

# Microsimulación de la operación de vehículos de emergencia

## SIMULATION OF EMERGENCY VEHICLES OPERATIONS

Cristián E. Cortés\*, Bruno Stefoni

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile

\* Autor para correspondencia:

ccortes@ing.uchile.cl

### RESUMEN

La operación de vehículos de emergencia (EV) afecta considerablemente el tráfico debido a los cambios que provocan en las condiciones de circulación en el entorno de sus rutas. Adicionalmente, estos vehículos no respetan algunas reglas del tránsito, a diferencia del resto. Con el fin de simular este fenómeno, utilizamos el microsimulador de tráfico PARAMICS con una API para reproducir el comportamiento anómalo encontrado en la literatura y en videos facilitados por el Cuerpo de Bomberos de Santiago, i.e., cruzar intersecciones sin preferencia, usar pistas exclusivas, forzar cambiar pista a vehículos cercanos u obligarlos a cruzar con luz roja. Se presentan resultados para una red sintética bajo distintos niveles de congestión y porcentaje de conductores cooperando.

Palabras clave: vehículos de emergencia, microsimulación de tráfico, despacho de flota

### ABSTRACT

*The operation of emergency vehicles (EV) considerably affects traffic due to the changes induced on the conditions of circulation around the EV's routes. Additionally, they do not respect traffic rules as a normal vehicle should do. In order to simulate this phenomenon, we use the microscopic traffic simulator PARAMICS with an API developed to replicate the anomalous behavior found in the literature and in video footage provided by the Santiago Fire Department, i.e., crossing intersections without right-of-way, using bus only lanes, forcing nearby vehicles to change lane or to cross at a red light. We present results for a synthetic network under different levels of congestion and percentage of drivers cooperating.*

*Keywords: Emergency vehicles, Microscopic traffic simulation, Fleet dispatch*

## 1. INTRODUCCIÓN

En la ciudad de Santiago de Chile, distintas instituciones son responsables de proveer servicios de emergencia, e.g., Carabineros de Chile (fuerzas policiales del país), Socorro Andino (operaciones de rescate en montañas), Cuerpo de Bomberos de Santiago (apagar incendios, remoción de escombros, etc.). El último corresponde al cuerpo de bomberos más grande del país, que cubre un total de 9 comunas (división urbana usada para las regiones de Chile) en Santiago. Las personas en el Cuerpo de Bomberos de Santiago (CBS) han expresado interés en indagar los posibles impactos que puede conllevar cambios estructurales que se están implementando en la red del centro histórico de Santiago, debido a que podrían implicar aumentos en los tiempos de respuesta de los servicios de emergencia.

En paralelo, recientemente el CBS empezó a recolectar datos de trayectorias GPS desde sus principales carros bomba, además de juntar material audiovisual camino a emergencia desde el punto de vista de sus conductores. Para hacer uso de estos nuevos datos disponibles y llevar a cabo una evaluación sobre el impacto en tiempos de respuesta, se ha desarrollado una API en C++ con el fin de incorporar los efectos debido a la presencia de vehículo(s) de emergencia (EV por su sigla en inglés) sobre vehículos privados (POV por su sigla en inglés) en el microsimulador de tráfico PARAMICS. Con esta nueva API cargada en PARAMICS, podemos efectuar una evaluación sobre variación en tiempos de respuesta con los distintos cambios a la red mediante simulaciones.

El material audiovisual entregado por el CBS fue analizado. En los videos, diversos efectos sobre el tráfico común fueron observados desde el punto de vista de los conductores de carros bomba. Como efectos observados con mayor frecuencia se encuentra: cruzar intersecciones sin prioridad, usar pistas exclusivas o pistas solo bus, forzar a vehículos cercanos cambiar de pista o a subirse a la acera en caso de que el tráfico se perciba como detenido, forzar a otros vehículos a cruzar intersecciones sin prioridad (incluyendo intersecciones semaforizadas). Este trato especial que los conductores de vehículos comunes le dan a los EV en el tráfico ha sido reportado también en otros trabajos (Buchenscheit et al., 2009; Weinert y Düring, 2015).

Con respecto a los modelos propuestos para incorporar estos efectos en el tráfico dentro de un simulador, es necesario incorporar la variación en la población de conductores, debido a que la cooperación de POV no está asegurada. En primer lugar, la población de conductores ha sido estudiada anteriormente en la literatura, concluyendo que no es homogénea (Panwai y Dia, 2005; Evans y Wasielewski, 1983; Ranney, 1999); en consecuencia, no cualquier conductor es cooperativo con los servicios de emergencia intentando cruzar a través del tráfico. Otra razón relevante es que los conductores cooperativos a veces no escuchan las sirenas de EV bloqueando su paso debido a distracciones, como puede ser su propio celular (Haque y Washington, 2014), o porque los ruidos presentes comúnmente en el tráfico y en la calle cubren el sonido de la sirena (De Lorenzo y Eilers, 1991).

El objetivo principal de este trabajo es simular vehículos de emergencia en una red urbana con todos los efectos que causan sobre el tráfico común, haciendo entonces posible evaluar impactos sobre tiempos de respuesta en la evaluación de proyectos de transporte que ocupan simulación. Este artículo está organizado en cuatro secciones. La primera describe los microsimuladores de tráfico (MTS por su sigla en inglés) y en particular PARAMICS. Los modelos detrás de las interacciones de los EV simulados desarrollados para la API son desarrollados en la segunda sección. En la tercera sección, se muestran resultados sobre efectos en tiempo de respuesta de EV y tiempo de viaje de POV en una red de prueba con distintos niveles de congestión y porcentaje de conductores cooperando. Finalmente, las conclusiones y trabajo futuro se discuten en la última parte.

## 2. MODELOS DE SIMULACIÓN DE TRÁFICO CON ÉNFASIS EN PARAMICS

La microsimulación de tráfico ha sido utilizada en la ingeniería de transporte en las últimas dos décadas para realizar evaluación social de proyectos de transporte o de planificación urbana. Últimamente, esta técnica también se ha ocupado para estimar la emisión de gases de efectos invernadero debido al flujo de vehículos motorizados. Cada MTS tiene distintos modelos detrás que le permiten emular el tráfico real, los modelos más relevantes en los MTS son tres: el modelo de seguimiento vehicular (CFM), el modelo de cambio de pista (LCM), el modelo de aceptación de brecha (GAM). Además de qué modelos hay detrás de la simulación, existen otras diferencias relevantes entre los MTS, por ejemplo, la interfaz o GUI, requerimientos computacionales y calidad gráfica. Un análisis comparativo de algunos MTS en estos aspectos se puede encontrar en Kotusevski y Hawick (2009).

Entre los tres modelos importantes en la microsimulación, el más vital es el CFM. Diversos CFM se han propuesto desde el comienzo de los microsimuladores de tráfico. Una revisión de los distintos tipos de modelos de seguimiento vehicular y su respectiva historia detrás de sus desarrollos se puede leer en el artículo de Brackstone y McDonald (1999). Un trabajo más reciente sobre este mismo tema se puede encontrar en Saifuzzaman y Zheng (2014).

Con respecto al CFM en el MTS PARAMICS, desarrollado por Quadstone Paramics (2017), de acuerdo a Brackstone y McDonald (1999) este modelo pertenece a la categoría de modelos *action point*. Saifuzzaman y Zheng (2014) lo ponen en la clase de modelos *perceptual threshold*. Fundamentalmente, los modelos en estas categorías dan órdenes con un nivel de aceleración a los vehículos simulados hasta que estos llegan a un cierto umbral. Dos variables se miden en cada instante discreto de simulación para poder definir umbrales: *headway h* y *speed difference*. El headway se define como la cantidad de tiempo necesario, en segundos, para que un vehículo colisione con el vehículo liderando (aquel en frente suyo). La variable *speed difference* consiste simplemente en la diferencia entre las velocidades del vehículo y el vehículo liderando.

Un reporte técnico escrito por Duncan (1997) entrega una explicación general de los distintos modelos internos en PARAMICS. De acuerdo al autor, el CFM se inspira en el modelo de Fritzsche y Ag (1994), considerado un modelo psicofísico de seguimiento vehicular. La idea central de los modelos psicofísicos de seguimiento vehicular es que los conductores buscan mantener un cierto *headway* con respecto al vehículo líder, o una cierta velocidad en caso de que no haya un vehículo en frente. Los conductores intentan obtener este *headway* deseado mediante la aceleración y desaceleración del vehículo, la magnitud y sentido de la aceleración depende de la diferencia entre las velocidades (*speed-difference*) y del actual *headway* (ver Figura 1).

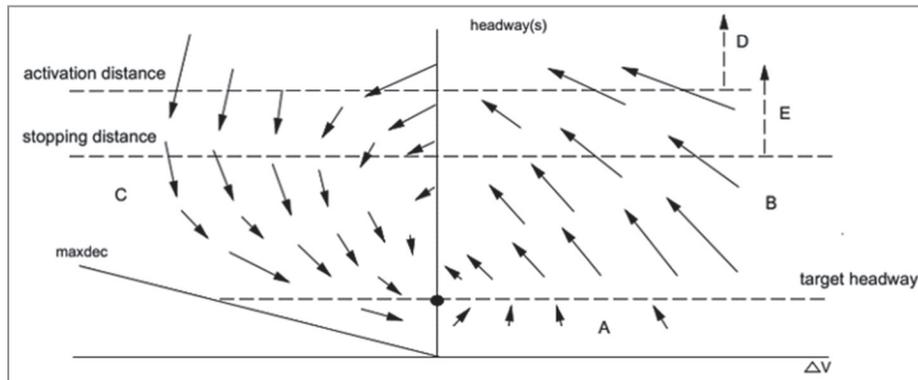


Figura 1. "Representación del espacio de fase *headway/speed-difference* y los valores de aceleración resultantes producidos por el modelo de Seguimiento Vehicular de PARAMICS. La magnitud de cada vector es una representación de la aceleración producto del modelo de Seguimiento Vehicular dado un par. Notar que los vectores no están a escala" (Duncan, 1997).

Otro aspecto clave es el uso de variables aleatorias *aggressiveness* ( $A_g$ ) y *awareness* ( $A_w$ ) con el fin de modelar la variación del *headway* deseado en la población de conductores. La heterogeneidad de conductores (i.e., conductores con diferencias en edad, género, estado anímico, etc.) se ha vinculado a cambios en los estilos de conducción y *headway* deseado (Panwai y Dia, 2005; Evans y Wasieleski, 1983; Ranney, 1999). En PARAMICS, el *mean target headway* (MTH) o *headway* deseado promedio, corresponde a 1 segundo por defecto, pero este valor varía para cada conductor dependiendo de los valores de  $A_g$  y  $A_w$ . Estas dos variables tienen valores enteros entre 0 y 8, el cual se define inicialmente de manera aleatoria en el momento que cada vehículo se crea.

Sin embargo, estas variables pueden cambiar durante la simulación dependiendo de condiciones de tráfico y ruteo. Por ejemplo, si un vehículo va a virar a la izquierda en la siguiente intersección,  $A_g$  y  $A_w$  también afectan el LCM indirectamente, e.g., conductores con un valor más alto de  $A_w$  (i.e. más precavidos) tendrán un *headway* deseado mayor, de esta forma facilitando la entrada de vehículos que desean cambiar de pista en pistas contiguas. Por otro lado, conductores con una variable *aggressiveness* mayor, tendrán un *headway* deseado menor, dificultando el cambio de pista de conductores en la cercanía que deseen integrarse a la pista del vehículo "agresivo".

Finalmente, cabe mencionar que los dos parámetros más relevantes para el simulador PARAMICS son el MTH mencionado anteriormente y el *mean reaction time* (MRT) o tiempo de reacción promedio, el cual se ocupa para simular el retraso medio temporal que se observa en la disipación de colas de vehículos en el tráfico real. Ambos parámetros se calibran usualmente de manera que reproduzcan de la mejor forma posible los datos reales ocupados para el estudio siendo llevado a cabo con el simulador (Reza et al., 2016; Ratrouf et al., 2015; Zhong et al., 2016).

### 3. MODELOS PARA SIMULAR EVS CON UN API EN PARAMICS

Con el fin de incorporar en PARAMICS los efectos que los EVs tienen sobre el tráfico observado en el material audiovisual dado por el CBS, se programaron dos modelos en la API en C++. Estos modelos modifican la forma en que los POV reaccionan frente a la presencia de vehículos de emergencia. Se diseñaron dos modelos antes de programarlos en la API, el EV Lane Changing Model (ELCM) o modelo de cambio de pistas para EV y el EV Sidewalk Model (ESM) o modelo de

aceras para EV. Como alcance, ambos modelos deben pensarse ocupando funciones de la librería que viene en PARAMICS, que si bien es de un tamaño grande en comparación a otros softwares de microsimulación de tráfico Zhi et al. (2005), tiene limitaciones. Por ejemplo, para adelantar a otro vehículo es necesario cambiarse de pista, no es posible “hacerse a un lado” como se ha visto en algunos videos de vehículos de emergencia. Para el simulador, las calles en el plano horizontal no son un espacio continuo sino un conjunto discreto de pistas.

### 3.1. Modelo de cambio de pista para EV

Este modelo dicta la maniobra que un conductor de un vehículo privado debe efectuar en caso de que un EV esté acercándose o ya se encuentre cerca, provocando que el conductor esté alerta. En el caso que un vehículo esté en estado alerta dentro de PARAMICS:

- Si no se encuentra en la pista del EV: se evita cambiar a la pista del EV.
- Si se encuentra en la pista del EV: se cambia a cualquier pista contigua si es factible (i.e., hay suficiente tiempo para efectuar la maniobra de cambio de pista y hay suficiente espacio para el vehículo).
- Si se encuentra en la pista del EV, pero las pistas adyacentes se encuentran muy congestionadas y no es factible cambiar de pista: avanzar y re-evaluar la situación en 3 segundos más.

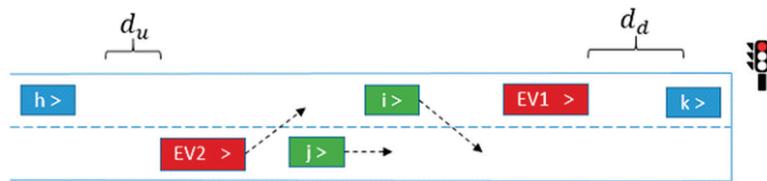
La idea detrás de estas condiciones es permitir el paso del EV lo más rápido posible, lo cual es precisamente lo que los conductores intentar hacer en la realidad cuando escuchan la sirena e intentar salir del camino de un EV. Esto significa también no cambiarse a la pista del EV.

En caso que haya más de un EV en un mismo arco, el “EV líder” se define como el vehículo de emergencia más cercano a la línea de detención (i.e. el final aguas abajo del arco). En caso que un vehículo es un EV, pero no es el líder, éste buscará cambiarse a la pista del líder, siguiéndolo.

Respecto de cuándo un vehículo cambiará a un estado alerta, esto ocurrirá solamente bajo tres condiciones:

- El vehículo se encuentra entre dos vehículos de emergencia en un mismo arco.
- El vehículo se encuentra a lo más  $d_u$  metros aguas abajo del EV líder.
- El vehículo se encuentra a lo más  $d_d$  metros aguas arriba del EV más alejado a la línea de detención.

Los parámetros del modelo  $d_u$  y  $d_d$  deberían calibrar con datos reales, pero se definen con un valor por defecto de 40 y 5 metros respectivamente. Debería además mencionarse que el ELCM afecta a buses de transporte público de manera especial, forzándolos a cambiar de pista en caso que no se encuentre cerca de una parada. Más aún, los comandos que indican que se debe efectuar un cambio de pista pueden ser ignorados en el caso de los buses de transporte público, ya que podrían afectar su ruta programada.



*Figura 2.* Esquema de simulación de un arco unidireccional con vehículos bajo la influencia de la API. Los vehículos i y j cumplen las condiciones para estar alerta, por lo que siguen las instrucciones descritas anteriormente, es decir, intentarán quedarse o cambiarse de pista (flechas negras). EVs que no sean el líder intentarán cambiarse a la pista del líder. Para efectos de la API y el simulador, la distancia entre vehículos y la línea de detención se mide a partir del parachoques frontal, esto explica porqué el vehículo k no se encuentra alerta.

### 3.2. Modelo de aceras para EV

En casos de congestión alta, si hay una acera disponible en algún lado de los arcos, los vehículos livianos (aquellos que no son camiones, vehículos de carga o buses) a veces se suben a la acera con el fin de liberar espacio en la pista y dejar que el EV avance en el tráfico congestionado. Las aceras se codificaron como una pista por la cual ningún vehículo puede transitar, en caso de que a un vehículo se le ordene cambiarse a una pista de acera, este no podrá avanzar una vez que se cambie (i.e., permanece estático) y solo podrá realizar maniobras de cambio de pista para volver a una pista normal. En el modelo desarrollado para la API de PARAMICS, los vehículos livianos en una pista con una acera disponible al lado se subirán a la acera bajo tres condiciones:

- El vehículo se encuentra al menos a  $d_s$  metros de la intersección aguas abajo.
- El vehículo se encuentra a lo más  $d_i$  metros aguas abajo del EV líder.
- El vehículo tiene una velocidad promedio de  $v_s$  contando los últimos  $t_s$  segundos, además, los tres vehículos que están al frente (si existen) no se están moviendo.

Si estas condiciones no ocurren, reconsiderar subirse a la acera en 10 segundos más.

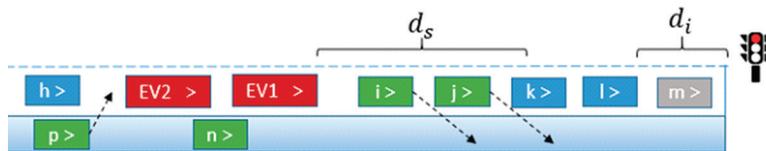


Figura 3. Esquema de simulación de un arco de una pista con una acera. Las flechas negras representan el movimiento ordenado por la API. Los vehículos de color verde son aquellos que están alerta en el instante mostrado. En el caso particular del vehículo  $m$ , este se encuentra a menos de  $d_i$  metros de la línea de detención, por lo que no se ve afectado por el modelo de aceras.

Estas condiciones buscan replicar bajo qué contexto se ha observado que los vehículos livianos se suben a la acera para permitir el paso de un EV. Esto bajo condiciones de tráfico con alta congestión, lejos de la intersección (de otra forma, se intenta cruzar sin prioridad) y con un EV cercano en la misma pista. Se debe mencionar que los vehículos en calles con más de una pista, primero intentarán cambiarse de pista antes de subirse a la acera, ya que es una maniobra más fácil y percibida como menos extrema. Por último, notar que  $d_i$ ,  $d_s$ ,  $v_s$  y  $t_s$  son parámetros del modelo con valores por defecto de 15 metros, 30 metros, 2 m/s y 20 segundos respectivamente.

### 3.3. Parámetros por defecto usados en los modelos

Como se ha mencionado anteriormente, está fuera del alcance de este trabajo la calibración del simulador. Las simulaciones en la red de prueba se llevaron a cabo usando los parámetros por defecto. En el caso de las distancias  $d_s$ ,  $d_i$  y  $d_u$ , los valores se definieron en gran parte a partir de lo observado en los videos. Sobre las distancias alerta en la literatura, en una investigación de Caelli y Porter (1980) entrevistan a choferes de ambulancias, quienes aseveran que la distancia alerta tiene un valor máximo de 100 metros. Además, en general los conductores con los vidrios arriba y escuchando la radio no se percatan de la presencia de un EV a la distancia. Weinert y Düring (2015) analizan 90 minutos de videos de EV en ruta hacia una emergencia. En este material se observa que el 25% de los POV reaccionan de alguna manera (i.e., acelerando o cambiando de pista) ante la presencia de un EV cuando se encuentran relativamente lejos de él (a más de 50 metros de distancia), mientras que el 50% reaccionan entre los 50 y 20 metros y el restante 25% reaccionaron cuando el EV ya estaba cerca, a menos de 20 metros de distancia.

En cuanto a los valores  $v_s$  y  $t_s$ , estos se calibraron visualmente para asemejarse a la realidad usando la interfaz gráfica de PARAMICS, de manera de observar vehículos subirse a la acera en arcos muy congestionados, como se ha visto en el material audiovisual del CBS. De manera similar, analizando los videos se determinó el valor de  $d_p$ , la distancia a la cual los vehículos están muy cerca del final de una calle como para subirse a la acera.

## 4. RESULTADOS EN UNA RED DE PRUEBA SINTÉTICA

### 4.1. Red de prueba utilizada

La red de prueba codificada para este estudio consiste en siete pares origen-destino paralelos. Como parte de la codificación de una red real de Santiago para la API de EV, se deben definir y codificar en PARAMICS las Vías Exclusivas (pistas con regulación especial presentes en Santiago, en las cuales solo se permite el paso de Buses y Taxis) y las aceras, por lo que también se incluirán en la red de prueba de este estudio. Se incorporaron restricciones especiales para poder codificar estas pistas especiales. En la Tabla 1 se describen los tipos de arcos en cada par origen-destino, cada uno con su número respectivo de pistas y demanda asociada.

Tabla 1  
Tipo de arcos en la red de prueba. EL: Vía exclusiva (bus y taxi solamente)

Tipo de Arco en par OD	Pistas	Demanda (veh/hr)
Una pista y acera	1	726
Dos pistas	2	1381
Tres pistas	3	2103
Dos pistas y dos EL	4	1706
Tres pistas y dos EL	5	2480
Cuatro pistas	4	2815
Cinco pistas	5	3506

En el *Modeller*, interfaz de usuario (GUI) ocupada para codificar redes en PARAMICS, las restricciones especiales sobre pistas como lo son las Aceras o EL se muestran con un color predeterminado. En este caso, bandas naranjas y amarillas se dibujan sobre las pistas que son EL y aceras respectivamente, como se muestra en la Figura 4. Cada par OD se conecta por siete arcos consecutivos con el mismo número de pistas. El primero y último arco de cada par OD contiene “Zonas”, espacios definidos por PARAMICS que pueden ser un origen o un destino. En los orígenes se generan vehículos en instantes aleatorios, en cambio en los destinos se destruyen los vehículos que han arribado a su destino. La demanda en cada par OD se definió manualmente de manera de generar la mayor congestión posible sin bloquear las zonas generadoras de vehículos nuevos.

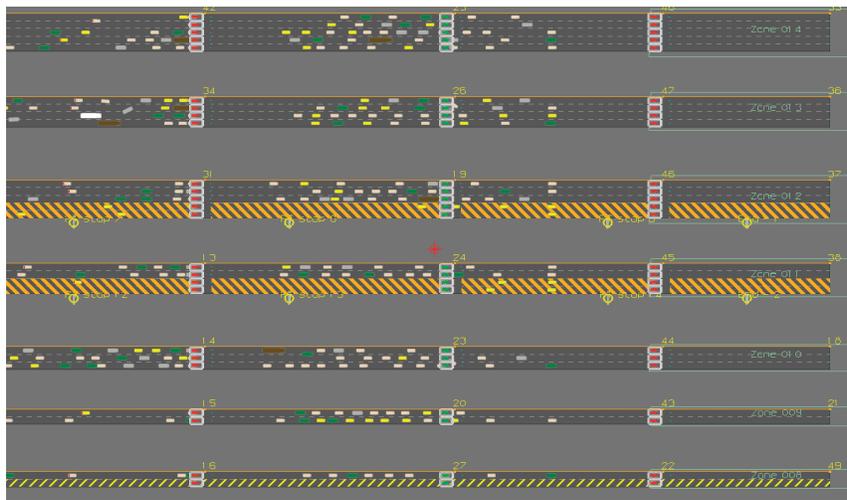


Figura 4. Red de prueba visualizada en el Modeller de PARAMICS.

## 4.2. Semáforos

Entre cada par OD se situaron cinco semáforos. Solamente el primero y último arco de cada par OD no tienen un semáforo en sus extremos aguas abajo. La programación de los semáforos (en segundos) se muestra en la Tabla 2. Son fases sencillas de dos fases. La primera fase da verde a aquellos vehículos que se mueven aguas abajo, mientras que la segunda fase les prohíbe el paso. Como convención, para cada par OD, la primera intersección semaforizada, en el sentido del tráfico, se denomina la intersección A, luego está la intersección B y así continúa hasta la intersección E aguas abajo. Los tiempos de las fases se hicieron de manera de obtener las colas más largas posibles en el escenario congestionado sin bloquear el movimiento de vehículos generados recientemente, aguas arriba. Por último, hay que mencionar que en la transición entre las fases 1 y 2 hay un mismo tiempo de amarillo y rojo-rojo que en la transición entre la fase 2 y la fase 1 del ciclo siguiente.

Tabla 2  
*Programación de semáforos*

Intersección	Fase 1	Amarillo	Rojo-rojo	Fase 2
A	20	3	2	5
B	20	3	2	10
C	20	3	2	15
D	20	3	2	20
E	20	3	2	25

## 4.3. Geometría de los arcos

Los arcos tienen un ancho dependiendo de su número de pistas, debido a que cada pista tiene un ancho constante de 3.65 metros. Por ejemplo, un arco con dos pistas tiene un ancho de 7.3 metros. En cuanto a los largos, la Tabla 3 especifica los distintos largos de cada arco consecutivo. A medida que un vehículo avanza aguas abajo, el largo de los arcos disminuye.

Tabla 3  
*Largo de Arcos*

Número de Arco	Largo [metros]
1	200
2	180
3	160
4	140
5	120
6	100
7	80

## 4.4. Tipo de Vehículos

Nueve tipos de vehículos se codificaron en la red de prueba. En la Tabla 4 se describen las dimensiones y porcentajes de demanda de cada uno. Los porcentajes de demanda corresponden a la proporción de vehículos presentes en el total del flujo vehicular, e.g., en el par OD con 4 pistas en sus arcos, hay una demanda total de 2815, de la cual 6% son vans. Luego, en promedio, hay un flujo de 169 vans por hora generadas en ese par OD. En cuanto a los buses y mini Buses, estos no presentan un porcentaje de demanda en la tabla debido a que tienen que ser codificados con horarios en un módulo especial para transporte público.

Tabla 4

*Tipos de vehículos con su porcentaje de demanda. LGV: Vehículos de carga livianos.*

Tipos de vehículo	Largo	Ancho	Porcentaje de Demanda
Auto	4	1.6	70,0%
Van	5	1.8	6,0%
Taxi	4	1.6	20,5%
EV	11,5	2.6	0,5%
LGV	5	1.9	1,5%
Camión	11	2.5	0,5%
Bus Privado	10	2.5	1,0%
Mini Bus	12	2.1	NA
Bus	18,5	2.1	NA

#### 4.5. Transporte Público

El transporte público en la red consiste en dos servicios de buses que se muestran en la Tabla 5; ambos servicios se codificaron en los pares OD con vías exclusivas (EL). Como se muestra en la tabla, el servicio S01 comienza a aparecer en la zona origen en el minuto 00:21:15, luego cada minuto y 15 segundos se genera un mini bus. El servicio 401, en cambio, empieza a las 00:21:00, después cada minuto aparece un nuevo bus en la zona de origen. Cada pasajero subiéndose a un bus corresponde a dos segundos adicionales en la parada. Sin embargo, si una parada no tiene pasajeros esperando, los buses se detienen de todas formas por uno a dos segundos. Cada arco con EL se codificó con una parada, significando un total de cinco paradas en un par OD con EL.

Tabla 5

*Horarios de servicios de transporte público*

Nombre Servicio	Tipo de Vehículo	Inicio	Frecuencia	Final
401	Bus	0:21:00	0:01:00	2:50:00
S01	Mini Bus	0:21:15	0:01:15	2:50:00

#### 4.6. Variables y parámetros de la simulación

En el presente artículo, ninguna calibración se realizó para los parámetros de PARAMICS o la API. Se usó el valor por defecto del MRT y MTH de 1 segundo. La distancia a la que los POV se percatan de la presencia de un EV aguas arriba se definió como 40 metros. La velocidad histórica para el modelo de acera corresponde a 2m/s, igual a 7,2 kmph o 4,5 mph. Finalmente, la cantidad de segundos en el reloj interno de cada vehículo que se cuentan para re-intentar un cambio de pista debido a la presencia de un EV se definió como 3 segundos.

Se probaron distintos escenarios al variar el porcentaje de vehículos cooperando, i.e., aquellos vehículos afectados por los modelos de cambio de pista y acera para presencia de EV. En particular, cinco niveles de cooperación fueron examinados en este estudio: 0%, 25%, 50%, 75%, 100%. Esto se hizo para cuatro niveles distintos de demanda, expresados como un factor de la “demanda de congestión máxima” predefinida manualmente como se mencionó anteriormente. Los cuatro niveles de demanda fueron: 0,85; 0,90; 0,95; 1,00.

Se realizaron tres horas de simulación por cada corrida, como se recomienda en Truong et al. (2015). La primera mitad no se registró en los datos, conocido como un “periodo de calentamiento” o *warmup*. Cada escenario, que consistía en un nivel de demanda y cooperación, se simuló 20 veces, cada uno con una semilla aleatoria distinta, generada con métodos que se encuentran en la librería *random* de Python. La cantidad de *time-steps* (instantes discretos de simulación) se dejó como el valor por defecto que viene en PARAMICS de 2 time-steps por segundo.

El tiempo de viaje de cada vehículo, posterior al periodo de calentamiento, se midió entre la primera intersección (en el final aguas abajo del primer arco) hasta la última intersección, justo antes de la zona de destino de cada par OD. Adicionalmente, la base de datos con el registro de tiempos de viaje se dividió en dos: tiempo de viaje *alerta* y *nunca alerta*. La primera parte consiste en los tiempos de viaje de aquellos vehículos que se encontraron cerca de un EV en su trayecto, provocando que la API los alertara de su presencia. Por otro lado, la segunda parte corresponde a los tiempos de viaje del resto de los vehículos que nunca se encontraron con un EV.

#### 4.7. Resultados

En las siguientes figuras, se presenta el tiempo de viaje promedio (en segundos) para distintos tipos de vehículos con distintos niveles de cooperación y demanda. El valor calculado para cada par cooperación-demanda corresponde al promedio sobre todos los EV simulados en cada una de las 20 corridas de cada escenario. Los gráficos tienen el tiempo de viaje promedio como el eje Y junto con el porcentaje de cooperación como el eje X, los puntos y las líneas tienen un color distinto según el nivel de congestión. Adicionalmente, en el contorno de las líneas se agregaron bandas de un ancho igual al tamaño del intervalo de confianza de la estimación del promedio en cada escenario. Para esto, debido a que se desconoce el valor exacto de la desviación estándar, se ocupó el estimador insesgado de la varianza  $s$  (Ecuación 1) junto a la distribución  $t$  de Student, usando un nivel de confianza de 95% y 19 grados de libertad. Con esto, es posible calcular el intervalo de confianza de cada escenario mediante la Ecuación 2, donde  $\bar{x}$  corresponde al promedio de la muestra de tiempos de viaje y  $t^*$  es el valor crítico de la distribución  $t$  para los grados de libertad del problema y el nivel de confianza deseado, en este caso,  $t^*=2$ .

$$s = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i^2 - nx^2) \quad (1)$$

$$IC = \left[ \bar{x} - t^* \frac{s}{\sqrt{n}}, \bar{x} + t^* \frac{s}{\sqrt{n}} \right] \quad (2)$$

En primer lugar, se muestra en la Figura 5 el tiempo de viaje promedio para los tipos de vehículo auto y taxi. Los vehículos tipo POV tales como Auto, Camión, Bus Privado, Van y LGV tuvieron patrones de tiempo de viaje casi idénticos para los distintos escenarios, y, por lo tanto, solo se muestra el gráfico del tipo auto para evitar redundancia. Más aún, en el caso de los vehículos *nunca alerta* el tiempo de viaje no varía significativamente a medida que cambia la proporción de población cooperando con los EV, por lo que los gráficos para vehículos tipo POV consisten básicamente de líneas horizontales que van hacia arriba con mayores niveles de congestión. En cuanto a los vehículos *alerta*, estos tuvieron un aumento leve en el tiempo de viaje para un mismo nivel de congestión, a medida que se aumenta el porcentaje de conductores cooperativos. Los vehículos tipo taxi, en cambio, tuvieron un patrón similar a los buses y mini buses en los pares OD con vías exclusivas. Sin embargo, en otros pares OD presentan el mismo comportamiento que los vehículos tipo POV.

En el caso de los tiempos de viaje promedio para EV en los distintos pares OD (Figuras 6 y 7), se observa que, a medida que el porcentaje de conductores cooperando aumenta, los tiempos de respuesta de los EV tienden a decrecer para cualquier nivel de demanda, sin embargo, esta caída es más pronunciada en el caso de escenarios con mayor congestión. En particular, es importante destacar que la caída más notoria en tiempo de viaje se encontró en el par OD con arcos de 5 pistas mixtas. En el caso especial del par OD con una pista y acera (Figura 7c), también se encuentra una mejora en los tiempos de respuesta a medida que aumenta el porcentaje de cooperación, más notablemente en el escenario congestionado, lo que puede deberse a que el modelo de acera se activa solo en situaciones de alta congestión.

Por último, se observa que en aquellos pares OD con pistas exclusivas no se ve una variación significativa de los tiempos de viaje a medida que aumenta la tasa de cooperación, lo que se debe a que los EVs ocupan las pistas segregadas para viajar y por lo tanto no se enfrentan tanto a vehículos privados que realizan maniobras de cambio de pista. Si bien en general no se encuentra una variación mayor a dos segundos en el tiempo de viaje promedio al aumentar la cooperación dentro de un mismo nivel de congestión, una anomalía encontrada es el caso de la Figura 7a donde los escenarios con un factor de demanda 0,95 presentan una subida entre el nivel de cooperación 75% y 100%. Esto no es lo esperable dado que en los otros gráficos se observa que

a medida que aumenta la cooperación se mantiene o disminuye el tiempo de viaje de los EVs. Al analizar los valores en detalle, esta variación corresponde a un alza de 4 segundos, que son los valores 106 segundos y 110 segundos respectivamente. Adicionalmente, los intervalos de confianza de ambos casos son  $IC_{75}=[101, 111]$  y  $IC_{100}=[106, 114]$ . Recordando que esto implica que hay un 95% de probabilidad que estos intervalos contengan el verdadero valor del promedio del tiempo de viaje y dado que la diferencia entre los tiempos de viaje es pequeña en comparación a los intervalos de confianza, se concluye que este aumento no es significativo y se necesitarían llevar a cabo más corridas del escenario para disminuir el error y ver si esto no se debe a la variación aleatoria de los tiempos de viaje.

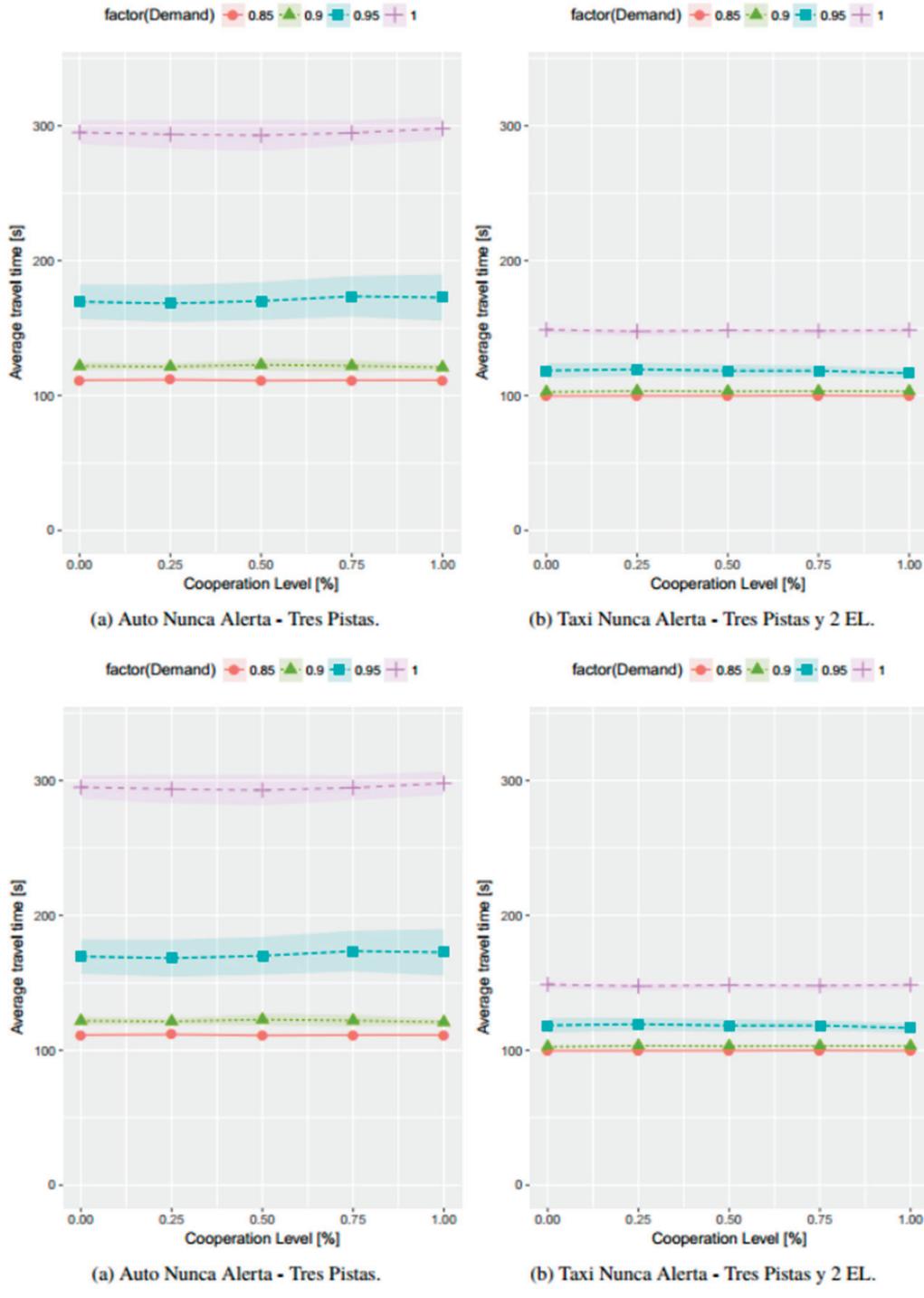


Figura 5. Tiempo de viaje promedio de Auto y Taxi en distintos tipos de arco

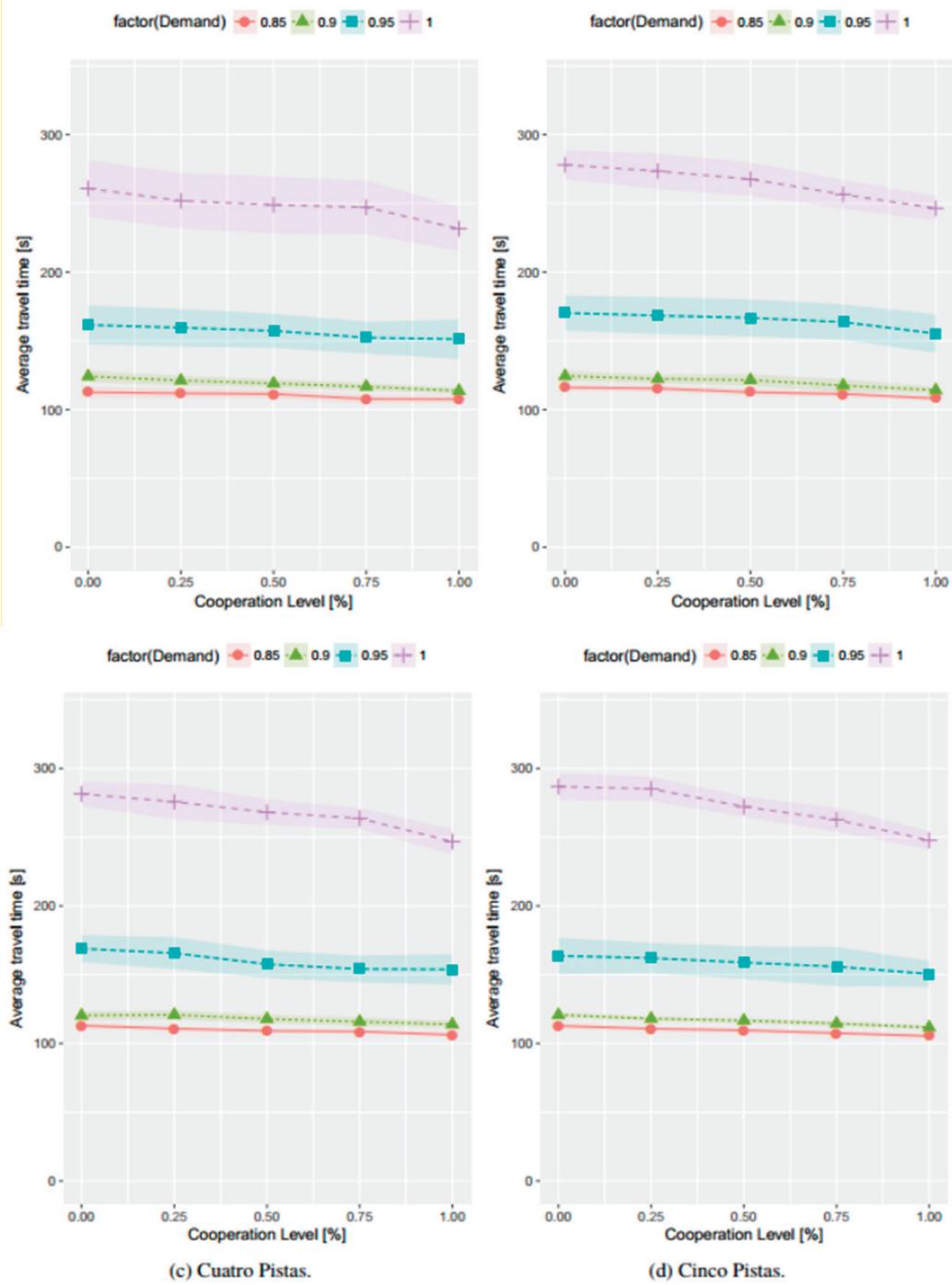


Figura 6. Tiempo de viaje promedio de EV en distintos tipos de arcos

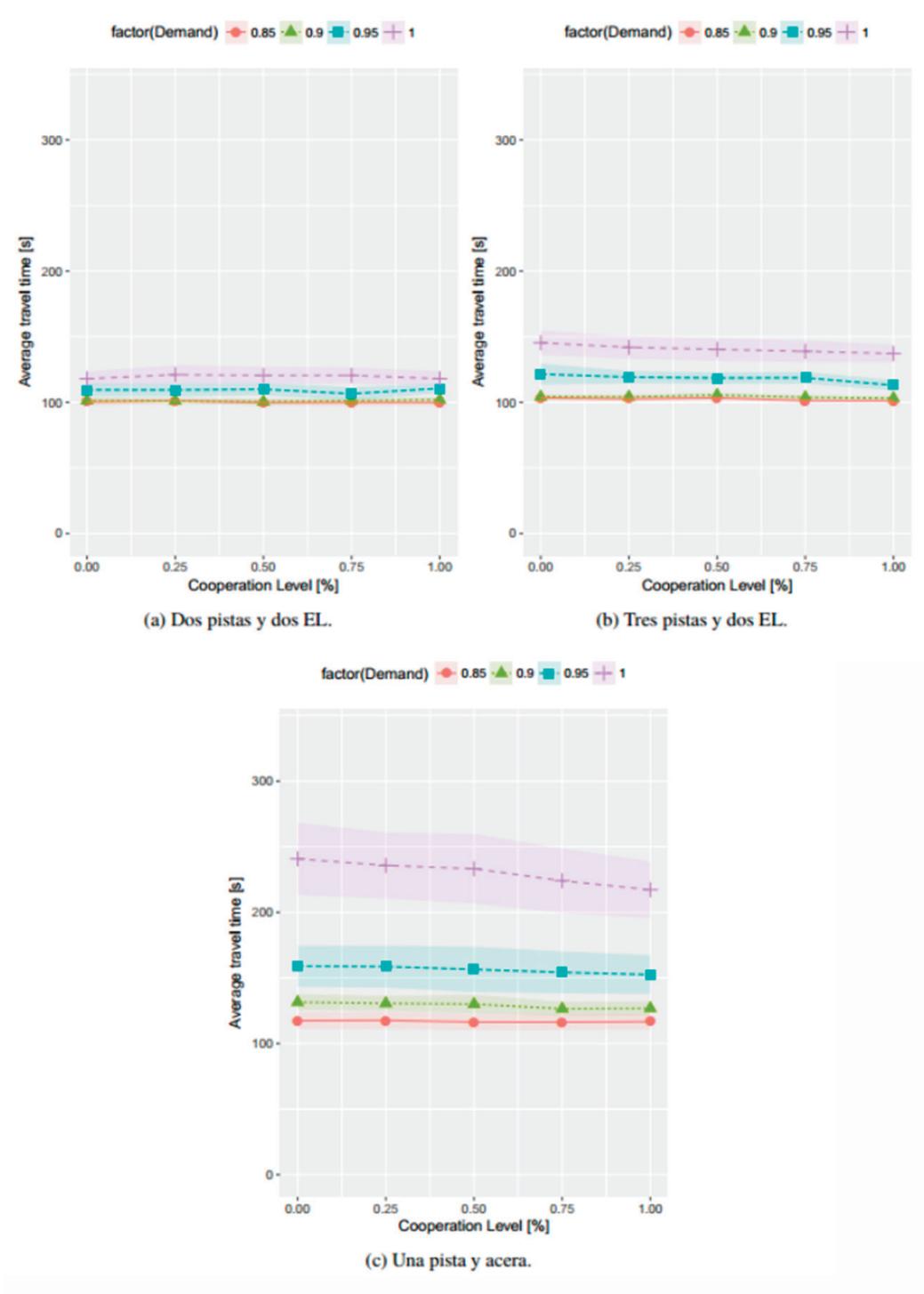


Figura 7. Tiempo de viaje promedio de EV en distintos tipos de arcos

Para el siguiente análisis, se definen dos variables: la variación del tiempo de viaje (TTV) y la variación del tiempo de respuesta (RTV) (ecuaciones 3 y 4). En la primera ecuación representa el promedio de tiempo de viaje de vehículos tipo  $v$  que fueron alertados durante la simulación, en cambio es el promedio de tiempos de viaje de vehículos nunca alertados. En la ecuación 4, la constante es el promedio de los tiempos de viaje de los vehículos tipo  $v$  con un nivel de cooperación 0%. Por otra parte, representa el promedio de los tiempos de viaje del escenario con un nivel de cooperación . Dado que los EV nunca están alerta, no es factible calcular su TTV, pero sí el RTV, esto último busca cuantificar el efecto que causa la variación de población cooperando.

En las figuras 8a y 8b el TTV y RTV se presentan para el Auto y EV respectivamente, para distintos niveles de congestión. En el escenario de mayor congestión sin cooperación, el tiempo de respuesta de un EV promedio fue de 278 segundos, en cambio con un 100% de cooperación fue de 246 segundos, por lo que . En el caso del Auto, el TTV llega a un 10% en el segundo caso más congestionado con un nivel de cooperación de 100%; esto se debe a que los autos nunca alerta presentaron un tiempo de viaje promedio de 170 segundos y los vehículos alertados 187 segundos.

$$TTV(v) = \frac{t_y^a - t_y^{na}}{t_v^{na}} \quad (3)$$

$$RTV(v, \bar{c}) = -\frac{t_y^{\bar{c}} - t_y^{nc}}{t_v^{nc}} \quad (4)$$

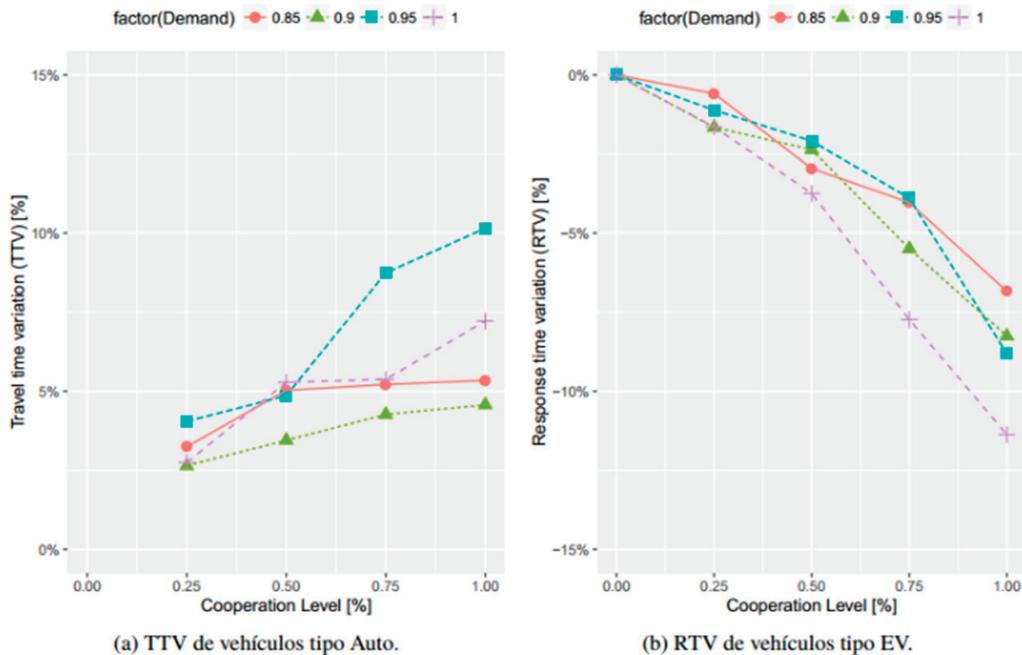


Figura 8. TTV y RTV para par OD con arcos de tres pistas

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En esta investigación, se presenta una metodología basada en Microsimulación de tráfico con el fin de simular vehículos de emergencia y el tráfico que los rodea cuando se están moviendo hacia una emergencia. Para lograr esto, se desarrolló una API cargada en el Microsimulador de Tráfico PARAMICS. Esta API pretende dar órdenes a los vehículos comunes simulados que se encuentran en tráfico bajo la presencia de un vehículo de emergencia cercano, por ejemplo, un carro bomba o una ambulancia. Como resultado general, se obtienen resultados sobre los tiempos de respuesta para distintos niveles de congestión y porcentaje de conductores cooperando en una red de prueba. Esto ahora se puede efectuar de manera automatizada para una red real codificada en PARAMICS mediante el uso de nuestra API desarrollada. Como conclusión sobre los resultados, se esperaba una disminución de los tiempos de respuesta de los servicios de emergencia a medida que más proporción de la población cooperara, lo que se observa en los casos de mayor congestión y es más notorio en aquellos pares OD con más pistas de tráfico mixto. Como limitación, la congestión se predefinió manualmente según los largos de colas vistos en la interfaz gráfica de usuario del software y no bajo una medida cuantificable como podría ser el grado de saturación.

Como trabajo futuro, se pretende ocupar la API con una red real del centro de Santiago, la cual se verá afectada por una serie de cambios estructurales debido a un proyecto de la Municipalidad de Santiago llamado “Plan Centro”. En paralelo, dado que el Cuerpo de Bomberos ha facilitado datos, es posible a futuro calibrar la API y el Simulador de manera de reflejar mejor la realidad en las simulaciones, pudiendo entonces efectuar una evaluación de impactos sobre tiempos de respuesta en la red del centro histórico. El objetivo final es tener los modelos de la API de EV calibrados con datos reales, de manera que puedan ser incorporados a la simulación de otras redes de ciudades Chile.

Por último, entre las aplicaciones reales que podría tener este trabajo, la Microsimulación podrá ser utilizada a futuro como una herramienta para la corrección de algoritmos de ruteo utilizados hoy en día por el Cuerpo de Bomberos. Esto debido a que la poca disponibilidad de datos significa la falta de estimaciones confiables de los tiempos de viaje de carros bomba en ciertos casos particulares, como periodos del día o calles que presentan nulo o bajo tráfico durante los periodos de recolección de datos. Dichas estimaciones podrían hacerse mediante Microsimulación, de manera que se imputen estos datos faltantes que alimentan al software de despacho. Adicionalmente, será posible cuantificar el impacto sobre el ruteo de flota de vehículos de emergencia distintas políticas públicas, por ejemplo, la disminución de la velocidad máxima, la reprogramación de semáforos, etc.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el soporte financiero de los proyectos FONDEF D10E1002, CONICYT/ FONDECYT/Regular 1141313 y de Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (CONICYT - PIA - FB0816). Adicionalmente, los autores quisieran agradecer al Cuerpo de Bomberos de Santiago por su feedback sobre el comportamiento observado de los conductores en Santiago y por facilitar datos valiosos de trayectorias GPS junto a material audiovisual de sus carros bomba.

## REFERENCIAS

- Brackstone, M. y McDonald, M. (1999). Car-following: a historical review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2(4), 181-196.
- Buchenscheit, A., Schaub, F., Kargl, F. y Weber, M. (2009). A vanet-based emergency vehicle warning system. En *Vehicular Networking Conference (VNC)*, 2009 IEEE (pp. 1-8). IEEE.
- Caelli, T. y Porter, D. (1980). On difficulties in localizing ambulance sirens. *Human Factors*, 22(6), 719-724.
- De Lorenzo, R.A. y Eilers, M.A. (1991). Lights and siren: A review of emergency vehicle warning systems. *Annals of emergency medicine*, 20(12), 1331-1335.
- Duncan, G. (1997). Paramics technical report: Car-following, lane-changing and junction modelling. Edinburgh, Scotland: Quadstone, Ltd, 5(1), 5-2.
- Evans, L. y Wasielewski, P. (1983). Risky driving related to driver and vehicle characteristics. *Accident Analysis & Prevention*, 15(2), 121-136.
- Fritzsche, H.-T. y D.-b. Ag (1994). A model for traffic simulation. *Traffic Engineering+ Control*, 35(5), 317-21.
- Haque, M.M. y Washington, S. (2014). A parametric duration model of the reaction times of drivers distracted by mobile phone conversations. *Accident Analysis & Prevention*, 62, 42-53.
- Kotusevski, G. y Hawick, K. (2009). A review of traffic simulation software. *Research Letters in the Information and Mathematical Sciences*, 13, 35-54.
- Panwai, S. y Dia, H. (2005). Comparative evaluation of microscopic car-following behavior. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 6(3), 314-325.

- Quadstone Paramics (2017). Paramics version history. [Online; accessed 10-March-2017]. URL: <http://www.paramics-online.com/>
- Ranney, T.A. (1999). Psychological factors that influence car-following and car-following model development. *Transportation Research part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2(4), 213-219
- Ratrouf, N.T., Rahman, S.M. y Reza, I. (2015). Calibration of PARAMICS model: Application of artificial intelligence-based approach. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 40(12) 3459-3468
- Reza, I., Ratrouf, N.T. y Rahman, S.M. (2016). Calibration protocol for PARAMICS microscopic traffic simulation model: application of neuro-fuzzy approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 43(4), 361-368.
- Saifuzzaman, M. y Zheng, Z. (2014). Incorporating human-factors in car-following models: a review of recent developments and research needs. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 48, 379-403.
- Truong, L.T., Sarvi, M., Currie, G. y Garoni, T.M. (2015). Required traffic micro-simulation runs for reliable multivariate performance estimates. *Journal of Advanced Transportation*, 50(3), 296-314.
- Weinert, F. y Düring, M. (2015). Development and assessment of cooperative v2x applications for emergency vehicles in an urban environment enabled by behavioral models. En: Behrisch, M. y Weber M. (Eds) *Modeling Mobility with Open Data*, Springer.
- Zhi, T.Y., Long, C.R. y Der Horng L. (2005). *Comparison of paramics and getram/aimsun for its simulations*.
- Zhong, R., Fu, K., Sumalee, A. Ngoduy, D. y Lam W. (2016). A cross-entropy method and probabilistic sensitivity analysis framework for calibrating microscopic traffic models. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 63, 147-169

