar relacionados uniforme entre todos los agentes. Se dejó fuera el caso contrario, donde el reconocimiento entre agentes dispara comportamientos agresivos entre ellos (por ejemplo, taxis y choferes de Uber).

Reciprocidad indirecta: al igual que en los modelos presentados en (Nowak, 2006) y (Cortés-Berruero et al., 2014), la reputación (reconocimiento social de nuestras acciones) es la característica responsable para la evolución de la cooperación en este caso. Como puede observarse en el renglón correspondiente del cuadro 3.3, la reputación (q) recompensará las acciones cooperativas ($b(1 - q)$) y castigará las ac-

ciones desertoras ($c(1 - q)$). Al igual que en los trabajos anteriormente mencionados, los conductores cooperadores solamente cooperarán cuando reconozcan a otro conductor como cooperador. Al participar en un cambio de carril, los conductores cooperadores intentarán reconocer la clase (cooperador o desertor) a la que pertenece el otro conductor. En caso de que el compañero de juego sea un desertor, el conductor que intenta reconocer logrará hacerlo satisfactoriamente si $randf() \leq q$ y exhibirá un comportamiento desertor para contrarrestar la acción del compañero de juego. Si $randf() > q$ entonces fallará el reconocimiento y asumirá que el compañero de juego es cooperador (cuando en realidad es desertor) y exhibirá un comportamiento cooperador.

Actualización de la probabilidad cooperativa (p_c)

Finalmente, después de estimar las consecuencias de sus decisiones (ganancias del último juego en que participaron); los conductores deciden si mantener, incrementar o decrementar su apego a un comportamiento cooperativo o desertor. Esto permite que los agentes vayan aprendiendo acerca de las tendencias de los agentes que están dentro de su entorno. Esta actualización también permite simular el hecho de que, incluso conductores extremadamente apegados a cooperar (o de tractar) pueden encontrarse en circunstancias en que tengan que elegir acciones opuestas a sus creencias, por ejemplo: por distracción o por fallas mecánicas (luz intermitente averiada). Al igual que los agentes descritos en (Cortés-Berrueco et al., 2014), los conductores actualizarán su valor de p_c utilizando la expresión:

$$p_{cn} = p_{cn} + \Delta p_{cn}$$

Donde Δp_{cn} se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta p_{cn} = \begin{cases} +0.01 & \text{si } (\text{comportamiento}_n(t) == \text{cooperativo}) \text{ and} \\ & (\text{pago}_n(t-1) < \text{pago}_n(t)) \\ +0.01 & \text{si } (\text{comportamiento}_n(t) == \text{desertor}) \text{ and} \\ & (\text{pago}_n(t-1) > \text{pago}_n(t)) \\ -0.01 & \text{si } (\text{comportamiento}_n(t) == \text{desertor}) \text{ and} \\ & (\text{pago}_n(t-1) < \text{pago}_n(t)) \\ -0.01 & \text{si } (\text{comportamiento}_n(t) == \text{cooperativo}) \text{ and} \\ & (\text{pago}_n(t-1) > \text{pago}_n(t)) \end{cases}$$

en donde $\text{comportamiento}_n(t)$ denota el tipo de acción (cooperativa o desertora) ejecutada en el paso de tiempo actual (t) por el conductor del vehículo n , $\text{pago}_n(t-1)$ indica la ganancia obtenida por el vehículo n en el paso de tiempo previo ($t-1$) al paso de tiempo actual (t) y finalmente, $\text{pago}_n(t)$ representa la ganancia obtenida en el paso de tiempo actual (t) por el vehículo n .

Después de la actualización los conductores deben verificar que no hayan alcanzado valores de p_c inválidos para la dinámica del sistema:

- 1: **if** $p_c \leq 0.00$ **then**
- 2: $p_c = 0.01$;
- 3: **else**
- 4: **if** $p_c \geq 1.00$ **then**
- 5: $p_c = 0.99$;
- 6: **end if**
- 7: **end if**

Es decir, se debe cumplir:

$$0 < p_c < 1$$

3.4. Metodología y análisis de las simulaciones

3.4.1. Metodología

Debido a que no se tiene información sobre las probabilidades reales de cooperación al conducir, barrimos el espacio de valores de los pará-

metros para estudiar la dinámica resultante. Todos los resultados aquí presentados se obtuvieron de promediar la información obtenida de diez simulaciones que comparten los mismos valores iniciales en parámetros. Debido a que las desviaciones estándar de estas 10 simulaciones fueron bajas (la más grande no superaba el 0.02 %), éstas no se incluyen dentro de los resultados. La información obtenida de cada una de las diez simulaciones consiste en promediar los últimos 10,000 valores de las variables observadas. Para cada simulación, se ejecutaron 30,000 iteraciones antes de realizar la observación con la intención de dejar fuera de ésta los estados transitorios. Cada iteración del modelo representa un segundo. Así, el tiempo de observación tiene una duración de 2.7 horas, que es precedido por un periodo de 8.3 horas para relajación del sistema.

Para la sección GLAI del modelo utilizamos los siguientes valores en los parámetros: $L = 120$ celdas, $\Delta x = 5.0$ metros (resultando en una carretera de dos carriles de un solo sentido con condiciones de fronteras cíclicas con una longitud de 600 m para cada carril), tamaño del vehículo $car\ size = 5m$, $R_d = 1.00$, $R_0 = 0.8$, $R_s = 0.01$. No se consideraron longitudes de carril más largas debido a limitaciones de la plataforma donde se realizó la implementación del modelo (NetLogo). En la decisión de los valores a explorar de L también influyeron los juegos utilizados en las interacciones de los conductores, en particular, selección por parentesco y reciprocidad indirecta. Aunque es posible implementar estos juegos en carreteras más largas, es difícil conceptualizar que conductores al inicio de la carretera estén pendientes del comportamiento de conductores localizados a más de dos kilómetros de distancia (en este trabajo no estamos considerando aún escenarios de comunicación vehículo-vehículo). Además se realizaron simulaciones para $L = 120, 130$ y 300 celdas que no mostraron diferencias significativas en términos de desempeño del tráfico ni en términos de evolución de la cooperación.

Para *densidad* (cantidad de vehículos por unidad de espacio), exploramos los siguientes valores: 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.10, 0.11, 0.12, 0.13, 0.14, 0.15, 0.16, 0.17, 0.18, 0.19, 0.20, 0.21, 0.22, 0.23, 0.24, 0.25, 0.26, 0.27, 0.28, 0.29, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 y 0.60. Estos valores en vehículos por kilómetro (veh/km), respectivamente, corresponden a: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50, 52, 54, 56, 58, 60, 70, 80, 90, 10 y 120. Todos los vehículos fueron colocados aleatoriamente a lo largo de

la carretera evitando colisiones (fracciones de dos vehículos ocupando el mismo espacio). Para la implementación de velocidades máximas heterogéneas utilizamos una distribución gaussiana con una distribución estándar de 0.7 y una $|v_{max}| = 6 \text{ celdas/tick}$ (equivalente a 30 m/s y a 108 km/h). Para evitar colisiones, todos los vehículos comienzan la simulación con $v = 0 \text{ celdas/tick}$.

Para nuestra primera descripción de la evolución de la cooperación, queremos conocer el impacto que tiene la fracción inicial de cooperadores. Utilizamos $ip_cC = 0.99$ ($ip_cC := p_c$ inicial para conductores cooperadores), $ip_cD = 0.45$ ($ip_cD := p_c$ inicial para conductores desertores) y variamos la *fracción-inicial-de-cooperadores* con los valores: 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %. Los valores $ip_cD = 45$ e $ip_cC = 98$ se eligieron tomando en cuenta los resultados mostrados en (Cortés-Berrueco et al., 2013).

Una vez que encontramos que la evolución de la cooperación siguió el mismo patrón sin importar la fracción inicial de conductores cooperadores, en los siguientes análisis, utilizamos los mismos valores (mencionados anteriormente) para ip_cC , ip_cD y una *fracción-inicial-de-cooperador* = 50 %.

Para el estudio del impacto de las características utilizadas por las reglas de comportamiento (selección por parentesco y reciprocidad indirecta), obtuvimos la evolución de la cooperación para diferentes valores de r y q respectivamente. Los valores utilizados fueron: 0.25, 0.5, 0.75 y 1.

Índice de movilidad

Se introdujo un índice de movilidad calculado con la siguiente expresión:

$$f(td, st, t, ted, ts, v) = \begin{cases} \tanh \left[2.5 \left(\frac{(td-st) - \left(\frac{t-ted}{v}\right) + (ts-st)}{td-st} \right) \right], & v > 0 \\ \tanh \left[2.5 \left(\frac{(td-st) - (ts-st)}{td-st} \right) \left(\frac{t-ted}{t} \right) \right], & v = 0 \end{cases}$$

Se planteó este índice para poder tener una medida del desempeño de la vía desde la perspectiva de los conductores; para esto asumimos que los conductores, al iniciar un recorrido, tiene un punto de origen y un punto de destino. Por lo tanto, existe una distancia a recorrer a la que denominaremos t por la palabra en el idioma inglés que

se utiliza para esta distancia a recorrer *travel*. Los conductores reales generalmente tienen una idea estimada de cuánto tiempo les llevara completar su recorrido, un tiempo límite (*td* por el concepto en inglés *travel deadline*). Para los experimentos se usó $t = 1.2 \text{ km}$ y $td = 500 \text{ s}$. Utilizando la velocidad instantánea (v) de un vehículo en un momento dado y la distancia ya recorrida (*ted* por *traveled*), calculamos cuantos pasos de tiempo necesitará el conductor para completar su viaje. Si se suman el tiempo necesario para completar el recorrido y el paso de tiempo actual (ts , *time step*) se obtiene el tiempo de recorrido total esperado. Comparando ese tiempo de recorrido total esperado con el tiempo límite (td) se obtiene una proporción de dicha diferencia.

Cuando un conductor termina un recorrido, inmediatamente iniciará uno nuevo (1.2 km). Para mantener las variables de tiempo relativas al recorrido actual, se debe tomar en cuenta el paso de tiempo inicial (st , *starting time*).

Todos los cálculos mencionados anteriormente son válidos cuando $v > 0$ pero una división entre cero surge cuando $v = 0$. Para superar esto, se utiliza una expresión diferente para vehículos detenidos. Se empieza por verificar la diferencia entre el tiempo límite (td) y el tiempo ya utilizado por el vehículo (ts), la proporción entre dicha diferencia y el tiempo límite (td) se obtiene para saber cuánto tiempo le queda aún al conductor para poder completar su recorrido. Conforme el tiempo pase y el vehículo siga detenido, este factor se decrementará. Finalmente, este factor en decremento se multiplica por la proporción del recorrido que ya ha sido completado.

Para ambos casos, el resultado es evaluado usando la función $\tanh(x)$ para obtener una caracterización sigmoideal y el coeficiente 2.5 es utilizado para fijar la imagen de la función en el intervalo $[-1, 1]$. De esta forma un índice de movilidad $im = 1$ señala circunstancias en que los conductores llegaron a su destino antes de lo esperado, $im = 0$ indica que los conductores llegaron justo a tiempo a su destino y $im = -1$ señala que el conductor se encuentra retrasado para llegar a su destino.

3.4.2. Resultados de las simulaciones

Como se mencionó anteriormente, se realizaron una serie de simulaciones para estudiar la evolución de la cooperación y el desempeño del tráfico vehicular correspondiente. Para hacer esto, se barrió el espacio de parámetros. Los cambios encontrados son graduales, pero se encon-

traron cambios extremos que son más sencillos de estudiar y entender. Para tener un mejor entendimiento del desempeño del tráfico vehicular se agregaron, dentro de las comparaciones, los resultados obtenidos de la implementación del modelo GLAI original (Guzmán et al., 2015) que está inspirado en estudios empíricos (Lárraga y Alvarez-Icaza, 2010).

Como puede observarse en la Fig. 3.2, la evolución de la cooperación sigue el mismo patrón sin importar la variación en la fracción inicial de cooperadores. Como siguiente fase, se analizó el impacto de las características que son aprovechadas por las reglas de comportamiento que, se consideró, pudieran adaptarse mejor a situaciones de tráfico real: selección por parentesco y reciprocidad indirecta. Para estas reglas se exploraron diferentes valores (0.25, 0.50, 0.75 y 1) para r (probabilidad de estar relacionados para la regla selección por parentesco) y los mismo valores para q (reconocimiento social para la regla de reciprocidad indirecta).

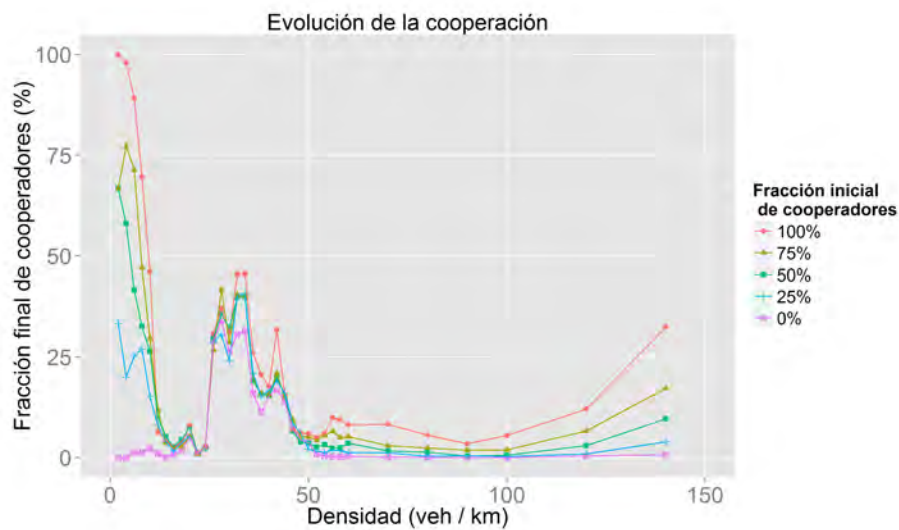


Figura 3.2: Resultados de la evolución de la cooperación para diferentes densidades y diferentes fracciones iniciales de conductores cooperadores.

En las Fig. 3.3 - 3.5, que muestran la evolución de la cooperación para diferentes reglas de comportamiento, puede identificarse un patrón de evolución de la cooperación para los valores de densidad en los que ocurre el flujo sincronizado. Debido al enfoque de evolución de la cooperación utilizado, se esperaba encontrar condiciones en las que la

cooperación prevaleciera. Aún cuando el patrón de comportamiento encontrado difiere de lo esperado, éste es interesante. El comportamiento encontrado sugiere que existen condiciones en las que los conductores se auto-organizan para alcanzar la evolución de la cooperación y optimizar la movilidad a pesar de la naturaleza codiciosa de las reglas de cambio de carril y de las matrices de pago que los conductores usan como base para sus interacciones locales (las reglas de cambio de carril dictan a los conductores buscar incrementar su velocidad o al menos mantenerla; las matrices de pago “recompensan” a los conductores por buscar este incremento de velocidad y son “castigados” cuando no logran mantener o incrementar su velocidad). Para explorar más este fenómeno se obtuvieron los promedios de velocidad de las reglas de comportamiento anteriormente mencionadas con una fracción inicial de cooperadores del 50 % y usando los parámetros ya especificados.

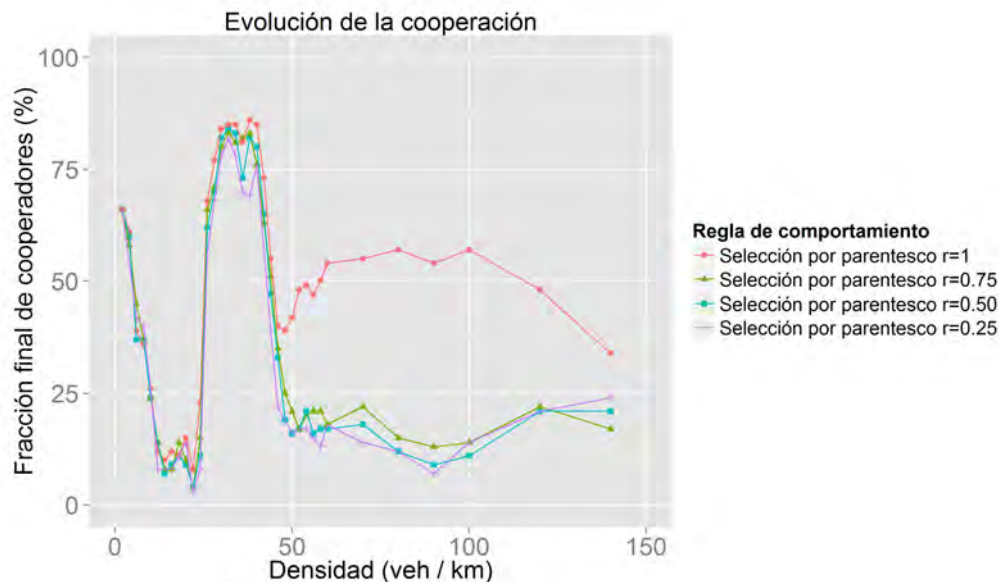


Figura 3.3: Resultados de la evolución de la cooperación de la regla de comportamiento selección por parentesco para diferentes densidades y probabilidades de estar relacionados crecientes.

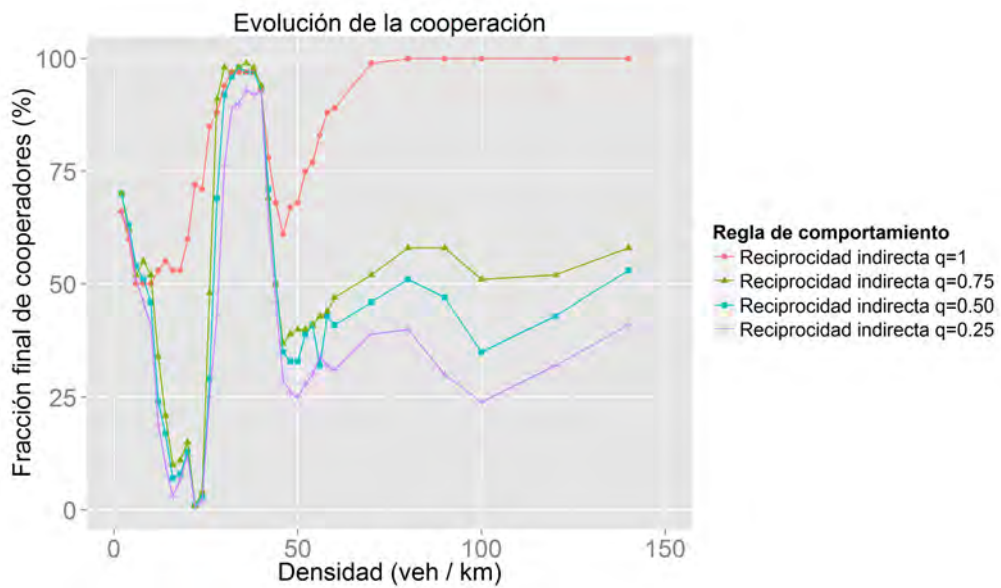


Figura 3.4: Resultados de la evolución de la cooperación de la regla de comportamiento para diferentes densidades y reconocimiento social creciente.

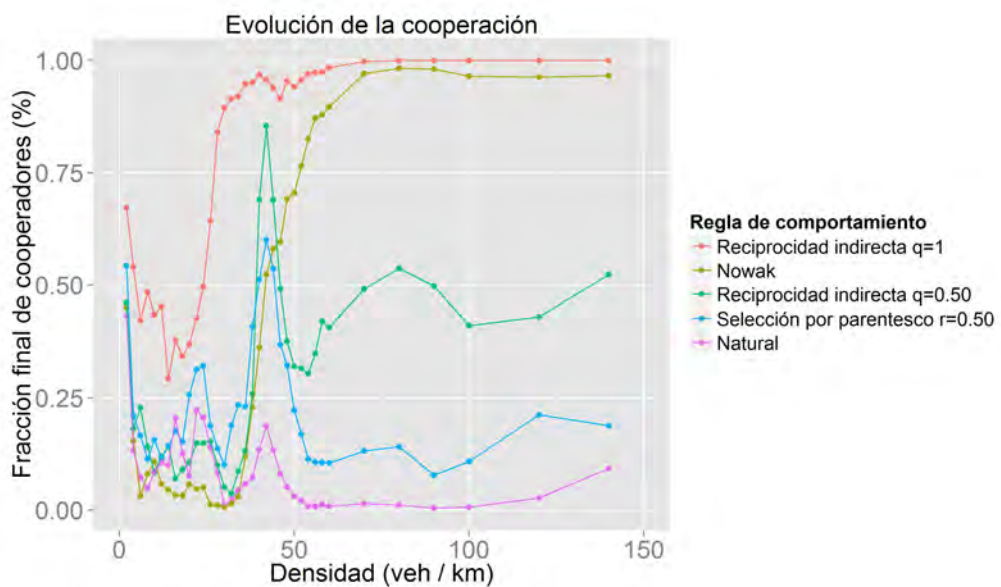


Figura 3.5: Comparación entre diferentes comportamientos. Cada uno de los comportamientos mostrados corresponde a una matriz de pago diferente.

Si se pone atención a las Fig. 3.2 y Fig. 3.6, se puede observar que la diferencia entre la velocidad promedio de desertores y cooperadores decrece, mientras la fracción de cooperadores se incrementa. Esta relación inversa se ilustra claramente por la caída significativa de la velocidad de los cooperadores para las densidades cercanas a 34 veh/km. Esta caída provoca una gran diferencia entre las velocidades de desertores y cooperadores que conduce a una caída en la fracción de conductores cooperadores en la población total. Resulta interesante que esta relación solamente es válida para valores de densidad en los que ocurre el flujo sincronizado (Fig. 3.7 y Fig. 3.8).

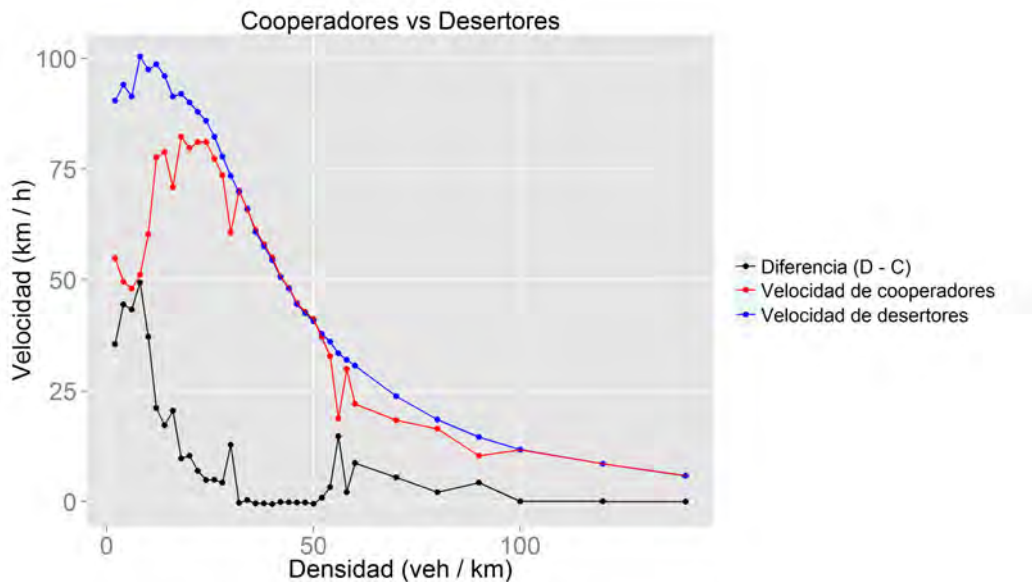


Figura 3.6: Velocidades de conductores cooperadores y desertores.

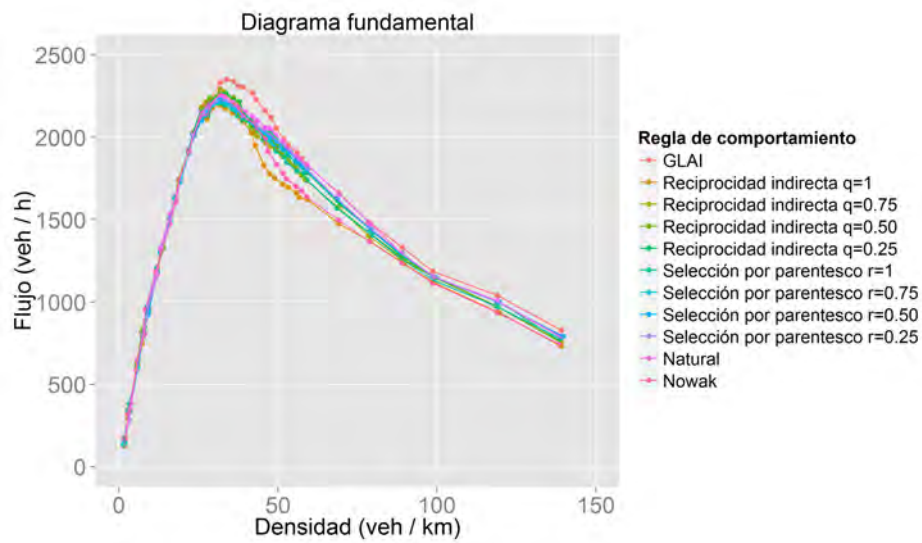


Figura 3.7: Diagrama fundamental de cada uno de los comportamientos estudiados. Una vista detallada de la fase de flujo sincronizado puede encontrarse en la Fig. 3.8.

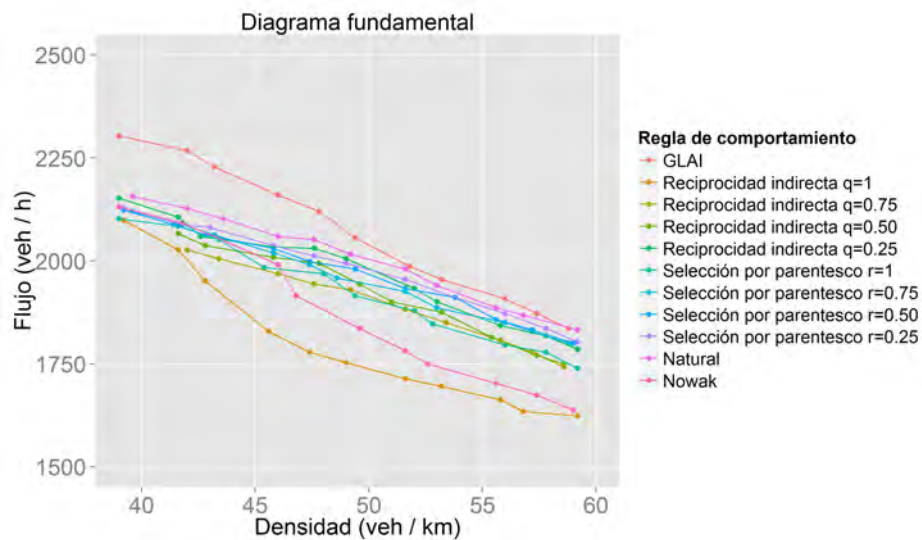


Figura 3.8: Vista detallada a la fase de flujo sincronizado de los diagramas fundamentales (3.7).

En valores de densidades ubicados entre 10 y 20 veh/km se observa un decremento en la velocidad de los cooperadores. Este decremento puede deberse a diversos factores: primero, a bajas densidades hay pocos vehículos cooperativos, por lo tanto las variaciones de velocidad son más significativas. Otro factor es que no todos los vehículos comparten la misma velocidad máxima (v_{max}). El valor más bajo posible es $v_{max} = 81 \text{ km/h}$. Además, al facilitar los cambios de carril, los vehículos cooperadores pueden disminuir su velocidad (se puede observar que los vehículos llegan a disminuir su velocidad hasta alcanzar 45 km/h al facilitar cambios de carril). También puede influir que los conductores del modelo tienen visión ilimitada, es decir, puede ocurrir que un conductor cooperador quiera cambiar de carril y un segundo conductor lo vea aunque haya una longitud L entre ellos. Esto provoca que el segundo vehículo intente ayudar al primer vehículo a cambiar de carril. Si el primer vehículo, por alguna razón, no realiza el cambio de carril, el segundo vehículo continuará disminuyendo su velocidad.

Para densidades cercanas a flujo sincronizado, en la Fig. 3.6, es posible identificar condiciones de estado de movimiento coherente (Helbing y Huberman, 1998): los cooperadores y los desertores tienen la misma velocidad a pesar de que los vehículos en ambos grupos tienen valores heterogéneos de velocidad máxima (v_{max}).

Para verificar que, efectivamente, esté ocurriendo un estado de movimiento coherente, se evaluó el índice de movilidad (im) propuesto. Es pertinente recordar aquí que este índice tiene valores en el intervalo $[-1, 1]$, siendo $im = 1$ en situaciones en que el conductor llega con tiempo de sobra a su destino, $im = 0$ circunstancias en las que el conductor llega justo a tiempo a su destino, e $im = -1$, señala que el conductor llega tarde a su destino.

Las Fig. 3.9 y Fig. 3.10 muestran que a densidades en que los cooperadores y desertores tienen la misma velocidad (3.6), los conductores presentan el mejor valor del índice de movilidad confirmando así que los juegos que utilizan los conductores maximizan esta variable. También apoya la hipótesis de que existe un estado de movimiento coherente al mostrar que para dichas densidades de maximiza la movilidad.

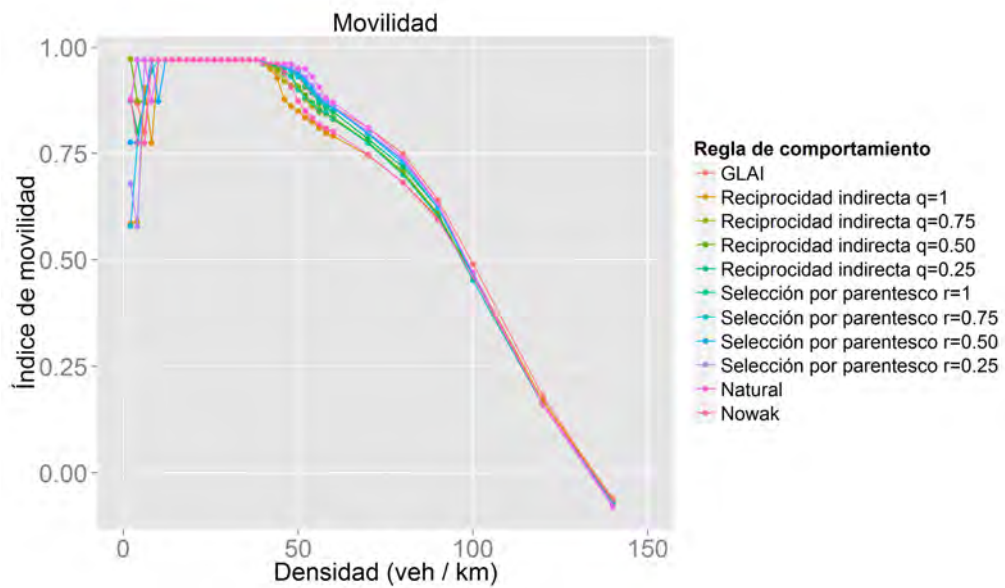


Figura 3.9: Resultados del índice de movilidad para cada uno de los comportamientos estudiados. Una vista detallada de la fase de flujo sincronizado puede encontrarse en la Fig. 3.10.

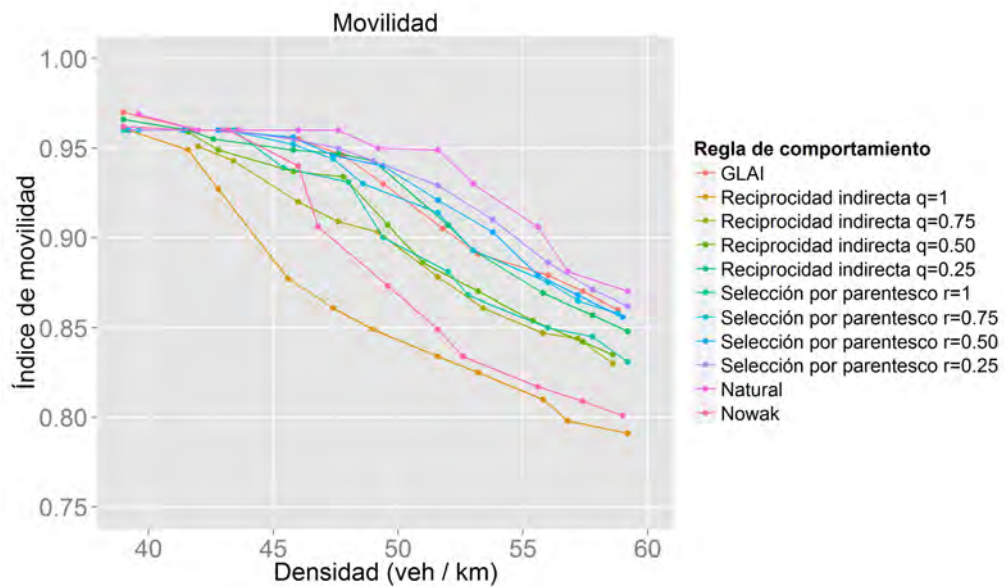


Figura 3.10: Vista detallada a la fase de flujo sincronizado del índice de movilidad (3.9).

Para aportar más elementos que puedan confirmar el estado de movimiento coherente, se exploraron las gráficas espacio-temporales del modelo GLAI original y diferentes modelos de comportamiento implementados en el modelo aquí presentado para diferentes valores de densidad. En la Fig. 3.11 se presentan los tres estados del flujo vehicular (flujo libre, flujo sincronizado y congestión) del modelo propuesto utilizando la regla Comportamiento Natural. Cada fila (horizontal) de puntos representa la posición instantánea de los vehículos que se encuentran desplazándose hacia la derecha. Las filas sucesivas representan la posición de los vehículos en pasos de tiempo sucesivos. Mientras más oscuro sea el punto en la gráfica la velocidad del vehículo estará más cerca a $v = 0$.

En la Fig 3.12 se presentan gráficas espacio-temporales para un comportamiento altamente cooperativo (Reciprocidad Indirecta con $q = 1$), el comportamiento del modelo GLAI original y el comportamiento con movilidad mejorada (Comportamiento Natural) con una misma densidad ($densidad = 50 \text{ veh/km}$). Se puede observar que el comportamiento altamente cooperativo (que tiene el peor índice de movilidad en la Fig. 3.9) presenta ambos carriles con condiciones de congestión (Fig. 3.12 a-b). El modelo de comportamiento del modelo GLAI original (índice de movilidad promedio en la Fig. 3.9) presenta su carril izquierdo en condiciones de congestión (3.12 c) y su carril derecho en condiciones de flujo sincronizado (3.12 d). Mientras que la regla de comportamiento natural (aquel comportamiento con el mejor índice de movilidad en la Fig. 3.9) presenta sus dos carriles en condiciones de flujo sincronizado (3.12 e-f).

Además de las condiciones de seguridad que un estado de movimiento coherente pueda inducir (Helbing y Huberman, 1998), muchas de las regulaciones de tráfico urbano promueven comportamientos seguros (por ejemplo: el uso de luces direccionales y facilitar el cambio de carril a vehículos con luces direccionales activas). Al incluir algunos de estos comportamientos (etiquetados como comportamientos cooperativos) se espera que los modelos de comportamiento altamente cooperativos (por ejemplo: Reciprocidad Indirecta con $q = 1$) presenten mejores condiciones de seguridad. Como el modelo presentado no toma en cuenta colisiones, para poder medir la seguridad de los diferentes comportamientos, se calculó la probabilidad de que un vehículo tenga que utilizar frenado de emergencia como consecuencia de un cambio de carril de algún otro vehículo. El razonamiento detrás de esto es que al

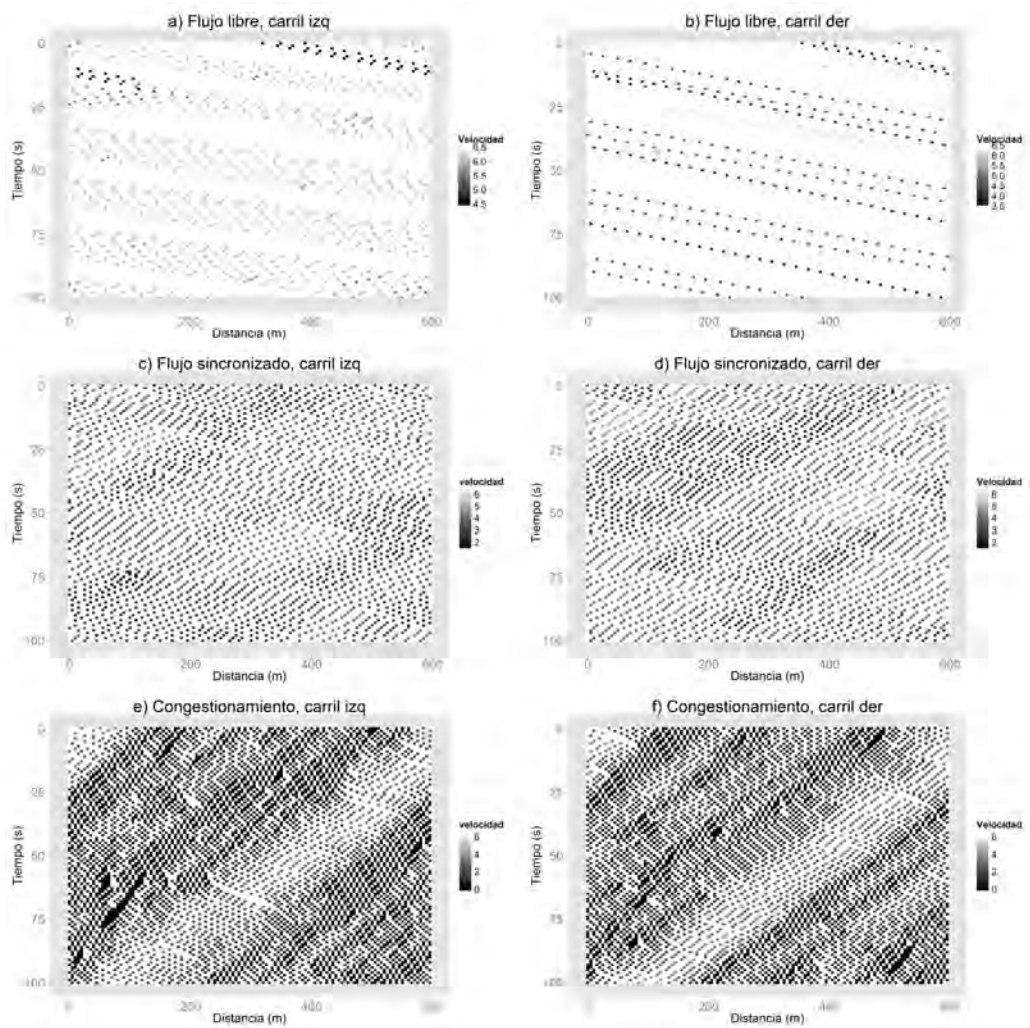


Figura 3.11: Gráficas espacio-temporales del modelo propuesto con el comportamiento (Comportamiento Natural) que presenta mejor desempeño en movilidad. (a, b) Flujo libre, $densidad = 10 \text{ veh/km}$; (c,d) flujo sincronizado, $densidad = 40 \text{ veh/km}$; y (e, f) congestionamiento, $densidad = 80 \text{ veh/km}$. La imagen de la izquierda (derecha) corresponde al carril izquierdo (derecho).

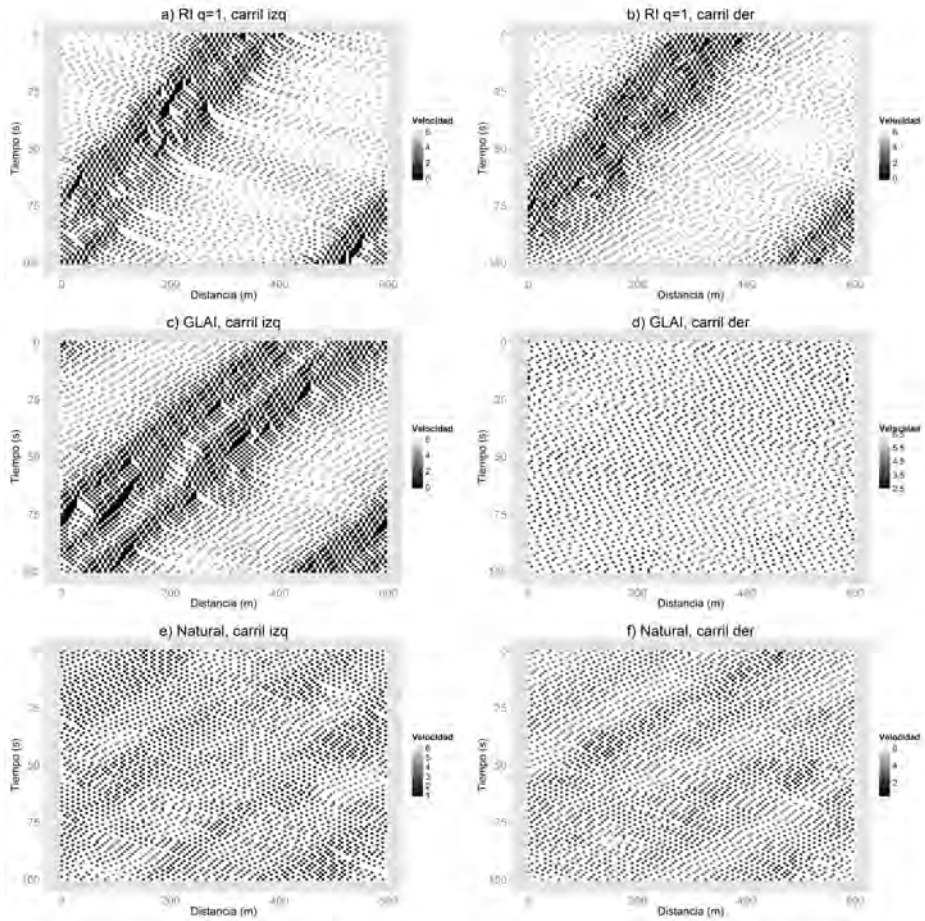


Figura 3.12: Gráficas espacio-temporales para (a,b) Reciprocidad Indirecta con $q = 1$ (comportamiento de alta cooperación y movilidad más baja), (c, d) comportamiento del modelo GLAI original (comportamiento estocástico con movilidad media), y (e,f) regla de comportamiento natural (comportamiento altamente adaptativo con la mejor movilidad). Todas las gráficas utilizan el mismo valor de densidad ($densidad = 50 \text{ veh/km}$). La imagen de la izquierda (derecha) corresponde al carril izquierdo (derecho).

incrementarse la cantidad de frenados de emergencia se incremente la posible incidencia de accidentes. En la Fig. 3.13 muestra precisamente esta probabilidad para Reciprocidad Indirecta con $q = 1$ (mayor proporción de conductores cooperadores) y para comportamiento Natural (menor proporción de cooperadores).

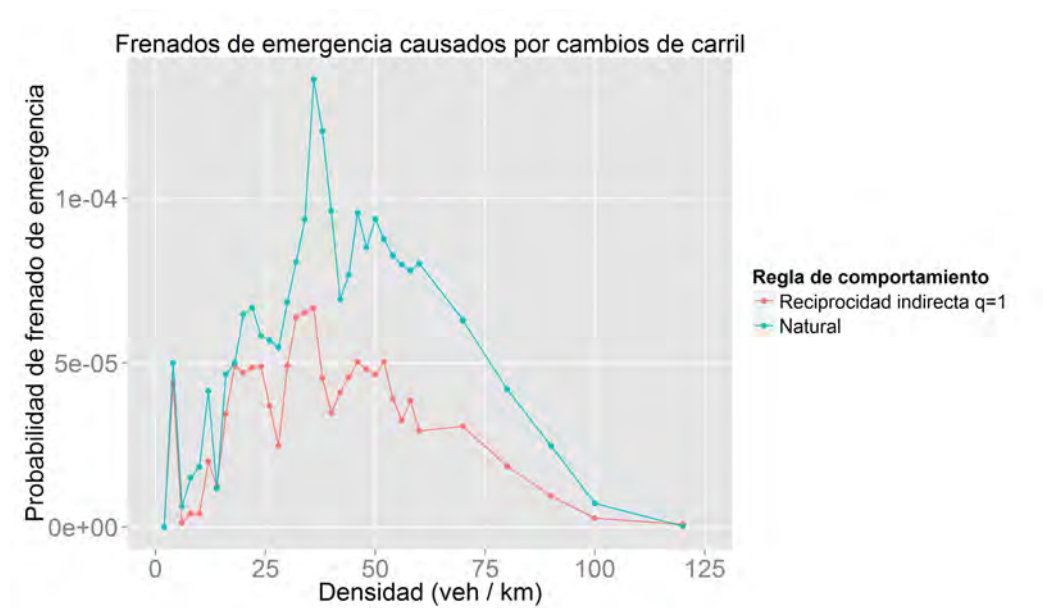


Figura 3.13: Probabilidad de frenados de emergencia causados por cambios de carril para Reciprocidad Indirecta con $q = 1$ y comportamiento Natural.

3.5. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se expuso la principal aportación de la investigación realizada. Se describió detalladamente un modelo de tráfico vehicular enfocado en los cambios de carril que incorpora elementos de toma de decisiones mediante el uso de elementos de la teoría de juegos.

El modelo utiliza como un base un simulador realista de tráfico vehicular (Guzmán et al., 2015). Este simulador incluye: cambios de carril en carreteras de dos carriles que siguen el mismo sentido, distancias de seguimiento seguro basadas en las velocidades relativas de los vehículos y reglas incentivas y de seguridad de cambio de carril basadas en estas distancias de seguimiento seguro. Todo lo anterior bajo el

paradigma de los autómatas celulares que permite implementaciones computacionales de bajo costo.

El modelo resultante conserva todas estas características pero bajo el paradigma de los modelos basados en agentes. En el capítulo se describió la forma como se incorporaron los elementos de toma de decisiones que aparecen en los modelos del capítulo 1.

Se describió la metodología con la que se obtuvieron los resultados mostrados. En éstos se pueden apreciar efectos importantes al variar el comportamiento de los agentes. El impacto de los comportamientos estudiados tiene alcance sobre: la evolución de la cooperación del sistema, el desempeño del tráfico vehicular (flujo), la movilidad que puede apreciarse sobre la vía y sobre las condiciones de seguridad.

Si bien en este capítulo se puede encontrar información interesante capaz de dar pie a futuras investigaciones, no queda patente la forma como el comportamiento de los conductores podría afectar el desempeño de algunas de las soluciones propuestas para mejorar el desempeño del tráfico vehicular en zonas de conflicto. Es por esta razón que en el próximo capítulo se abordará la modelación de un escenario inspirado en una zona conflictiva de la Ciudad de México, algunas posibles soluciones y cómo se ven afectadas estas por los diferentes comportamientos que ya fueron introducidos en el presente capítulo.

Capítulo 4

Estudio de caso: Modelado de un escenario conflictivo

En este capítulo se planteará un caso de estudio donde la intervención sea necesaria y las soluciones propuestas puedan verse afectadas por los diferentes comportamientos que los conductores puedan exhibir. Se comenzará por analizar las condiciones iniciales del escenario; posteriormente se expondrán algunas posibles soluciones y se implementarán algunas de ellas. Por medio de simulaciones que incluyan nuestro marco de trabajo se analizará la eficiencia de las soluciones implementadas. Se expondrán los resultados obtenidos y finalmente se discutirán con el objetivo de obtener la mejor solución. El contenido de este capítulo fue presentado en la Conference on Complex systems (CCS) 2016.

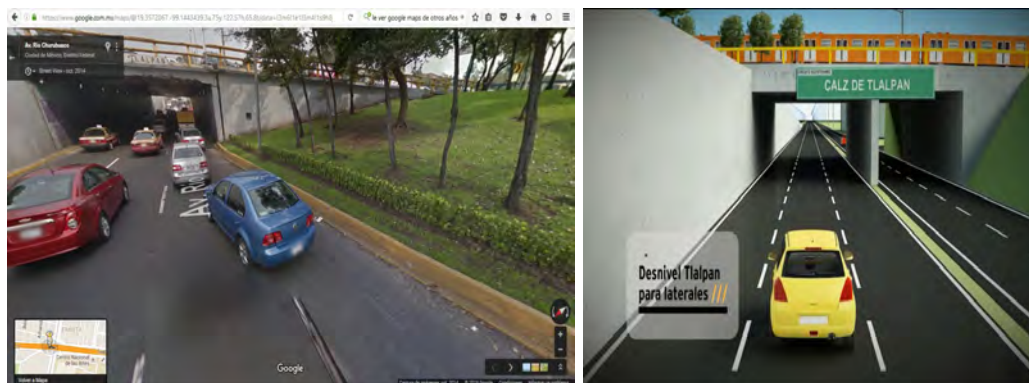
4.1. Problemática

Con el pasar del tiempo la población de la Ciudad de México ha crecido más allá de lo planeado. Es por esta razón que en muchas ocasiones las vías de circulación para vehículos han sido excedidas por el creciente parque vehicular. Tal es el caso de uno de los cruces más utilizados al sur de la ciudad Fig. 4.1. Este cruce une dos vías principales: calzada de Tlalpan que uno el sur de la ciudad con el centro y avenida Río Churubusco que forma parte del Circuito Interior (una vía que rodea al centro de la Ciudad de México).



Figura 4.1: Cruce de Churubusco y Tlalpan encontrado en la Ciudad de México.

A pesar de que se sabe que se realizaron estudios sobre el aforo de vehículos en este cruce, la información no se hizo pública. Sin embargo, parece ser que el estudio confirmó lo que puede apreciarse de forma empírica: la configuración de la infraestructura de este cruce afecta en gran medida el desempeño de la vía. Esto se puede inferir a partir de las obras que actualmente se realizan (Fig. 4.2).



(a) Antes

(b) En construcción

Figura 4.2: a) Configuración original del cruce de Tlalpan y Churubusco. b) Resultado final que se espera de las modificaciones que se están realizando actualmente (29 de noviembre de 2016).

Como puede observarse en la Fig. 4.2 se piensa agregar dos carriles y aislar los tres carriles originales de la entrada/salida de/hacia Tlalpan.

Esta modificación se está llevando en ambos sentidos (poniente-oriente y oriente-poniente) de la avenida Río Churubusco.

4.1.1. Analizando la configuración original de la infraestructura

En la Fig. 4.3 se muestra un mapa del cruce original. Con ayuda del mapa, a continuación, se enumerarán las problemáticas que presenta la configuración de dicho cruce:

- Se puede observar que tanto en el sentido oriente-poniente (O-P) como en el sentido poniente-oriente (P-O) la avenida Río Churubusco consta de tres carriles centrales y dos carriles auxiliares (comúnmente llamados laterales). Al llegar al cruce con la calzada de Tlalpan, los carriles auxiliares desaparecen incorporando a los vehículos que quieren pasar al otro lado de la calzada de Tlalpan a los carriles principales de la avenida. Esta eliminación de los carriles auxiliares se realiza sin aumentar el número de carriles centrales durante el cruce, provocándose de esta manera un cuello de botella. En el sentido O-P esta incorporación ocurre en el punto **A** y vuelve a haber carriles auxiliares hasta el punto **B**. En el sentido P-O ocurre lo mismo desde el punto **F** y reaparecen los carriles auxiliares hasta el punto **I**.
- En el sentido P-O, la incorporación de los carriles auxiliares a los carriles centrales (punto **F**) se encuentra a una distancia pequeña de la incorporación de la calzada de Tlalpan a la avenida Río Churubusco(**G**). Esto puede observarse claramente en la Fig. 4.4 (a).
- En el mismo sentido (P-O), la incorporación de la calzada de Tlalpan hacia la avenida Río Churubusco está cerca de la incorporación de la avenida Río Churubusco a la calzada de Tlalpan. Esto se observa en la Fig. 4.4 (b).
- Es bien conocido que las maniobras de incorporación entre carriles o diferentes calles promueven perturbaciones en el tráfico vehicular. En estas zona (puntos **F**, **G**, **H**) tenemos un gran número de maniobras en un espacio muy reducido.

- En el sentido O-P también tenemos una incorporación de carriles auxiliares a carriles centrales (punto **B**) cercana a la incorporación de la calzada de Tlalpan hacia la avenida Río Churubusco (punto **C**) pero, a diferencia del caso anterior, existe más distancia entre estos puntos. Esto puede apreciarse en la Fig. 4.4 (c) ya que estando desde el punto **B** no alcanza a verse el punto **C**.
- En el sentido O-P, al igual que en el otro sentido, la incorporación de la calzada de Tlalpan a la avenida Río Churubusco está cerca de la incorporación de Río Churubusco a calzada de Tlalpan. Se puede observar esto en la Fig. 4.4 (d).
- En el sentido O-P también encontraremos que en la zona de los puntos **B**, **C** y **D** podemos tener un gran número de maniobras en un espacio reducido, aunque no tan reducido como en el sentido P-O.

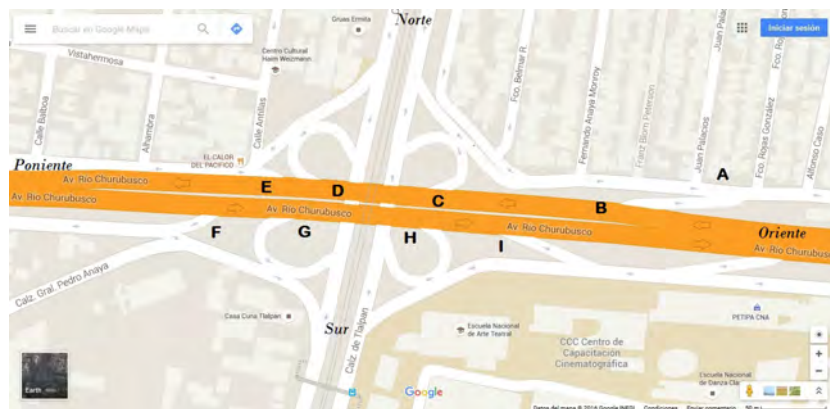


Figura 4.3: Mapa del cruce de Churubusco y Tlalpan señalizado con puntos de interés.

4.2. Modelado del escenario

El escenario que se piensa modelar para su estudio consta de tres carriles centrales, dos carriles auxiliares y entradas/salidas entre carriles y con otras vías.

Como se mencionó anteriormente, el modelo presentado hereda algunas limitaciones del modelo que se usó como base (modelo GLAI)



(a) Puntos F y G



(b) Puntos G y H



(c) Punto B



(d) Puntos C y D

Figura 4.4: Imágenes de los puntos problemáticos encontrados en el cruce de calzada de Tlalpan con avenida Río Churubusco en la Ciudad de México. a) visualización de los puntos F y G. b) Visualización de los puntos G y H. c) Visualización del punto B. d) Visualización de los puntos C y D. Todos los puntos se encuentran referenciados de la Fig. 4.4.

(Guzmán et al., 2015). El escenario se puede reducir si logramos abstraer y aislar el problema que queremos estudiar, que sería: el impacto que tiene la distancias entre entradas y salidas a los carriles centrales. De esta forma no es del todo necesaria la inclusión de dos vías incorporándose; bastaría con colocar una entrada y una salida a los carriles del modelo GLAI y agregar por lo menos un carril auxiliar.

A pesar de la reducción que se podría hacer al escenario, el modelo GLAI solamente contempla dos carriles a diferencia de los cinco que tiene el escenario que pretendemos modelar y de los cuatro carriles a los que podríamos llegar después de la reducción.

4.2.1. Extendiendo el modelo GLAI

A pesar de que las reglas de cambio de carril del modelo GLAI original son bastante robustas, al aumentar a más de dos carriles es necesario realizar algunos ajustes a las reglas de cambio de carril (para realizar estas extensiones al modelo GLAI se colaboró con el equipo que desarrolló el modelo GLAI (Guzmán et al., 2015) que a su vez está fundamentado en el modelo LAI (Lárraga y Alvarez-Icaza, 2010)). Recordando la estructura original de los cambios de carril en el modelo GLAI se tiene que:

Cambio de carril izquierdo: un vehículo que va a cambiar al carril izquierdo debe considerar al vehículo delante de él en el mismo carril (f), al vehículo delante de él en el carril izquierdo (lf) y al vehículo detrás de él en el carril izquierdo (lb).

- Paso 1: Inicializar. Para cada vehículo n determinar sus vecinos f , lf , rf , lb , rb y hacer $cl_n = listo$.
- Paso 2: Determinar el cambio de carril (valor de cl_n).

Criterio incentivo

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

ó

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

Criterio de seguridad

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

- Paso 3: Realizar cambio de carril

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

Cambio de carril derecho: un vehículo que va a cambiar al carril derecho debe considerar al vehículo delante de él en el mismo carril (f), al vehículo delante de él en el carril derecho (rf) y al vehículo detrás de él en el carril derecho (rb).

- Paso 1: Inicializar. Para cada vehículo n determinar sus vecinos f , lf , rf , lb , rb y hacer $cl_n = listo$.
- Paso 2: Determinar el cambio de carril (valor de cl_n).

Criterio incentivo

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

Criterio de seguridad

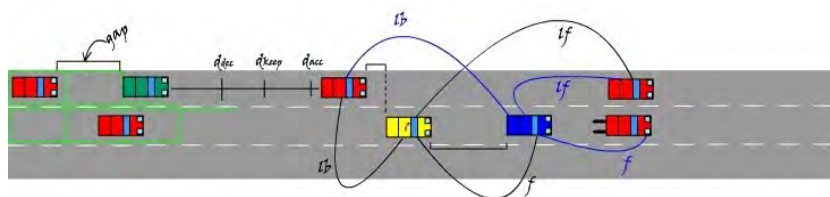
(csd1) Si $gap_{rb,n} \geq d_{dec}(v_{rb}, v_n)$
entonces ($cl_n = der$)

- Paso 3: Realizar cambio de carril

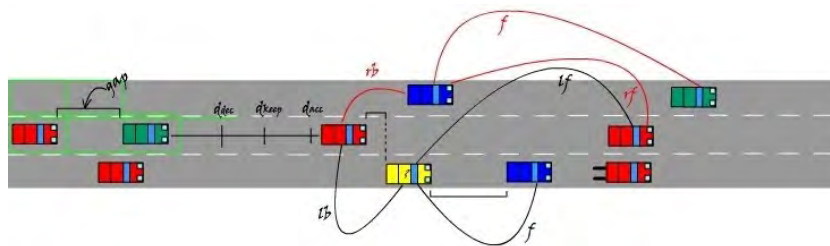
Si $cl_n = der$ entonces el vehículo n cambia al carril de su derecha, con probabilidad p_{change} .

Nuevas reglas de seguridad

Una vez que todos los vehículos tienen un valor $cl_n \in (der, izq, listo)$ aquellos vehículos con $cl_n \neq listo$ tendrán que realizar una verificación extra de seguridad para evitar colisiones al presentarse dos posibles casos Fig. 4.5:



(a) Mismo carril origen, mismo destino



(b) Carril origen opuesto, mismo destino

Figura 4.5: Casos a considerar por las nuevas reglas de seguridad. a) Puede ocurrir una colisión cuando dos o más vehículos que se encuentran en el mismo carril origen quieren cambiar hacia el mismo carril objetivo en áreas cercanas. b) Puede ocurrir una colisión cuando dos o más vehículos que se encuentran en carriles opuestos quieren cambiar hacia el mismo carril objetivo en áreas cercanas.

- El primer caso (Fig. 4.5(a)) ocurre cuando dos o más vehículos, cercanos entre ellos, del mismo carril origen encuentran condiciones incentivas y de seguridad (condiciones de seguridad originales del modelo GLAI) apropiadas para realizar un cambio de carril hacia el mismo carril objetivo. Al estar muy cerca y dependiendo de sus condiciones de velocidad puede ocurrir que al realizar el cambio de carril, uno de los vehículos alcance y colisione al otro.
- El segundo caso (Fig. 4.5 (b)) ocurre cuando dos o más vehículos, cercanos entre ellos, de carriles opuestos (un vehículo se encuentra al lado derecho del carril objetivo y el otro vehículo se encuentra en el lado izquierdo del carril objetivo, siendo el carril objetivo el mismo para ambos vehículos implicados) encuentran condiciones incentivas y de seguridad (condiciones de seguridad originales del modelo GLAI) apropiadas para realizar un cambio de carril hacia el mismo carril objetivo. Al estar muy cerca y dependiendo de sus condiciones de velocidad puede ocurrir que al realizar el cambio de carril, uno de los vehículos alcance y colisione al otro.

Las reglas de cambio de carril englobando la verificación de dichos casos (4.5) quedan de la siguiente forma:

Cambio de carril:

- Paso 1: Inicializar. Para cada vehículo n determinar sus vecinos f , lf , rf , lb , rb y hacer $cl_n = listo$.
- Paso 2: Determinar el cambio de carril (valor de cl_n).

Criterio incentivo

Criterio de seguridad

- Paso 3: Realizar cambio de carril

Si ($cl_n == der$ ó $cl_n == izq$) entonces hacemos $x = cl_n$, $permitido_n = verdadero$ y el vehículo n realizará los siguientes procedimientos:

1. Se crea un conjunto ss con todos aquellos vehículos que pretenden cambiar carril hacia el mismo lado que el vehículo n y que comparten el mismo futuro vehículo sucesor que el vehículo n .

$$ss = (\forall \text{ conductor } i \in p \mid cl_i == x \text{ y } xb_i == xb_n)$$

donde p es la población total de vehículos en la carretera, xb_n corresponde a rb del vehículo n si $cl_n = x = der$. En caso de que $cl_n = x = izq$ entonces xb_n corresponderá a lb del vehículo n . De esta forma se verifica si los vehículos dentro del conjunto ss se cambiarán hacia el mismo carril que n y si tienen el mismo futuro vehículo sucesor.

2. Se crea un conjunto os con todos aquellos vehículos que pretenden cambiar carril hacia el lado opuesto que el vehículo n y que comparten el mismo futuro vehículo sucesor que el vehículo n .

$$os = (\forall \text{ conductor } i \in p \mid cl_i == op(x) \text{ y } xb_i == xb_n)$$

Donde $op(x)$ es una función que nos da el lado contrario al que esté indicando x . Es decir:

$$\begin{aligned} op : \{izq, der\} &\rightarrow \{izq, der\} \\ op(izq) &= der \\ op(der) &= izq \end{aligned}$$

3. Se verifica que ningún vehículo dentro de ss provoque una colisión con el vehículo n al realizar un cambio de carril:

```
for_each (i in ss){
  if (posX_i == posX_n){
    permitido_n=false
  }
  else{
    if(posX_i < posX_n){
      if(gap_i_n < Ddec(v_i,v_n)){
        permitido_n=false
      }
    }
    else{
      if(posX_n < posX_i){
        if(gap_n_i < Ddec(v_n,v_i)){
```

```

                                permitido_n=false
                                }
                            }
                    }
}

```

En el pseudocódigo mostrado $posX_n$ hace referencia a la posición longitudinal del vehículo n sobre la carretera y $posX_i$ hace referencia a la posición longitudinal del vehículo i sobre la carretera. Esta posición longitudinal no toma en cuenta el carril en que se encuentran los vehículos.

4. Si después de pasar por la verificación en el paso anterior aún se tiene que $permitido_n == verdadero$ entonces se continuará con la verificación de que ningún vehículo dentro de os provoque una colisión con el vehículo n al realizar un cambio de carril:

```

for_each (i in ss){
    if (posX_i == posX_n){
        permitido_n=false
    }
    else{
        if(posX_i < posX_n){
            if(gap_i_n < Ddec(v_i,v_n)){
                permitido_n=false
            }
        }
        else{
            if(posX_n < posX_i){
                if(gap_n_i < Ddec(v_n,v_i)){
                    permitido_n=false
                }
            }
        }
    }
}

```

5. Si después de realizar las verificaciones aún se tiene que

$permitido_n == verdadero$ el vehículo realizará el cambio de carril hacia donde indique cl_n . Si se tiene que $permitido_n == falso$, entonces el vehículo no realizará el cambio de carril y hará $cl_n = listo$. Este último se realiza con la intención de que el vehículo no forme parte de los conjuntos ss y os de otros vehículos.

Nota: es importante tomar en cuenta que los pasos 1 y 2 de las reglas de cambio de carril se ejecuten de forma síncrona para al llegar al paso 3 todos los vehículos en condiciones de cambio de carril ya tengan $cl_i \neq listo$.

Comportamientos de entrada y salida

El escenario descrito al inicio del capítulo plantea la entrada y salida de vehículos hacia y de los carriles centrales. Para esto se colocan obstáculos entre dos carriles. Estos obstáculos no permiten el intercambio de vehículos en la zona en la que se encuentran. Esto implica que si existe una zona entre los vehículos antes mencionados, los vehículos podrán pasar de un carril a otro solamente en esas zonas.

Hay algunas variaciones pero en términos generales empíricamente se puede observar que los vehículos reducen su velocidad (frecuentemente hasta 0 km/h) al acercarse a una entrada o salida.

Para lograr modelar los comportamientos antes mencionados es necesario realizar algunas extensiones a ciertas fases de actualización del sistema del modelo LAI (Lárraga y Alvarez-Icaza, 2010).

Incorporación de obstáculos

- Basta con agregar al criterio incentivo la revisión de si hay, o no, un obstáculo en la posición en la que se encuentra el vehículo n que impida realizar el cambio de carril. En caso de que haya un obstáculo, al no cumplirse el criterio incentivo se descarta por completo el cambio de carril.

Factor de división (split factor)

- Para saber qué vehículos realizarán maniobras de entrada/salida se agrega una variable cada vehículo la cual se denomina $split?_n$.

- Cuando $split?_n == verdadero$ indica que si el vehículo n buscará llegar al carril auxiliar. En caso de ya encontrarse en él, el vehículo permanecerá ahí e ignorará la entrada a carriles centrales.
- Cuando $split?_n == falso$ el vehículo n buscará llegar a los carriles centrales. Si ya se encuentra en carriles centrales ignorará la salida al carril auxiliar.

Aproximación a salidas/entradas

- Una vez que sabemos si el vehículo n utilizará una entrada o salida para llegar a donde dicte su variable $split?_n$; el vehículo deberá situarse en el carril donde se encuentre dicha entrada o salida. Para realizar ésto, deben agregarse las siguientes condiciones incentivas:
 1. Si [$comportamiento_n = cooperativo$ y $split?_n = verdadero$ y ($lane_n \neq extDer$ y $lane_n \neq aux$)] entonces el vehículo n tendrá condiciones incentivas para cambiarse a la derecha. Esta condición cubre el caso de los vehículos cooperativos que se encuentren en carriles centrales, en un carril que no es el de extrema derecha (carril en el que se encuentra la salida hacia el carril auxiliar) y se encuentra marcado para utilizar el carril auxiliar. $lane_n$ puede tener los valores $extIzq$ (carril de extrema izquierda), $cent$ (carril central), $extDer$ (carril de extrema derecha) y aux (carril auxiliar).
 2. Si [$split?_n = falso$ y $lane_n = aux$] entonces el vehículo n tendrá condiciones incentivas para cambiarse a la izquierda. Esta condición cubre el caso de los vehículos que se encuentren marcados para ingresar a carriles centrales, que no lo estén ya, y que se encuentren en el carril auxiliar.
- Independientemente de que los vehículos se encuentren en el carril adecuado para salir o entrar, se debe evitar que los vehículos no aceleren si están cerca de la entrada o salida que deben tomar. Para modelar esto se debe modificar el paso S3a del modelo GLAI.

1. **S3a': Aceleración.** El vehículo n utilizará la variable $verificar?_n$ para determinar si seguirá el comportamiento normal del paso S3a o si debe evitar la aceleración para poder tomar una salida o entrada.

$$verificar?_n = \begin{cases} verdadero & \text{si } (split?_n = verdadero \text{ y} \\ & lane_n \neq aux) \\ verdadero & \text{si } (split?_n = falso \text{ y} \\ & lane_n = aux) \\ falso & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Posterior a esto, los vehículos con $verificar?_n = verdadero$ deberán calcular la distancia longitudinal que hay entre ellos y la salida o entrada correspondiente.

$$d_{n,salida} = \begin{cases} dist(posX_n, posX_{salida} - 2) & \text{si } (verificar?_n = ver- \\ & dadero \text{ y } split?_n = \\ & verdadero \text{ y } lane_n \\ & = extIzq) \\ dist(posX_n, posX_{salida} - 1) & \text{si } (verificar?_n = ver- \\ & dadero \text{ y } split?_n = \\ & verdadero \text{ y } lane_n \\ & = cent) \\ dist(posX_n, posX_{salida}) & \text{si } (verificar?_n = ver- \\ & dadero \text{ y } split?_n = \\ & verdadero \text{ y } lane_n \\ & = extDer) \\ dist(posX_n, posX_{entrada}) & \text{si } (verificar?_n = ver- \\ & dadero \text{ y } split?_n = \\ & falso \text{ y } lane_n \\ & = aux) \end{cases}$$

donde la función $dist(x, y)$ indica la distancia (en celdas) que existe entre la proyección sobre el eje X de la posición x y la proyección sobre el eje X de la posición y .

Después de obtener el valor de $d_{n,salida}$ se revisará si dicha distancia permite a los vehículos continuar acelerando aunque pretendan usar la salida o entrada.

$$continuar?_n = \begin{cases} falso & \text{si } (d_{n,salida} < d_{acc_n,salida}) \\ verdadero & \text{si } (d_{n,salida} \geq d_{acc_n,salida}) \end{cases}$$

Finalmente, si $d_n(t) \geq d_{acc_n}$ y $continuar?_n = verdadero$, 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 específica para el vehículo n en el tiempo t .

- Ya que los vehículos no acelerarán, si van a utilizar una salida o entrada, se debe continuar haciendo que los vehículos frenen de manera adecuada al acercarse a una entrada o salida. Para esto se hará uso de las distancias seguras que ya se utilizan desde el modelo LAI. Se necesita hacer dos modificaciones a los pasos originales del modelo LAI:

1. **S3c': Desaceleración.** Se comienza por determinar la distancia del vehículo n a la salida o entrada correspondiente.

$$d_{n,salida} = \begin{cases} \left. \begin{array}{l} dist(posX_n, posX_{salida} - 2) \text{ si } (split?_n = \text{verdadero} \text{ y } lane_n = \text{extIzq}) \\ dist(posX_n, posX_{salida} - 1) \text{ si } (split?_n = \text{verdadero} \text{ y } lane_n = \text{cent}) \\ dist(posX_n, posX_{salida}) \text{ si } (split?_n = \text{verdadero} \text{ y } lane_n = \text{extDer}) \\ dist(posX_n, posX_{entrada}) \text{ si } (split?_n = \text{falso} \text{ y } lane_n = \text{aux}) \end{array} \right\}$$

Posteriormente se revisa si el vehículo n debe comenzar a frenar para poder detenerse por completo en la salida o entrada que vaya a utilizar. Para ésto, al igual que en el paso S3a', también se hace uso de la variable $continuar?_n$.

$$continuar?_n = \begin{cases} verdadero & \text{si } (d_{n,salida} < d_{keep_{n,salida}} \text{ y} \\ & d_{n,salida} \geq d_{dec_{n,salida}} \text{ y} \\ & v > 0) \\ falso & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Finalmente, si $[(d_{keep_n} > d_n(t) \geq d_{dec_n})$ o $(continuar?_n = verdadero)]$, la velocidad del vehículo n se reduce en Δv .

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

2. **S3d': Desaceleración de emergencia.** Al igual que en el paso S3c', se comienza por determinar la distancia entre el vehículo n y la entrada o salida correspondiente utilizando la misma ecuación para $dist_{n,salida}$ que en el paso S3c'. Posteriormente también se calcula el valor de la variable $continuar?_n$ de acuerdo con:

$$continuar?_n = \begin{cases} verdadero & \text{si } (d_{n,salida} < d_{dec_{n,salida}} \text{ y} \\ & v > 0) \\ falso & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Si $[(v_n(t) > 0 \text{ y } d_n(t) < d_{dec_n}(t))$ o $(continuar?_n = verdadero)]$, se debe revisar si la velocidad del vehículo n se reduce en M o en Δv .

$$v_n(t+1) = \begin{cases} \max(v_n(t) - M, 0) & \text{si } v_n(t) \geq v_n(t-1) \\ \max(v_n(t) - \Delta v, 0) & \text{si } v_n(t) = (v_n(t-1) - \Delta v) \end{cases}$$

donde M es el máximo decremento posible, en la velocidad, para un paso de tiempo.

Las condiciones incluidas en la asignación al valor de $v_n(t+1)$ se deben a que pudiera ser que el vehículo ya

haya frenado por cumplir la condición correspondiente a al S3c'. Si no se hiciera este ajuste los vehículos podrían frenar más allá del valor de M .

En la Fig. 4.6 puede observarse cómo quedó la implementación que ya se tenía, después de agregar las modificaciones mencionadas.



Figura 4.6: Vista de la implementación del modelo GLAI extendido para representar el cruce de avenida Río Churubusco y calzada de Tlalpan. Los triángulos rellenos de colores que apuntan a la derecha son vehículos desplazándose de izquierda a derecha. Los triángulos huecos de color naranja representan los camellones que separan carriles centrales del carril auxiliar. Los cuadros rojos y azules representan el inicio y fin, respectivamente, de los sensores que se utilizan para medir densidad y flujo.

4.3. Modelado de posible solución

Aprovechando las extensiones que se hicieron al modelo, se incorporó de una vez el escenario de una posible solución. En el cruce de calzada de Tlalpan y avenida Río Churubusco se observa que al aumentar la densidad, muchos vehículos se detienen cerca de la salida, aún en el carril del centro y el carril de extrema izquierda. Para evitar esto se planteó el colocar una barrera física entre el carril de extrema derecha y el carril del centro de tal forma que aquellos vehículos que no van a utilizar la salida puedan continuar su camino de manera más eficiente. Como argumento en contra se cree que la obstrucción de carriles que se formaba cerca de la salida ahora se forme al inicio de la barrera mencionada. Para modelar esta posible solución se deben hacer ciertas modificaciones:

Incorporación de la barrera

- En el criterio incentivo se agrega la revisión de si existe, o no, un obstáculo (la barrera) en la posición en la que se encuentra el vehículo n que le impida realizar un cambio de carril. Es el mismo caso que la incorporación de obstáculos del conjunto de modificaciones que se mencionó anteriormente.

Aproximación a la barrera

- Se deben agregar las siguientes modificaciones para aquellos vehículos que circulen por carriles centrales, tengan $split?_n = verdadero$ y se aproximen a la barrera:

1. **S3a'': Aceleración.** Adicionalmente a las verificaciones que hace S3a', también se determinará si el vehículo n debe evitar acelerar para tomar el carril delimitado por la barrera. Para esto se utilizará la variable $verificar?_n$.

$$verificar?_n = \begin{cases} verdadero & \text{si } (split?_n = verdadero \\ & \text{y } lane_n \neq aux) \\ falso & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Después de esto los vehículos con $verificar?_n = verdadero$ calcularán la distancia que hay entre ellos y el inicio de la barrera.

$$d_{n,barrera} = \begin{cases} dist(posX_n, posX_{iniBarrera} - 1) & \text{si}(verificar?_n \\ & = verdadero \\ & \text{ro y split?}_n \\ & = verdadero \\ & \text{ro y lane}_n \\ & = extIzq) \\ dist(posX_n, posX_{iniBarrera}) & \text{si}(verificar?_n \\ & = verdadero \\ & \text{ro y split?}_n \\ & = verdadero \\ & \text{ro y lane}_n \\ & = cent) \end{cases}$$

Una vez calculado el valor de $d_{n,barrera}$ se revisará si la distancia permite a los vehículos continuar acelerando aunque pretendan usar el carril confinado por la barrera.

$$continuar?_n = \begin{cases} falso & \text{si } (d_{n,barrera} < d_{accn,barrera}) \\ verdadero & \text{si } (d_{n,barrera} \geq d_{accn,barrera}) \end{cases}$$

Finalmente, si $d_n(t) \geq d_{accn}$ y $continuar?_n = verdadero$, la velocidad del vehículo n se incrementara 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 obtenido para el vehículo n en el tiempo t .

2. **S3c'': Desaceleración.** Al igual que en S3c', se calcula la distancia entre el vehículo n y el inicio del carril confinado.

$$d_{n,barrera} = \begin{cases} \text{dist}(posX_n, posX_{iniBarrera} - 2) & \text{si}(\text{split?}_n = \\ & \text{verdadero} \\ & \text{y lane}_n = \\ & \text{extIzq}) \\ \text{dist}(posX_n, posX_{iniBarrera} - 1) & \text{si}(\text{split?}_n = \\ & \text{verdadero} \\ & \text{y lane}_n = \\ & \text{cent}) \end{cases}$$

Una vez hecho esto, se revisa si el vehículo n debe comenzar a frenar para detenerse por completo si todavía no ha alcanzado el carril de extrema derecha. Al igual que en el paso S3a', también se hace uso de la variable $continuar?_n$ para lograr esto.

$$continuar?_n = \begin{cases} \text{verdadero} & \text{si} (d_{n,barrera} < d_{keep_{n,barrera}} \text{ y} \\ & d_{n,barrera} \geq d_{dec_{n,barrera}} \text{ y} \\ & v > 0) \\ \text{falso} & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Finalmente, si $[(d_{keep_n} > d_n(t) \geq d_{dec_n})$ o $(continuar?_n = \text{verdadero})]$, la velocidad del vehículo n se reduce en Δv .

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

3. **S3d'': Desaceleración de emergencia.** De igual modo que en S3d', se determina la distancia entre el vehículo n y el inicio de la barrera utilizando la misma ecuación que en el paso S3c''. Posteriormente también se calcula el valor de la variable $continuar?_n$ de acuerdo con:

$$continuar?_n = \begin{cases} \text{verdadero} & \text{si} (d_{n,barrera} < d_{dec_{n,barrera}} \text{ y} \\ & v > 0) \\ \text{falso} & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Si $[(v_n(t) > 0 \text{ y } d_n(t) < d_{deccn}(t)) \text{ o } (\text{continuar?}_n = \text{verdadero})]$, se debe revisar si la velocidad del vehículo n se reduce en M o en Δv .

$$v_n(t+1) = \begin{cases} \max(v_n(t) - M, 0) & \text{si } v_n(t) \geq v_n(t-1) \\ \max(v_n(t) - \Delta v, 0) & \text{si } v_n(t) = (v_n(t-1) - \Delta v) \end{cases}$$

donde M es el máximo decremento posible, en la velocidad, para un paso de tiempo.

Las condiciones incluidas en la asignación al valor de $v_n(t+1)$ se deben a que podría ser que el vehículo ya haya frenado por cumplir la condición correspondiente al paso S3c' o S3c". Si no se hiciera este ajuste los vehículos podrían frenar más allá del valor de M .

En la Fig. 4.7 se presenta una visualización de la implementación de la barrera en el modelo.



Figura 4.7: Vista de la implementación del modelo GLAI extendido para representar el cruce de la avenida Río Churubusco y la calzada de Tlalpan con una barrera. Los triángulos rellenos de colores que apuntan a la derecha son vehículos desplazándose de izquierda a derecha. Los triángulos huecos de color naranja representan los camellones que separan carriles centrales del carril auxiliar y también representan la barrera física que previene alcanzar el carril de extrema derecha (de los carriles principales) de último momento para utilizar la rampa de salida. Los cuadros rojos y azules representan el inicio y fin, respectivamente, de los sensores que se utilizan para medir densidad y flujo.

4.4. Metodología y análisis de simulaciones

Metodología

Para el estudio del impacto que tiene la configuración de la infraestructura, en conjunto con la toma de decisiones de los conductores, se realizaron varias simulaciones barriando valores de parámetros relacionados con la configuración (densidad, distancias entre rampas y fracción inicial de conductores cooperadores). Los resultados que se mostrarán a continuación se obtuvieron de cuantificar variaciones de velocidad de los vehículos en una determinada zona. Para generar los resultados se promedian las lecturas de dichas variaciones en las últimas 10,000 iteraciones de la simulación. Para cada simulación, se ejecutan 30,000 iteraciones antes de tomar las mediciones de interés. Cada iteración de las simulaciones corresponde a un segundo, de esta forma el tiempo de observación corresponderá a 2.7 horas, precedidas por 8.3 horas de simulación para relajación del sistema (utilizada para eliminar estados transitorios).

Para la sección GLAI del modelo utilizamos los siguientes valores en los parámetros: $L = 80$ celdas, $\Delta x = 5.0m$ (resultando en una carretera de dos carriles de un solo sentido con condiciones de fronteras cíclicas con una longitud de 400 m para cada carril), tamaño del vehículo $car\ size = 5m$, $R_d = 1.00$, $R_0 = 0.8$, $R_s = 0.01$. Se consideró esa longitud de la carretera porque se quería enfocar el estudio justamente a la interacción de los vehículos con la configuración de la infraestructura.

Para *densidad*, exploramos los siguientes valores: 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.10, 0.11, 0.12, 0.13, 0.14, 0.15, 0.16, 0.17, 0.18, 0.19, 0.20, 0.21, 0.22, 0.23, 0.24, 0.25, 0.26, 0.27, 0.28, 0.29, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50 y 0.60. Estos valores en veh/km corresponden, respectivamente a: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50, 52, 54, 56, 58, 60, 70, 80, 90, 10 y 120. Los vehículos fueron colocados aleatoriamente a lo largo de la carretera evitando colisiones (fracciones de dos vehículos ocupando el mismo espacio). Para la implementación de velocidades máximas heterogéneas utilizamos una distribución gaussiana con una distribución estandar de 0.7 y una $|v_{max}| = 6$ celdas/tick (equivalente a 30 m/s y a 108 km/h). Para evitar colisiones, todos los vehículos comienzan la simulación con $v = 0$ celdas/tick.

Para los parámetros correspondientes a la evolución de la cooperación, utilizamos los siguientes valores: $ip_cC = 0.99$, $ip_cD = 0.45$ y una *fracción-inicial-de-cooperadores* = 50 %.

Por el momento solamente se estudió el comportamiento etiquetado como Natural.

Resultados de las simulaciones

Después de realizar las simulaciones anteriormente especificadas se obtuvieron los siguientes resultados. En términos de la evolución de la cooperación, en la Fig. 4.8, se puede apreciar que la configuración de la infraestructura tiene un gran impacto sobre la evolución de la cooperación.

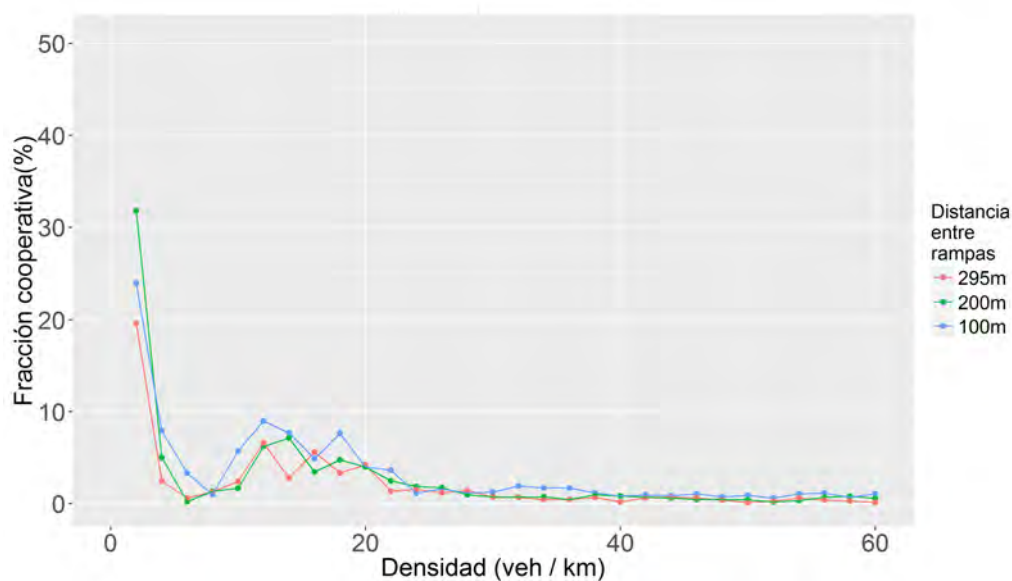


Figura 4.8: Impacto de la distancia entre las rampas en la evolución de la cooperación para la regla de comportamiento Natural.

Sin importar la separación entre la rampa de entrada y la de salida, la evolución de la cooperación decae notablemente apenas alcanzando un 10 % de la población total en el punto más alto. Esto quiere decir que la configuración de la infraestructura modifica las condiciones de juego a todos los conductores haciendo que no cooperar sea la opción más beneficiosa para los agentes. El aumento al 50 % de la población

en valores superiores a los de 60 veh/km para el caso en que la separación entre las rampas es de 100 m y para valores superiores a los 90 veh/km cuando la distancia entre las rampas es de 200 m; sugiere que los conductores se encuentran en un congestionamiento. Para valorar esto se obtuvieron los cálculos del flujo sobre la vía. Estos resultados se encuentran en la Fig. 4.9.

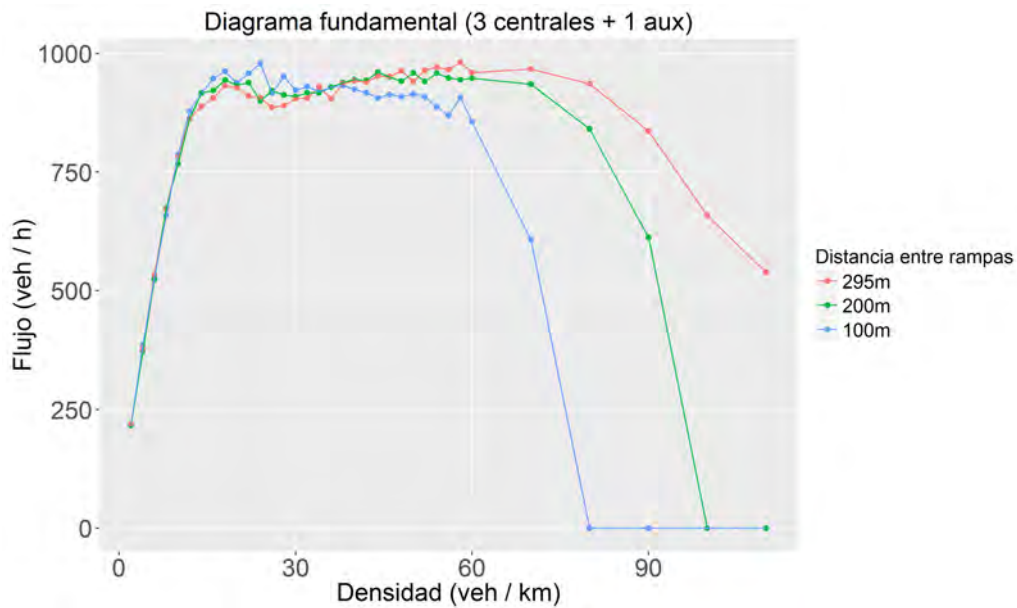


Figura 4.9: Diagramas de flujo para tres diferentes distancias entre rampas.

En la Fig. 4.9 se puede observar el impacto que tiene la configuración de la infraestructura sobre el desempeño de la misma. El flujo decae más rápidamente mientras menor sea la distancia entre las rampas. Para comprobar esto se espera observar el mismo comportamiento tanto en mediciones del índice de movilidad como en las mediciones de la velocidad promedio.

El comportamiento, efectivamente, se repite tanto para mediciones de movilidad (Fig. 4.10) como para mediciones de la velocidad promedio (Fig. 4.11). Esto quiere decir que la configuración de la vía tiene un alto impacto sobre el rendimiento de la vía y sobre el comportamiento de los conductores. Los conductores no se comportarán igual si el fragmento de una vía es recto a que si el fragmento tiene rampas. La distancia entre las rampas no afecta el comportamiento; solamente indicará en que valor de la densidad dejará de haber interacciones

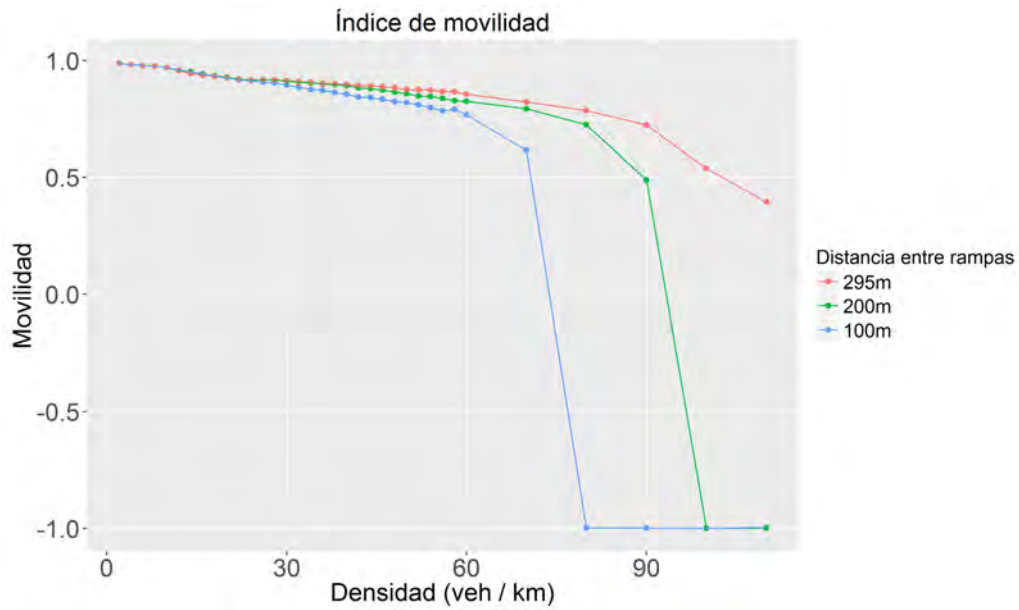


Figura 4.10: Diagramas de flujo para tres diferentes distancias entre rampas.

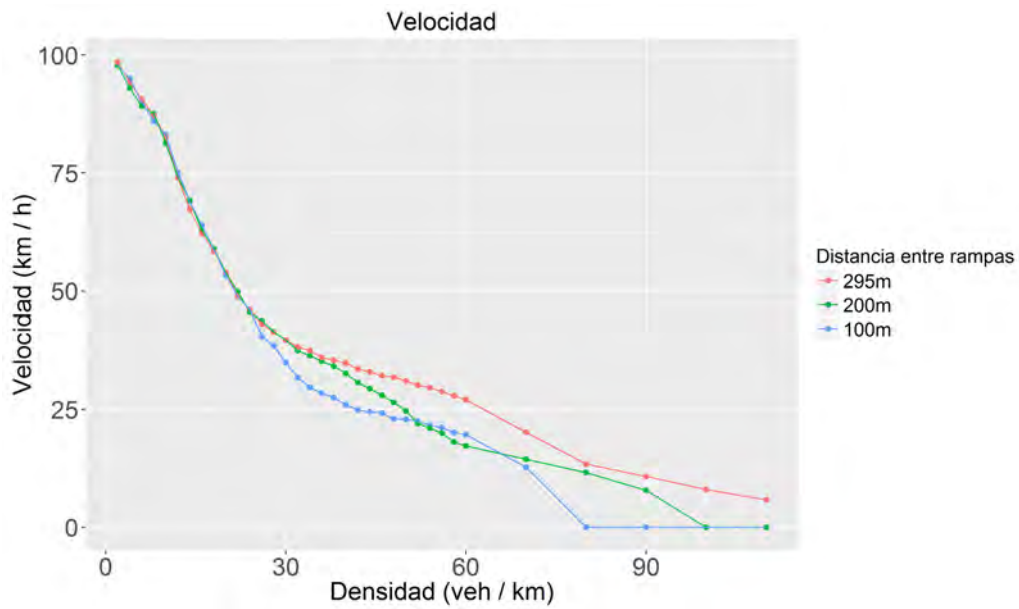


Figura 4.11: Diagramas de flujo para tres diferentes distancias entre rampas.

(cambios de carril) debido que dejará de haber flujo en la vía. En cuanto al desempeño, la distancia entre las rampas dicta para qué valor de densidad la vía dejará de tener flujo y sin flujo no se puede tener movilidad. De igual forma al haber menos distancias entre las rampas, la velocidad promedio decae más rápidamente.

Problemática: La interacción entre los dos tipos de comportamientos de los conductores (cooperadores y desertores) con la configuración de la vía provoca un pobre desempeño de la vía mientras más cercana esté una rampa de otra.

Este fenómeno se debe a que los vehículos desertores pueden necesitar utilizar la rampa de salida pero aunque estén muy cerca de la rampa, ellos no se encuentran en el carril más próximo a la rampa. Esto provoca la obstaculización del carril central y del carril de extrema izquierda provocando la aparición intermitente de tapones.

Este fenómeno se ilustra en la Fig 4.12, en donde puede apreciarse que desde bajas densidades (Fig. 4.12 (a)) la probabilidad de que un vehículo frene es más alta sobre el carril de en medio debido a que los conductores pueden no seguir las regulaciones si son desertores. Este fenómeno también se ve influenciado por los vehículos que vienen de la rampa de entrada, ya que la mayoría entran y ocupan el carril de extrema derecha y se ven encapsulados por aquellos vehículos que pretenden usar la rampa de salida.

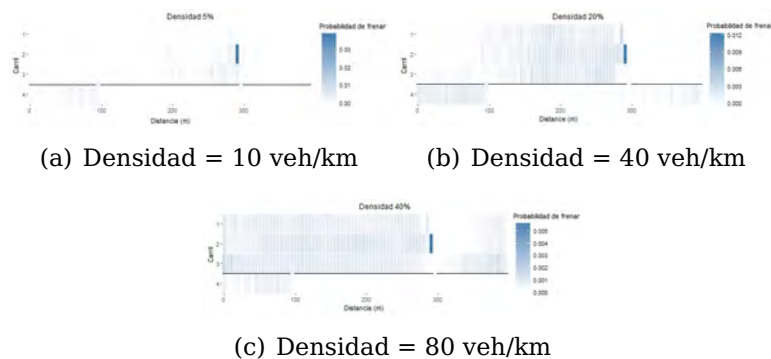


Figura 4.12: Mapa de calor de la probabilidad que tiene un determinado segmento sobre la vía para que ocurra el frenado de algún vehículo. La distancia entre las rampas es de 200 m.

Si se observa el patrón de probabilidad de aceleración sobre la vía

(Fig. 4.13) se nota que justo en el segmento que sigue al segmento donde se observa mayor probabilidad de frenado surge mayor probabilidad de aceleración. Esto se debe a que es el segmento en que los vehículos que acaban de ingresar a los carriles centrales pueden librarse del embotellamiento.

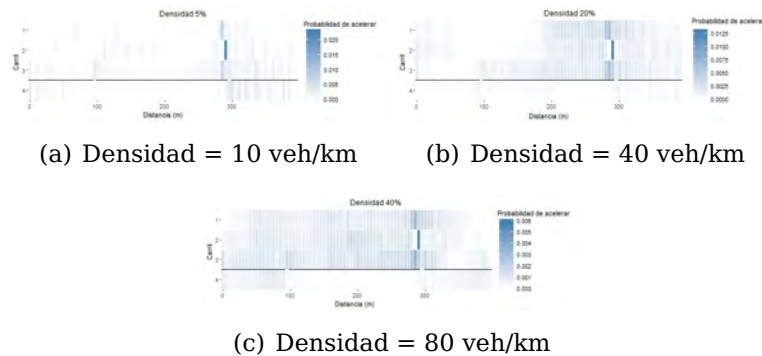


Figura 4.13: Mapa de calor de la probabilidad que tiene un determinado segmento sobre la vía para que ocurra la aceleración de algún vehículo. La distancia entre las rampas es de 200 m.

Posible solución: Se planteó que una posible solución sería el colocar una barrera física que impidiera que los vehículos en los carriles de extrema izquierda y de en medio quisieran acceder a la rampa de salida en el último momento. Con la idea de generar un poco más de orden se planteó que dicha barrera se extendiera incluyendo la rampa de entrada que se encuentra unos metros atrás de la rampa de salida. En las Fig. 4.14 y Fig. 4.15 pueden observarse los mapas de calor correspondientes a dicha modificación de la vía.

En las figuras anteriores se puede observar que, efectivamente, se logra concentrar la mayor cantidad de aceleraciones y frenados dentro del carril de extrema derecha (limitado por la barrera). Esto genera un comportamiento más estable para los demás segmentos de la vía. Sin

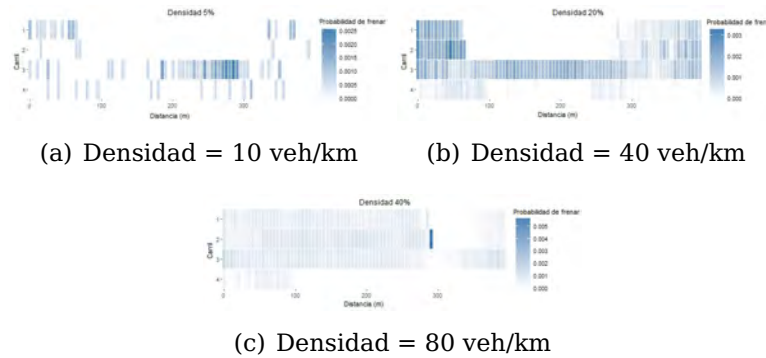


Figura 4.14: Mapa de calor de la probabilidad que tiene un determinado segmento sobre la vía para que ocurra el frenado de algún vehículo. La distancia entre las rampas es de 200 m. La vía cuenta con una barrera para prevenir el cambio de carril de último momento a la rampa de salida.

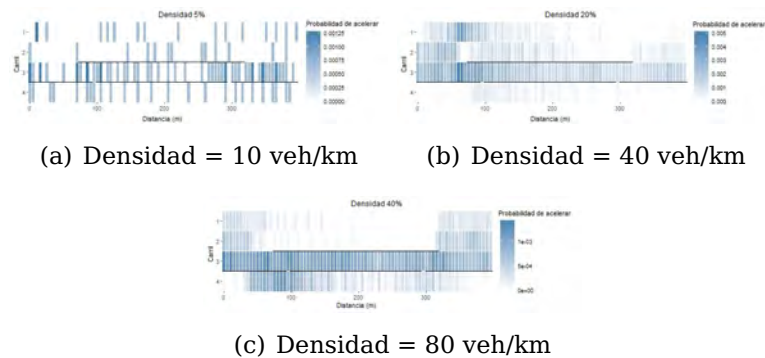


Figura 4.15: Mapa de calor de la probabilidad que tiene un determinado segmento sobre la vía para que ocurra la aceleración de algún vehículo. La distancia entre las rampas es de 200 m. La vía cuenta con una barrera para prevenir el cambio de carril de último momento a la rampa de salida.

embargo, esta afirmación solamente es válida para densidades bajas (10 veh/km y 40 veh/km). Para densidades altas (80 veh/km) el comportamiento es similar a cuando no hay barrera (sobre todo en el mapa de frenado).

4.5. Conclusiones del capítulo

En esta sección se presentó una extensión del modelo GLAI que incluye dos nuevas reglas de seguridad utilizadas para prevenir colisiones entre vehículos para dos condiciones en particular: 1) cuando dos vehículos de diferentes carriles se cambian al mismo carril pero en direcciones opuestas (por ejemplo, el vehículo 1 realizará el cambio hacia su izquierda y el vehículo 2 realizará el cambio hacia la derecha) y 2) dos vehículos van a cambiarse hacia el mismo carril proviniendo del mismo carril (por ejemplo, el vehículo 1 realizará el cambio de carril hacia su izquierda y el vehículo 2 también realizará el cambio hacia su izquierda). Esta última situación solamente ocurre si los agentes conductores tienen la posibilidad de tener un comportamiento que infrinja las regulaciones, en específico, cuando pueden rebasar utilizando el carril derecho (regulaciones mexicanas y europeas).

Gracias a que el modelo es capaz de simular el tráfico en escenarios con rampas de entrada/salida y a que podemos estudiar también la evolución de la cooperación, se puede determinar que la configuración de la infraestructura tienen un alto impacto sobre el comportamiento de los conductores y sobre el desempeño de la vía. Esto complica el diseño de elementos que puedan influir sobre el comportamiento de los conductores para mejorar el desempeño de la vía, sobre todo en configuraciones que afecten negativamente la evolución de la cooperación (como lo fue este caso).

Estos resultados también nos permiten entender que a pesar de que existan reglas de comportamiento que promuevan una mejor movilidad o el impacto que pueda tener la configuración de la vía, la variable que sigue teniendo mayor importancia para determinar el estado de la vía es la densidad.

El contenido de este capítulo fue presentado en la Conference on Complex Systems (CCS2016).

Capítulo 5

Conclusiones generales

5.1. Novedad del modelo

En este trabajo se presentó un nuevo modelo de comportamiento de tráfico vehicular. El enfoque basado en teoría de juegos que fue utilizado para el desarrollo de este modelo permite representar diferentes comportamientos (por parte de los conductores) utilizando juegos y reglas ampliamente estudiados (Nowak, 2006). Por medio de la unión de estas reglas con la implementación basada en agentes de un simulador de tráfico vehicular realista (Guzmán et al., 2015), se logró categorizar a los agentes (conductores) en dos grupos (cooperadores y desertores), asignándoles comportamientos característicos a cada uno. También se le dio a los agentes la capacidad de decidir cuál de los dos comportamientos preferían exhibir con mayor frecuencia teniendo como objetivo principal maximizar su desempeño sobre la carretera (recorrer la mayor distancia posible en el menor tiempo posible). Lograr esta combinación entre un modelo espacial y un modelo de teoría de juegos es importante pues podría permitir el estudio de otros sistemas que se puedan modelar en un contexto espacial. El proceso de combinación de estos modelos implica un entendimiento detallado del fenómeno a ser modelado para poder identificar adecuadamente comportamientos que puedan tener un impacto importante en el desempeño del sistema y también es necesario poder identificar valores que se generen dentro del sistema que puedan ser utilizados dentro de las matrices de ganancias de los juegos.

En el sistema que se estudió, se modificaron tanto las interacciones entre vehículos que cambian de carril en una carretera, como las re-

glas que determinaban los cambios de carril para generar diferentes comportamientos. Esto se realizó así debido a que las reglas (tanto originales como nuevas) se encuentran definidas con base en la distancia y la velocidad (valores generados dentro del sistema) y las matrices de pago pueden utilizar estos valores para determinar las ganancias de los conductores al participar en un cambio de carril.

Unir modelos de teoría de juegos con modelos espaciales no es trivial pero, debido a la descripción formal que tiene la teoría de juegos sobre la toma de decisiones, el modelo resultante proporciona información relevante acerca de las interacciones entre agentes. Esta información a su vez puede llevarnos a obtener un mejor entendimiento de los fenómenos estudiados.

Se considera que este marco conceptual podría tener aplicaciones importantes en sistemas en donde el factor humano tenga un rol preponderante como podrían ser las redes sociales y los comportamientos de peatones.

Los modelos de esta naturaleza son importantes ya que al encontrarse alejados de los modelos tradicionales de ingeniería de transporte permiten cubrir otra perspectiva del tráfico vehicular que no puede explorarse con las mediciones tradicionales proporcionando así más información que podría estar faltando para poder dar una mejor solución a diversos problemas de movilidad urbana.

5.2. Evolución de la cooperación

Los resultados de nuestro modelo acerca de la evolución de la cooperación (3.2 a 3.5) dicen que el comportamiento cooperativo logra, al menos, ser evolutivamente estable solamente para ciertos valores de densidad vehicular. Para muchos de los comportamientos modelados, estos valores de densidad corresponden a aquellos en los que ocurre flujo sincronizado (3.7). A diferencia de otros modelos ([Kesting et al., 2007](#)), el grado de cooperación o amabilidad que exhiben los conductores es elegida interna e individualmente por los propios conductores. No hay variable global ni parámetro para guiar su comportamiento. El hecho de que coincidan el incremento en la fracción de cooperadores para ciertos valores de densidad implica que solamente durante la fase de flujo sincronizado existen condiciones que favorecen la auto-organización de los conductores. A pesar de la naturaleza egoísta de las

matrices de pago (los conductores son recompensados al lograr aumentar su velocidad y son penalizados cuando disminuye su velocidad), los conductores encuentran circunstancias en que no perseguir un aumento de velocidad (comportamiento cooperativo) puede llevarlos a verse recompensados. Ésto puede verse como un ejemplo del efecto "lento es más rápido"(Gershenson y Helbing, 2015).

El comportamiento de la evolución de la cooperación que ocurre en la fase de flujo sincronizado está altamente relacionado a la cantidad de interacciones (cambios de carril) ocurriendo para cada valor de densidad. En la fase de congestionamiento hay pocos espacios que puedan ser utilizados por los conductores para realizar maniobras de cambio de carril; esto lleva a que haya menos interacciones entre conductores reduciendo el efecto de los cambios de carril cooperativos o desertores. Las condiciones de flujo libre también conducen a una baja interacción debido a las largas distancias que hay entre vehículos. Esto permite a los vehículos utilizar la carretera más libremente sin necesidad de tomar en cuenta el comportamiento de los demás vehículos. También estos espacios largos evitan la propagación del costo (c) entre los vehículos. Durante la fase de flujo sincronizado, el costo pagado por los vehículos objetivo (el vehículo que se convertirá en el nuevo seguidor de un vehículo que está cambiando de carril), probablemente termine propagándose entre varios de los vehículos sobre la vía que se encuentren detrás del vehículo objetivo. Esto pasa cuando un vehículo que se está cambiando de carril provoca que el vehículo objetivo frene y, debido al poco espacio existente entre los vehículos, muchos otros vehículos se verán obligados a frenar también.

Tomando en cuenta el razonamiento anterior, se puede argumentar que las fases del tráfico vehicular tienen un impacto mayor sobre la evolución de la cooperación que el impacto que pueda tener ésta sobre las fases del tráfico vehicular. En el caso particular de la fase de flujo sincronizado, es debido a la cantidad de vehículos y a la cantidad de espacio libre que los vehículos incrementan su tasa de cambio de carril. Y es este incremento lo que promueve la evolución de la cooperación. Para cualquier valor de densidad, un vehículo objetivo particular puede obtener cuatro posibles pagos: un decremento de 5 m/s (frenado de emergencia), un decremento de 2.5 m/s (frenado normal), ni incremento ni decremento (cambio de carril con suficiente espacio o cambio de carril no ejecutado) o un incremento de 2.5 m/s (cambio de carril con espacio suficiente o cambio de carril no ejecutado). Los incremen-

tos de velocidad promueven la acción realizada (cooperar o detractar) mientras que los decrementos serán responsables de la promoción del comportamiento cooperativo. Esto es debido a que un conductor objetivo cooperador dejará de acelerar e incluso comenzará a frenar para ayudar a otro conductor a realizar maniobras de cambio de carril. Esto quiere decir que si un conductor decide cooperar tendrá un pago de -2.5 m/s o de 0 m/s que va a ser preferido sobre tener un pago de -5 m/s como la que se obtiene por un frenado de emergencia ejecutado forzosamente al tratar de evitar una colisión provocada por el cambio de carril de otro vehículo.

5.3. Optimización de la movilidad

En términos del desempeño, se esperaba encontrar comportamientos óptimos pero se encontró que el mejor comportamiento depende de la densidad, es decir, el óptimo es dinámico y depende de las condiciones del sistema. No hay un solo comportamiento óptimo para todas las situaciones de tráfico vehicular. Si se analiza el desempeño de tráfico vehicular, se puede observar que durante la fase de flujo sincronizado (Fig. 3.8) se notó que los comportamientos con los peores desempeños (flujo más bajo) fueron aquellos en los que la evolución de la cooperación fue muy exitosa (Fig. 3.5). El modelo de comportamiento con los mejores resultados fue el modelo de comportamiento estocástico embebido en el modelo GLAI original. Analizando los resultados utilizando la medida de movilidad aquí presentada (Fig. 3.10) se encontró que el modelo de comportamiento etiquetado como "natural", fue el que tuvo el mejor desempeño. Si se toman en cuenta los resultados de evolución de la cooperación, éste tiene un desempeño regular. Esto significa que siempre cooperar o siempre desertar no son políticas de manejo eficientes. En otras palabras, se puede decir que la evolución de la cooperación provee adaptabilidad lo cual incrementa el valor de la medida de movilidad para una densidad dada. Es a esto a lo que llamamos optimización de la movilidad.

Se observó que, durante la fase de flujo sincronizado, existen condiciones en que la cooperación es una mejor opción para los agentes y habrá otras condiciones en que para los agentes desertar los lleve a un mejor desempeño. Poniendo atención a la sección del modelo correspondiente al comportamiento de cambio de carril, se puede obser-

var que el comportamiento desertor provoca que los conductores sigan una política avariciosa de consumo de espacio, es decir, los desertores frecuentemente tratan de cubrir la mayor distancia posible en el menor tiempo posible. Por otra parte, el comportamiento cooperativo guía los conductores a una política moderada de generación de espacio debido a que frecuentemente los conductores cooperadores mantienen o reducen su velocidad al intentar facilitar los cambios de carril de otros conductores. Al permitir que los agentes elijan la probabilidad con que cooperarán, los agentes pueden encontrar una tasa de generación de espacios lo suficientemente grande como para que pueda ser aprovechada por los agentes que consumen espacio avariciosamente pero no lo suficientemente grande como para que sea un obstáculo para los vehículos más rápidos.

Siguiendo el razonamiento anterior, siempre detractar conduce a que pequeñas perturbaciones en las velocidades de los vehículos formen congestionamientos rápidamente. Por otro lado, siempre cooperar conduce a la generación de grandes espacios entre vehículos que no estarían siendo utilizados.

En las ciudades, las reglamentaciones viales procuran promover o reforzar un comportamiento cooperativo. Sin embargo, como ya se mencionó, el comportamiento cooperativo no siempre provee la mejor movilidad. Aun así, existen razones para buscar promover la cooperación como la seguridad 3.13 ([Christie, 2001](#)) y la salud psicológica ([Dukes et al., 2001](#)).

También se podría considerar que la causa de la optimización de la movilidad es la adaptación de los conductores a su medio ambiente social (Fig. 3.12). Encontrar la causa que motiva la emergencia de estas tasas de cooperación (probabilidades para diferentes matrices de pago tanto para cooperadores como para desertores) podría señalar una respuesta más clara a qué es exactamente lo que está provocando la optimización de la movilidad.

Finalmente, es importante mencionar que todos los modelos de comportamiento tuvieron el mismo (pobre) desempeño en flujo y movilidad durante la fase de congestionamiento. Debido a esto, se puede argumentar que, aunque el comportamiento al conducir es importante, limitar el número de vehículos sobre la vía tiene mayor relevancia para alcanzar una movilidad eficiente.

5.4. Trabajo futuro

5.4.1. Juegos Bayesianos

Los resultados que se mostraron fueron tomando en cuenta la escala global del sistema. Obtener resultados a una escala local es un trabajo que ya se ha puesto en marcha pero sale del alcance de este trabajo. Se pretende obtener las matrices de pago para cada par de jugadores y la probabilidad de cada una de las posibles matrices que pudieran surgir de las interacciones. Ésto podría proporcionar suficiente información para poder realizar una formalización del modelo utilizando juegos Bayesianos y también podría proporcionar una explicación acerca de la auto-organización entre vehículos que ocurre durante la fase de flujo sincronizado, condiciones que podrían permitir el surgimiento de un estado de movimiento coherente y la relación que tendrían estos dos fenómenos con la optimización de la movilidad.

5.4.2. Vehículos autónomos

En el contexto de los vehículos autónomos, sería interesante definir una estrategia híbrida que pudiera balancear entre cooperar o detractar para aprovechar lo mejor de los extremos (generación de espacios por parte de los vehículos lentos y consumo avaricioso del espacio por parte de los vehículos rápidos) para optimizar la movilidad del tráfico urbano de vehículos autónomos.

5.4.3. Expresividad del modelo

Es importante recalcar que, aunque los resultados hasta ahora han sido favorables, no podríamos mencionar que el comportamiento de los conductores en el modelo aquí presentado es totalmente realista. Existen muchos escenarios que han quedado fuera del alcance de este estudio; por ejemplo: vías con intersecciones, población de conductores con reglas de comportamiento heterogéneas, comportamientos como el tailgating, entre otros.

Inicialmente estos escenarios se dejaron fuera debido a algunas limitaciones del modelo GLAI original. Sin embargo, durante la elaboración del último estudio de este trabajo se logro modificar el modelo GLAI (en

conjunto con el equipo de investigadores que lo desarrolló) para extenderlo más allá de sus limitaciones. Entre las mejoras que se hicieron se logró extender la dinámica de cambio de carriles para n carriles y también se logró incluir comportamientos necesarios para poder modelar rampas de entrada/salida de una vía principal de/hacia carriles auxiliares. Con esto queda patente que, aunque todavía hay muchos escenarios por lograr incorporar, el modelo GLAI en conjunto con los modelos de comportamiento presentados son lo suficientemente robustos como para poder consolidar una potente herramienta de simulación de tráfico vehicular.

Apéndice A

Juegos derivados de la regla de selección por parentesco

A.1. Dilema del prisionero

Este juego aparece cuando $\frac{b}{c} < \frac{1}{r}$. Estas condiciones hacen que $DC > CC > DD > CD$, que son las características del Dilema del prisionero. Al ser $DC > CC$ y $DD > CD$ hacen que sea más atractivo para los participantes el ser desertores. Si uno decidiera arriesgarse a ser cooperador se corre el riesgo de caer en el peor caso de pago que sería CD . Aún si el otro jugador también cooperará (CC), se puede obtener un mejor pago si se hubiese optado por ser desertor (DC).

Este juego generalmente se encuentra narrado de la siguiente forma: supongamos que tenemos dos prisioneros A y B. Entre ambos han cometido un crimen y hay ciertas evidencias en su contra pero no son suficientes para que alcancen la pena máxima. Se le da la opción, a cada uno, de que declare en contra del otro (desertor). Los prisioneros también tiene la opción de quedarse callados (cooperar con el otro jugador). Esta situación da lugar a que haya cuatro posibles desenlaces (desde la perspectiva del prisionero A):

- DC : si el prisionero (A) elige confesar y declarar en contra del otro (B) y este último (B) decide quedarse callado, al prisionero que se quedó callado (B) se le castigará con la pena máxima mientras el prisionero que declaró (A) tendrá la pena mínima.
- CC : si ambos prisioneros se quedan callados entonces la policía no tendrá los suficientes elementos y sólo alcanzaran una pena

media.

- DD: si ambos prisioneros declaran en contra del otro ambos alcanzaran una pena más alta que el caso anterior (CC) pero debido a que confesaron tampoco alcanzaran la pena máxima.
- CD: si el prisionero (A) elige quedarse callado pero el otro prisionero (B) decide acusarlo; el primer prisionero (A) alcanzará la pena máxima mientras el otro prisionero (B) alcanzará la pena mínima.

Una instancia de este juego puede encontrarse en el Cuadro A.1.

		B	
		C	D
A	C	-1 , -1	-4 , 0
	D	0 , -4	-3 , -3

Cuadro A.1: Ejemplo del dilema del prisionero. Los valores de la matriz de pago esta expresada en años de libertad.

A.2. La piedad del otro

Este juego aparece cuando $r = \frac{c}{b}$. Esto genera que $DC = CC > DD = CD$. Este juego no ha sido estudiado ampliamente a diferencia del dilema del prisionero. El juego puede narrarse de la siguiente forma: pensemos en un ladrón (jugador A) dentro de una tienda con circuito cerrado de vigilancia. Al momento en que el ladrón decide robar algo el dueño de la tienda (jugador B) se encuentra viendo las cámaras de vigilancia y puede ver al ladrón. El ladrón toma el objeto que llamó su atención y a partir de ese momento puede realizar dos acciones; (C) entregarse y regresar lo robado pues existe la posibilidad de que le hayan visto y (D) tratar de salirse con la suya y salir de la tienda. De igual forma el dueño de la tienda tiene dos cursos de acción a partir de observar el robo: (C) aceptar la pérdida y no comunicarle nada a la gente de seguridad o (D) dar aviso inmediatamente a la gente de seguridad para que el ladrón sea detenido. Las cuatro posibles consecuencias se enumeran a continuación:

- DC: el ladrón decide intentar huir, el dueño de la tienda al no dar aviso a seguridad permite la huida del ladrón quedándose sin el objeto robado y haciendo un poco más rico (o menos pobre) al ladrón.
- CC: el ladrón decide entregarse devolviendo lo robado al dueño y el dueño de la tienda decide no dar aviso a seguridad salvando de una condena al ladrón.
- DD: el ladrón intenta huir y el dueño da aviso a la policía iniciándose una persecución. El dueño se queda sin el objeto y el ladrón tendrá pendiente una condena en su contra si es atrapado.
- CD: el ladrón decide entregarse devolviéndole al dueño su artículo y el dueño al dar aviso a seguridad hace que el ladrón tenga una condena por robo.

Un ejemplo de este juego se encuentra en el cuadro A.2.

		B	
		C	D
A	C	3 , 3	-3 , 3
	D	3 , -3	-3 , -3

Cuadro A.2: Ejemplo de la piedad del otro. Los valores de la matriz de pago están expresados en el valor del objeto robado (valores positivos) y en una condena proporcional al valor del objeto robado (valores negativos).

A.3. Trabajo en equipo

Este juego aparece cuando $\frac{b}{c} > \frac{1}{r}$ pero $r < 1$. De esta forma se genera que $CC > DC > CD > DD$ volviendo evidente la preferencia que tendrán los jugadores por cooperar, pues basta que haya un cooperador para no tener la peor ganancia. Además de esto, se mitiga la tentación de los participantes por intentar alcanzar la paga DC pues CC es más alta. Los desertores aún tendrán motivaciones para intentar alcanzar DC pues es mayor que CD.

Este juego puede ejemplificarse de la siguiente forma: pensemos en dos compañeros del colegio formando un equipo para realizar una tarea. Ambos estudiantes tiene la opción de cooperar con el trabajo (C) o incumplir con sus responsabilidades (D).A continuación enumeramos las posibles calificaciones que pueden obtener:

- CC: al sumar el esfuerzo de ambos obtienen la mejor calificación posible.
- DC: Si uno de ellos no cumple con su parte (D) pero tiene un compañero responsable que cumple con el trabajo (C), el estudiante que no cumplió (D) obtendrá su calificación y el tiempo que no empleo en su tarea lo podrá haber usado en alguna otra actividad obteniendo así una ventaja sobre el estudiante que realizó solo el trabajo.
- CD: El estudiante que cumplió con su trabajo (C) y que tuvo un compañero irresponsable (D) obtendrá una calificación menor a que si ambos hubieran trabajado juntos (CC) y menor que su compañero (DC) pues el hacer el trabajo de dos personas le consumió tiempo y esfuerzo de sus otras actividades.
- DD: al no dedicarle trabajo a su tarea ambos estudiantes obtienen la peor calificación por incumplidos.

Un ejemplo de este juego puede encontrarse en el cuadro A.3

		B	
		C	D
A	C	10 , 10	6 , 8
	D	8 , 6	5 , 5

Cuadro A.3: Ejemplo de trabajo en equipo. Los valores de la matriz de pago están expresados en el el valor de la calificación final obtenida por los estudiantes.

A.4. Sinergia cooperativa

Este juego surge cuando $r = 1$, lo que genera que $CC > DC = CD > DD$. De esta forma se asegura que mientras haya un cooperador habrá

ganancias para los participantes pero la mejor ganancia se da al haber más de un cooperador.

Para ejemplificar el juego podemos pensar en un matrimonio en el que ambos miembros pueden aportar trabajo (C), o no (D), para hacer crecer su hogar. A partir de ésto pueden surgir cuatro opciones:

- CC: si ambos miembros aportar trabajo el hogar se verá mejor beneficiado y ambos podrán disfrutar de este crecimiento.
- DC o CD: si alguno de los miembros aporta pero el otro no, el hogar se verá beneficiado pero en menor medida a que si ambos aportaran (CC) pero ambos disfrutarán del desarrollo que se esté logrando .
- DD: si ninguno aporta, el hogar no crecerá.

Un ejemplo de este juego puede hallarse en el cuadro A.4.

		B	
		C	D
A	C	16 , 16	8 , 8
	D	8 , 8	0 , 0

Cuadro A.4: Ejemplo de sinergia cooperativa. Los valores de la matriz de pago expresan las horas/hombre aportadas al hogar.

Apéndice B

Juegos derivados de la regla de reciprocidad directa

B.1. Dilema del prisionero

El dilema del prisionero aparece cuando $\frac{b}{c} < \frac{1}{w}$. Una explicación de este juego puede encontrarse en la sección A.1 del apéndice A.

B.2. Caza invernal del ciervo

La caza invernal del ciervo aparece cuando $w = \frac{c}{b}$. Esto genera que $DC = CC > DD > CD$. Este juego puede enunciarse de forma similar al de la caza del ciervo (sección B.3 de este mismo apéndice) con algunas variaciones. Pensemos en un bosque durante el invierno, fecha en la que debido a la nieve muchos animales herbívoros reducen sus reservas de grasa y por tanto su tamaño. Bajo este contexto existe un grupo de cazadores (al menos dos) que están siguiendo la pista de un ciervo y saben que ha pasado por un lugar y volverá a pasar. Deciden esconderse y esperar a que el ciervo vuelva a pasar para tenderle una emboscada y poder cazarlo. No saben en qué momento pasará pero en algún momento lo hará. Mientras esperan una liebre pasa por el lugar. En ese momento los cazadores tienen dos cursos de acción. Pueden decidir esperar en su escondite a que pase el ciervo (C) o pueden aprovechar la oportunidad y cazar la liebre (D). Las cuatro posibles consecuencias de sus actos se describen a continuación:

- DC: uno de los cazadores atrapa a la liebre mientras el otro es-

pera. El cazador que atrapó a la liebre (D) podrá retirarse con su presa mientras el otro cazador se quedará sin presa que cazar pues uno solo no es suficiente para atrapar al ciervo.

- CC: ambos cazadores dejan ir a la liebre y esperan a que pase el ciervo. Al atrapar al ciervo ambos deviden el producto de su caza a partes iguales pero debido al invierno el ciervo está más flaco y proporciona la misma cantidad de recursos que capturar una liebre.
- DD: ambos cazadores deciden atrapar a la liebre perdiendo la oportunidad de cazar al ciervo. Una vez capturada deciden dividir entre ambos los productos de su caza dejándolos con menos ganancias a que si uno hubiera optado por DC y el otro por CD.
- CD: mientras uno de los cazadores opta por cazar a la liebre (D) el otro decide quedarse a esperar al ciervo (C). Debido a la acción del jugador desertor el ciervo se da cuenta de la trampa y ya no pasa. El jugador que no caza la liebre (C) se queda sin presa y, si acaso, conseguirá para comer algunas cuantas bayas en el bosque.

Un ejemplo de este juego puede encontrarse en el cuadro B.1

		B	
		C	D
A	C	4 , 4	0 , 4
	D	4 , 0	2 , 2

Cuadro B.1: Ejemplo de la caza invernal del ciervo. Los valores de la matriz de pago expresan la cantidad de alimento conseguido.

B.3. La caza del ciervo

La caza del ciervo aparece cuando $\frac{b}{c} > \frac{1}{w}$. Estas condiciones generan que $CC > DC > DD > CD$ que son las características del juego conocido como la Caza del ciervo ($CC > DC \geq DD > CD$). Si ponemos atención observaremos que cooperar nos puede llevar a obtener la mejor ganancia o la peor mientras que ser un desertor nos asegura una ganancia pero nunca la mejor. Este juego puede enunciarse de

la siguiente forma: dos cazadores se internan en el bosque siguiendo la pista de un ciervo. Han logrado determinar una sección frecuentada por el animal así que deciden esconderse y esperar a que vuelva a pasar para cazarlo. Después de algún tiempo pasa por el lugar una liebre. Ambos cazadores deben determinar si continúan esperando al ciervo (C) por un tiempo aún desconocido o dar caza en ese instante a la liebre (D). Cazar a la liebre ofrece menos recompensas debido a la diferencia de tamaño de ésta con el ciervo. Si uno de ellos decide cazar a la liebre y el otro no. El desertor obtendrá una ganancia y dejará al otro imposibilitado para cazar al ciervo (pues para cazar un animal más grande requiere de dos personas).

En algunas ocasiones se mencionan varias liebres en lugar de una de ahí que DD pueda llegar a ser menor o igual que DC . Si se menciona una sola liebre y ambos deciden casarla tendrían que dividir los resultados de la caza haciendo $DC > DD$. Si se menciona más de una liebre al optar por DD cada uno puede llevarse una liebre y tendremos $DC = DD$.

Las cuatro posibles opciones serían:

- **CC:** ambos cazadores optan por esperar y cuando aparece el ciervo trabajan en equipo y logran cazarlo. Al ser el ciervo un animal grande garantiza la mejor paga para ambos.
- **DC:** uno de los cazadores determina que es mejor cazar a la(s) liebre(s) que tiene delante a esperar por un ciervo que no saben cuando va a pasar. Al atrapar a la liebre deja al otro cazador sin oportunidad de obtener ganancias. Para el caso de que sea una sola liebre, como el otro cazador no ayudó a atrapar a la liebre, el cazador que si la atrapó no compartirá con él. Para el caso de que sean muchas, al atrapar a su liebre las demás huyen dejando al cazador que espera al ciervo sin la oportunidad de atrapar una. Finalmente, para ambos casos, al haber signos visibles de caza en la zona el ciervo evitará el lugar.
- **DD:** ambos cazadores determinan que es mejor atrapar a la(s) liebre(s) que tienen delante. Para el caso de una sola liebre, ambos cazadores la atrapan y deciden dividir las ganancias (por esta razón $DC > DD$). Para el caso de varias liebres cada uno puede atrapar la suya haciendo $DC = DD$.

- CD: uno de los cazadores decide esperar al siervo (C) mientras el otro (D) sale tras la(s) liebre(s) quedándose así, el primero de ellos (C) se queda sin una liebre y sin oportunidad de cazar al ciervo pues éste evitará la zona.

Una instancia de este juego puede encontrarse en el cuadro B.2.

		B	
		C	D
A	C	6 , 6	0 , 4
	D	4 , 0	2 , 2

Cuadro B.2: Ejemplo de la caza del ciervo. Los valores de la matriz de pago expresan la cantidad de alimento conseguido.

Apéndice C

Juegos derivados de la regla de reciprocidad indirecta

C.1. Dilema del prisionero

Se generan condiciones para el juego del dilema del prisionero cuando $\frac{b}{c} < \frac{1}{q}$. Una explicación de este juego puede encontrarse en la sección A.1 del apéndice A.

C.2. Caza invernal del ciervo

La caza invernal del ciervo aparece cuando $q = \frac{c}{b}$. Una explicación de este juego puede encontrarse en la sección B.2 del apéndice B.

C.3. La caza del ciervo

Las condiciones para el juego de la caza del ciervo surgen cuando $\frac{b}{c} > \frac{1}{w}$. Una explicación de este juego puede encontrarse en la sección B.3 del apéndice B.

C.4. Cooperación mutua o perder

El juego de cooperación mutua o perder aparece cuando $\frac{1}{q} = \frac{2-q}{q} = \frac{3-2q}{q}$. Esto genera que $CC > DC \approx DD \approx CD$ o bien $CC > DC = DD = CD$. De esta forma CC se convierte en la mejor paga y cualquier

opción que no sea cooperación mutua dará ganancias menores. Este juego puede compararse con una carrera en parejas en donde los individuos se encuentran amarrados por los pies, ésto es, si colocamos a las personas que conforman a la pareja uno al lado del otro y amarramos el pie izquierdo de uno al pie derecho del otro. De esta forma ambos jugadores tienen que cooperar y ponerse de acuerdo en que dirección ir y en que momento moverse. Las cuatro posibles consecuencias de cooperar o detractar serían las siguientes:

- CC: ambos jugadores se ponen de acuerdo y logran coordinarse para poder avanzar a buena velocidad.
- DC: un jugador tiene la disposición para ponerse de acuerdo pero el otro jugador no. Esto causa que al intentar avanzar no estén coordinados y no avancen o avancen muy poco.
- CD: pasa una situación completamente igual a lo que sucede en el caso DC.
- DD: en este caso ninguno de los jugadores tiene la intención de ponerse de acuerdo y cada quien pretende hacer e ir a donde el quiera. Es de esperarse que bajo dichas circunstancias estos competidores no lograrán avanzar.

Un ejemplo de este juego puede encontrarse en el cuadro C.1.

		B	
		C	D
A	C	2 , 2	0 , 0
	D	0 , 0	0 , 0

Cuadro C.1: Ejemplo de cooperación mutua o perder. Los valores de la matriz de pago indican la cantidad de pasos avanzados.

Apéndice D

Metodología utilizada para validar el marco de trabajo propuesto

El tamaño del espacio en el que interactúan los agentes es de 33×33 celdas. La relación entre el tamaño de las celdas y el tamaño de los agentes es de 1 : 1, es decir, un agente cabe perfectamente en el espacio de una celda. Dadas las características de las de la plataforma utilizada (NetLogo), los agentes pueden desplazarse en fracciones de celdas y los agentes pueden encimarse entre ellos. Estas dos características propician que puedan haber dos o más agentes en una misma celda. El espacio utilizado no presenta límites por lo que adquiere una forma toroidal.

Cada una de las tres reglas analizadas se trató con un proceso similar con pocas variaciones en los muestreos. Los análisis se estructuraron con la idea de estudiar al sistema en sus condiciones estables. Con ese objetivo se realizaron simulaciones de 100,000 iteraciones, de las cuales 95,000 se tomaron para relajamiento del sistema y se tomaron promedios de las últimas 5,000. Se realizó una simulación completa por cada una de las posibles configuraciones que se describen a continuación:

Comportamiento de la matriz de pagos: Como puede verse en los cuadros 1.3, 1.4 y 1.5, cada regla es dependiente de tres variables: b , c y dependiendo de la regla en cuestión r , w ó q . Para estas simulaciones se fijamos arbitrariamente los valores de $b = 4$ y $c = 2$ mientras que

r , w ó q (de aquí en adelante denotaremos a estas variables como x) tomarán valores del conjunto $[0.01, 0.02, \dots, 0.99, 1]$ para selección por parentesco y reciprocidad indirecta. Para reciprocidad directa x tomará valores del conjunto $[0.01, 0.02, \dots, 0.98, 0.99]$ (se omitió el valor $x = 1$ por causa una división entre 0).

Tipo de afinación de la tendencia: Cómo ya se explicó en la sección **Marco de trabajo propuesto**, después de cada juego los agentes tratan de adaptar su comportamiento para tener un mejor desempeño dentro del medio ambiente social en que se encuentran. Se implementaron dos formas de realizar este ajuste: una centrada en la *aptitud* del agente (afinación por aptitud ó *aa*) y otra centrada en la diferencia que exista entre la ganancia pasada y la actual (afinación por ganancia ó *ag*). Para evaluar el impacto de cada uno de estos tipos de ajuste se fijaron valores en los parámetros manera arbitraria y se realizaron simulaciones siguiendo la descripción que se encuentra al inicio de este apéndice. como se indica en el cuadro . Los valores utilizados en los parámetros se encuentran indicados en el cuadro D.1.

Parámetro	KS	DR	IR
b	4	4	4
c	2	2	2
ip_cC	0.65	0.65	0.65
ip_cD	0.35	0.35	0.35
n	60	60	60
in_c	0.5	0.5	0.5
in_d	0.5	0.5	0.5
Rango de valores para x	[0.1,...,1] ...	[0.1,...,1] ...	[0.1,...,1] ...
Intervalo de muestreo en x	0.01	0.01	0.01
Tipo de afinación	[aa,ag]	[aa,ag]	[aa,ag]

Cuadro D.1: Valores de los parámetros utilizados para determinar el impacto de los diferentes tipos de afinación de la tendencia.

Probabilidades cooperativas iniciales: Como se menciona en la descripción del marco de trabajo, cada agente inicia la simulación con una probabilidad cooperativa (p_c) determinada por el tipo de agente (cooperador o desertor) que es inicialmente. A partir de aquí en adelante se

tomarán en cuenta los resultados obtenidos en las secciones anteriores para la realización de los análisis subsecuentes. Los valores de los parámetros usados para los experimentos correspondientes están detallados en el cuadro D.2.

Parámetro	KS	DR	IR
b	4	4	4
c	2	2	2
ip_cC	[0.65, 0.75, 0.85, 0.95, 0.99]		
ip_cD	[0.01, 0.05, 0.15, 0.25, 0.35]		
n	60	60	60
in_c	0.5	0.5	0.5
in_d	0.5	0.5	0.5
Rango de valores para x	[0.1,...,1] ...[0.1,...,1] ...[0.1,...,1]		
Intervalo de muestreo en x	0.01	0.01	0.01
Tipo de afinación	aa	ag	ag

Cuadro D.2: Valores de los parámetros utilizados para determinar el impacto de la probabilidad cooperativa inicial. Los valores en negritas indican resultados de secciones anteriores.

Población: En esta sección se analiza el impacto que tiene la cantidad de agentes presentes en el modelo. Se esperaba que para KS y IR el tamaño de la población no tuviera impacto. Para DR el tamaño de la población debería de ser un factor decisivo. Los parámetros utilizados se encuentran en el cuadro D.3.

Proporción inicial de cooperadores: La idea tras este análisis es identificar que tan dependiente es la proporción final de cooperadores a la proporción inicial. Las proporciones iniciales de cooperadores usadas fueron [0, 0.333, 0.5, 0.666, 1] y se utilizaron proporciones iniciales de desertores que complementarían para obtener las poblaciones encontradas en la sección anterior. El resto de los valores utilizados en los parámetros pueden encontrarse en el cuadro D.4.

Comportamiento: Finalmente se obtuvo el comportamiento promedio de las diferentes reglas. Se fijaron los parámetros con los valores

Parámetro	KS	DR	IR
b	4	4	4
c	2	2	2
ip_cC	0.65	0.65	0.99
ip_cD	0.35	0.35	0.45
n	[10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100]		
in_c	0.5	0.5	0.5
in_d	0.5	0.5	0.5
Rango de valores para x	[0.1,...,1]	[0.1,...,1]	[0.1,...,1]
Intervalo de muestreo en x	0.01	0.01	0.01
Tipo de afinación	aa	ag	ag

Cuadro D.3: Valores de los parámetros utilizados para determinar el impacto del tamaño de la población. Los valores en negritas indican resultados de secciones anteriores.

Parámetro	KS	DR	IR
b	4	4	4
c	2	2	2
ip_cC	0.65	0.65	0.99
ip_cD	0.35	0.35	0.45
n	60	20	60
in_c	[0, 0.333, 0.5, 0.666, 1]		
in_d	[1, 0.666, 0.5, 0.333, 0]		
Rango de valores para x	[0.1,...,1] ...	[0.1,...,1] ...	[0.1,...,1] ...
Intervalo de muestreo en x	0.01	0.01	0.01
Tipo de afinación	aa	ag	ag

Cuadro D.4: Valores de los parámetros utilizados para determinar el impacto de las proporciones iniciales de cooperadores y desertores. Los valores en negritas indican resultados de secciones anteriores.

que se muestran en el cuadro D.5 y se promediaron los resultados obtenidos de diez simulaciones para cada intervalo de muestreo de x .

Parámetro	KS	DR	IR
b	4	4	4
c	2	2	2
ip_cC	0.65	0.65	0.99
ip_cD	0.35	0.35	0.45
n	60	20	60
in_c	0.5	1	0.5
in_d	0.5	0	0.5
Rango de valores para x	[0.1,...,1] ...	[0.1,...,1] ...	[0.1,...,1]
Intervalo de muestreo en x	0.01	0.01	0.01
Tipo de afinación	aa	ag	ag

Cuadro D.5: Valores de los parámetros utilizados para determinar el impacto del tamaño de la población. Los valores en negritas indican resultados de secciones anteriores.

Apéndice E

Pseudocódigo de las tres reglas estudiadas.

E.1. Selección por parentesco (KS)

En nuestra implementación, al seguir esta regla, aquellos agentes que se encuentren participando en un juego supondrán que tienen alguna probabilidad de estar relacionado con el otro participante. Aunque un jugador este etiquetado como cooperador, existirán condiciones bajo las cuales no le sea posible cooperar aunque así lo desee. Por ejemplo, no está en la mejor disposición o no es capaz de actuar lo suficientemente rápido para cooperar con el otro. La decisión aleatoria basada en la variable p_c nos permite simular este tipo de eventos además de poder simular como un agente cooperador va superando las condiciones adversas conforme va apegándose más a una actitud cooperadora (p_c va teniendo valores más altos).

```
program play kin selection
```

```
1: var: decision: Real;  
2: decision := random(0, 1);  
3: if (decision ≤  $p_c(i)$ ) then  
4:   cooperate(i) = true;  
5: else  
6:   cooperarte(i) = false;  
7: end if
```

Una vez que los jugadores han determinado de manera simultánea que acción van realizar, continuarán con la sección en donde suman o

restan de su *aptitud* la cantidad indicada por la matriz de pago correspondiente.

E.2. Reciprocidad Directa (DR)

De acuerdo con (Nowak, 2006), existen dos tipos de agentes: a) aquellos que siempre optan por detractar (desertores) y b) agentes siguiendo la estrategia tit-for-tat (cooperadores). El primer movimiento de aquellos agentes usando tit-for-tat comenzarán cooperando. Para la implementación puede agregarse un arreglo booleano a cada uno de los agentes para que puedan seguir la estrategia tit-for-tat. De esta forma en el arreglo del i -ésimo jugador puede almacenarse la última acción del jugador j . Para poder analizar la propagación cultural de la cooperación se hicieron ajustes a la regla y el comportamiento se describe a continuación:

```
program play direct reciprocity
```

```
1: var: decision: Real;  
2: decision := random(0, 1);  
3: if (decision  $\leq$   $p_c(i)$ ) then  
4:   if (array[ $j$ ] == true) then  
5:     cooperate( $i$ ) = true;  
6:   else  
7:     cooperate( $i$ ) = false;  
8:   end if  
9: else  
10:  cooperarte( $i$ ) = false;  
11: end if
```

Para actualizar la *aptitud* de los agentes, una vez que éstos han decidido de forma simultánea que acción van a realizar siguen la matriz de pago correspondiente.

E.3. Reciprocidad Indirecta (IR)

Como se especifica en (Nowak, 2006), el valor de q tiene un rol importante. Antes de tomar alguna decisión, cada jugador tiene la oportunidad de reconocer a su compañero de juego como cooperador o como desertor. Un jugador desertor nunca cooperará con su compañero,

mientras que un cooperador solamente cooperará con otro cooperadores y detraerá si logra reconocer al otro jugador como un desertor. Un cooperador cooperará con un desertor con probabilidad $1 - q$, simulando así que el cooperador no fue capaz de reconocer al otro como un desertor. Para poder estudiar la propagación cultural de la cooperación el código que se utilizó es el siguiente:

```
program play indirect reciprocity
```

```

1: var: decision, recognition: Real;
2: decision := random(0, 1);
3: recognition := random(0, 1);
4: if (cooperate(i) == true and cooperate(j) == true) then
5:   if (recognition ≤ (1 - q)) then
6:     if (decision ≤  $p_c(i)$ ) then
7:       cooperate(i) := true;
8:     else
9:       cooperate(i) := false;
10:    end if
11:  else
12:    cooperate(i) := true;
13:  end if
14: else
15:   if (cooperate(i) == true and cooperate(j) == false) then
16:     if (recognition ≤ (1 - q)) then
17:       if (decision ≤  $p_c(i)$ ) then
18:         cooperate(i) := true;
19:       else
20:         cooperate(i) := false;
21:       end if
22:     else
23:       cooperate(i) := false;
24:     end if
25:   else
26:     if (cooperate(i) == false) then
27:       if (decision ≤  $p_c(i)$ ) then
28:         cooperate(i) := true;
29:       else
30:         cooperate(i) := false;

```

```
31:         end if
32:     end if
33: end if
34: end if
```

Una vez que los jugadores definieron de manera simultánea que acciones van a realizar, actualizarán su *aptitud* sumando a restando los valores indicados por la matriz de pago correspondiente.

Bibliografía

- Aumann, R. J. y Maschler, M. (1985). Game theoretic analysis of a bankruptcy problem from the Talmud. *Journal of Economic Theory*, 36(2):195–213.
- Axelrod, R. M. (1984). *The Evolution of Cooperation*. Basic Books.
- Brackstone, M. y McDonald, M. (1999). Car-following: a historical review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2(4):181–196.
- Brams, S. J. (1994). Chapter 30 Voting procedures. *Handbook of Game Theory with Economic Applications*, 2:1055–1089.
- Bretherton, D., Bodger, M., y Cowling, J. (2005). SCOOT - Managing Congestion, Communications and Control. In *12th World Congress on Intelligent Transport Systems*.
- Christie, R. (2001). The effectiveness of driver training as a road safety measure: an international review of the literature. In *Road Safety Research, Policing and Education Conference, 2001, Melbourne, Victoria, Australia*.
- Cools, S.-B., Gershenson, C., y D’Hooghe, B. (2013). Self-Organizing Traffic Lights: A Realistic Simulation. In Prokopenko, M., editor, *Advances in Applied Self-Organizing Systems SE - 3*, Advanced Information and Knowledge Processing, pages 45–55. Springer London.
- Cortés-Berrueco, L., Gershenson, C., y Stephens, C. (2014). Self-organization Promotes the Evolution of Cooperation with Cultural Propagation. In Elmenreich, W., Dressler, F., y Loreto, V., editors, *Self-Organizing Systems SE - 13*, volume 8221 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 145–150. Springer Berlin Heidelberg.

- Cortés-Berrueco, L. E., Gershenson, C., y Stephens, C. R. (2013). Self-Organization Promotes the Evolution of Cooperation with Cultural Propagation.
- Cortés-Berrueco, L. E., Gershenson, C., y Stephens, C. R. (2016). Traffic Games: Modeling Freeway Traffic with Game Theory. *PLOS ONE*, 11(11):e0165381.
- Dugatkin, L. A. y Godin, J.-G. J. (1992). Prey approaching predators: a cost-benefit perspective. *Annales Zoologici Fennici*, 29(4):233–252.
- Dukes, R. L., Clayton, S. L., Jenkins, L. T., Miller, T. L., y Rodgers, S. E. (2001). Effects of aggressive driving and driver characteristics on road rage. *The Social Science Journal*, 38(2):323–331.
- Gershenson, C. y Helbing, D. (2015). When slower is faster. *Complexity*, 21(2):9–15.
- Guzmán, H. A. (2012). Un modelo realista para el tráfico vehicular heterogéneo basado en el paradigma de autómatas celulares. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Guzmán, H. A., Lárraga, M. E., y Alvarez-Icaza, L. (2015). A Two Lanes Cellular Automata Model for Traffic Flow Considering Realistic Driving Decisions. *J. Cellular Automata*, 10(1-2):65–93.
- Helbing, D. (2001). Traffic and related self-driven many-particle systems. *Reviews of Modern Physics*, 73(4):1067–1141.
- Helbing, D. y Huberman, B. A. (1998). Coherent moving states in highway traffic. 396(6713):738–740.
- Hollander, Y. y Prashker, J. N. (2006). The applicability of non-cooperative game theory in transport analysis. *Transportation*, 33(5):481–496.
- Ibrahim, A., Ismail, M., Kiong, T., y Mastan, Z. (2005). Development of Software Planning Tools for An-Intelligent Traffic Light Wireless Communication Link Using 5.8 GHz WLAN. In *2005 Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics*, pages 378–382. IEEE.
- Ichinose, G. y Sayama, H. (2014). Evolution of fairness in the not quite ultimatum game. *Scientific reports*, 4:5104.

- Jia, B., Jiang, R., Wu, Q.-S., y Hu, M.-b. (2005). Honk effect in the two-lane cellular automaton model for traffic flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 348:544–552.
- Johnstone, R. A. (1996). Multiple Displays in Animal Communication: ‘Backup Signals’ and ‘Multiple Messages’. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 351(1337):329–338.
- Katsaros, K., Kernchen, R., Dianati, M., Rieck, D., y Zinoviou, C. (2011). Application of vehicular communications for improving the efficiency of traffic in urban areas. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 11(12):1657–1667.
- Kesting, A., Treiber, M., y Helbing, D. (2007). General Lane-Changing Model MOBIL for Car-Following Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1999:86–94.
- Lárraga, M. y Alvarez-Icaza, L. (2010). Cellular automaton model for traffic flow based on safe driving policies and human reactions. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(23):5425–5438.
- Macy, M. W. y Flache, A. (2002). Learning dynamics in social dilemmas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99 Suppl 3:7229–36.
- Nagatani, T. (2005). Chaos and dynamical transition of a single vehicle induced by traffic light and speedup. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 348:561–571.
- Nagel, K. y Schreckenberg, M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 2(12):2221–2229.
- Nakata, M., Yamauchi, A., Tanimoto, J., y Hagishima, A. (2010). Dilemma game structure hidden in traffic flow at a bottleneck due to a 2 into 1 lane junction. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(23):5353–5361.
- Nowak, M. A. (2006). Five rules for the evolution of cooperation. *Science (New York, N.Y.)*, 314(5805):1560–3.
- O’Neill, B. (1994). Chapter 29 Game theory models of peace and war. *Handbook of Game Theory with Economic Applications*, 2:995–1053.

- Osborne, M. J. y Rubinstein, A. (1994). *A Course in Game Theory*, volume 1. The MIT Press.
- Santos, F. C., Pacheco, J. M., y Lenaerts, T. (2006). Evolutionary dynamics of social dilemmas in structured heterogeneous populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(9):3490–4.
- Skyrms, B. (1990). *The Dynamics of Rational Deliberation*. Harvard University Press.
- Talebpour, A., Mahmassani, H. S., y Hamdar, S. H. (2015). Modeling Lane-Changing Behavior in a Connected Environment: A Game Theory Approach. *Transportation Research Procedia*, 7:420–440.
- Toledo, B. a., Muñoz, V., Rogan, J., Tenreiro, C., y Valdivia, J. a. (2004). Modeling traffic through a sequence of traffic lights. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 70(1 2):0–11.
- Vasconcelos, V. V., Santos, F. C., Pacheco, J. M., y Levin, S. A. (2014). Climate policies under wealth inequality. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(6):2212–6.
- von Neumann, J. y Morgenstern, O. (1944). *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton University Press.
- Wada, M., Yendo, T., Fujii, T., y Tanimoto, M. (2005). Road-to-vehicle communication using LED traffic light. In *IEEE Proceedings. Intelligent Vehicles Symposium, 2005.*, pages 601–606. IEEE.
- Wang, M., Hoogendoorn, S. P., Daamen, W., van Arem, B., y Happee, R. (2015). Game theoretic approach for predictive lane-changing and car-following control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 58:73–92.
- Wastavino, L., Toledo, B., Rogan, J., Zarama, R., Muñoz, V., y Valdivia, J. (2007). Modeling traffic on crossroads. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 381:411–419.
- Wilensky, U. (1999). NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>, Northwestern University(Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling).

Zadeh, L. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3):338–353.

Zhang, H., Su, Y., Peng, L., y Yao, D. (2010). A review of game theory applications in transportation analysis. In *2010 International Conference on Computer and Information Application*, pages 152–157. IEEE.