
GESTIÓN DE TRÁFICO EN TORNO A AUTOPISTAS URBANAS: CASO DE ESTUDIO EN RAMPA DE SALIDA

Germán Günther, Juan Enrique Coeymans, Juan Carlos Muñoz
Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística
Pontificia Universidad Católica de Chile
Casilla 306, código 105, Santiago 22, Chile; Fax (+562) 553 0281
E-mail: ggunther@ing.puc.cl; jec@ing.puc.cl; jcm@ing.puc.cl

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es estudiar de manera detallada las interacciones de tráfico en torno a una rampa de salida de una autopista urbana que genera congestión recurrente hacia la autopista, su impacto sobre el funcionamiento de la autopista y proponer medidas de mitigación para esta cola. Luego de un análisis empírico de la situación se determina una de las causas de su origen en la interacción de vehículos que salen de la autopista por la rampa de salida con el tráfico proveniente de calles adyacentes a la rampa de salida. Se proponen diferentes medidas alternativas a evaluar para mitigar esta congestión, siendo el más efectivo el de evitar la sección de entrecruce entre el flujo que sale de la autopista y el que proviene de la vía adyacente. A través del desvío de estos últimos vehículos hacia una calle paralela a la vía caleterera de la autopista se elimina la cola. Los efectos negativos sobre los vehículos desviados son minimizados con la proposición de un esquema de asignación dinámica de rutas para ellos, en que los vehículos son desviados dependiendo del largo de las colas presentes en la red. El caso de análisis es bastante común en autopistas urbanas y la solución y sus resultados son de interés a esos otros casos.

Palabras clave: Gestión de autopistas, rampas de salida, cuellos de botella

ABSTRACT

The objective of this paper is to study the traffic interactions around a freeway off-ramp, their impact on the operation of urban freeways and propose mitigation measures for queues caused by this kind of bottleneck. After an empirical analysis of a queue of this kind it is determined that the one of the causes of this queue is the interaction of vehicles leaving the freeway at the off-ramp with the local streets traffic. There are proposed different measures that should be evaluated to mitigate the congestion, being the most effective to avoid the weaving section produced between the freeway exiting vehicles and the flow coming from the local streets. Through diverting the latter ones to a street parallel to the highway the queue is eliminated. Negative effects on the diverted vehicles were minimized with a proposed dynamic assignment scheme, controlling the opening and closing of the closed streets by the queue of the diverted vehicles. This case of study is very common in urban highways and the solution and results are of interest to all those other cases.

Keywords: Highway traffic management, off-ramps, bottlenecks

1. INTRODUCCIÓN

En el último tiempo se han construido en Santiago de Chile diversas autopistas urbanas, las cuales han tenido frecuentes problemas de operación debido a las colas que impiden un tráfico expedito. Al igual que en otras partes del mundo, las principales fuentes de cuellos de botella en autopistas ocurren en torno a rampas de entrada y de salida. Si bien ambos tipos de colas son fuente de ineficiencias en la red las colas producidas por rampas de salida tienen el agravante que inmediatamente afectan a vehículos que no son causantes del cuello de botella, es decir, que no desean salir por la rampa en cuestión. Es necesario entonces explorar medidas de gestión, para lo cual se requiere estudiar detalladamente el tráfico en torno a estas salidas y sus interacciones con la red local circundante. Este estudio se concentra en la generación de medidas de mitigación para rampas de salida, las cuales son fuente frecuente de colas que irrumpen hacia la autopista.

En la sección 2 se presenta una revisión del estado del arte del tema de estudio y en la sección 3 se presentan los objetivos del presente trabajo. A continuación, en la sección 4 se presenta un análisis previo al experimento, para luego presentar en la sección 5 el diseño y selección de alternativas de medidas propuestas y en la sección 6 el diseño del experimento realizado. En la sección 7 se presentan los resultados del experimento, su respectivo análisis y una propuesta final de medida de mitigación. Finalmente, en la sección 8 se presentan las conclusiones más relevantes del estudio.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El estudio del tráfico en torno a rampas de salida de autopistas urbanas se ha concentrado principalmente en la evolución y propagación de colas desde rampas de salida una vez dentro de la autopista, mientras que las causas de la formación de este tipo de colas no han sido estudiadas mayormente, por lo cual no existen muchos trabajos en que se implementen medidas de mitigación.

Existen varios estudios teóricos sobre la propagación de colas desde una rampa de salida hacia una autopista (Daganzo, 1999; Daganzo et al., 1999; Newell, 1999; Muñoz y Daganzo, 2002b). En Daganzo et al. (1999) se analizan las causas de la formación de una cola de este tipo, las cuales pueden deberse a: i) una cola generada aguas abajo de la rampa de salida y que se propaga a la autopista; o ii) un aumento de los flujos que desean salir de la autopista, mayor a la capacidad de la rampa de salida. Adicionalmente, en dicho trabajo se hace una comparación con un estudio realizado por Kerner y Rehborn (1997) donde se encuentran las siguientes similitudes en este tipo de colas: i) se observan mayores reducciones de velocidad en las pistas más cercanas a la rampa de salida; ii) las reducciones de velocidad se propagan hacia aguas arriba en la autopista; y iii) se observaron velocidades igualmente bajas para todas las pistas en puntos suficientemente aguas arriba de la salida.

Por otro lado, existen estudios más prácticos donde se realizan análisis gráficos y cuantitativos de la evolución de colas generadas en torno a rampas específicas de salida (Muñoz y Daganzo, 2002b; Cassidy et al., 2002). Sin embargo, en éstos se estudia principalmente la propagación de las colas desde la rampa de salida hacia aguas arriba en la autopista y no se analizan mayormente

las causas de su formación, las cuales ocurren aguas abajo de la rampa de salida, como en el caso de Muñoz y Daganzo (2002b), en que la cola provenía de otra autopista.

La principal herramienta de análisis utilizada en estos estudios es el uso de curvas acumulativas de vehículos en coordenadas oblicuas (Cassidy y Windover, 1995; Muñoz y Daganzo, 2002a). Ésta corresponde a graficar el conteo acumulado de vehículos en el tiempo, haciendo un cambio de coordenadas restando el flujo promedio del período multiplicado por el tiempo. De esta manera se lleva a cero el conteo acumulado en el final del período, con lo que se amplifican gráficamente las deferencias entre curvas entre detectores, con lo cual es más fácil identificar los períodos de congestión.

En Sandoval y Muñoz (2008), la primera investigación realizada en Chile sobre autopistas urbanas con datos de tráfico en congestión, se hizo un estudio de propagación de colas en la Autopista Central de Santiago. En el tramo estudiado se identificaron dos cuellos de botella: uno en torno a una rampa de salida y otro a una rampa de entrada. El primero de ellos, en la rampa de salida, originaba una cola que irrumpía hacia la autopista y se propagaba hacia aguas arriba en la autopista eventualmente juntándose con la cola, originada por el segundo cuello de botella.

En Cassidy (2003) se estudia una sección de autopista con una configuración similar a la de Sandoval y Muñoz (2008), con una rampa de salida congestionada y una rampa de entrada ubicada hacia aguas arriba. Se muestra que en este caso, en que hay una rampa de salida congestionada, aplicar *ramp metering* como el propuesto en Jia et al. (2000) en la rampa de entrada ubicada aguas arriba aumenta la proporción de vehículos destinados a la rampa de salida congestionada, aumentando la congestión. Por lo tanto, se recomienda en estos casos enfocarse primero en la rampa de salida y después aplicar *ramp metering* en la rampa de entrada.

Son pocos los estudios en los cuales se han investigado medidas de mitigación en torno a rampas de salida. En Hagen et al. (2006) se propone una serie de medidas, como mejorar la programación de semáforos o reasignar el uso de pistas en las intersecciones ubicadas inmediatamente aguas abajo de rampas de salida. También se proponen algunas medidas que requieren tecnologías más avanzadas (*TDM*, *ATIS*, *ATMS*¹). En Daganzo et al. (2002) se proponen otras medidas, como asignación a pistas según destino de los viajeros, diferenciando entre los que desean salir de la autopista y los que quieren seguir directo por la autopista, para lo cual se genera una zona donde se prohíbe el cambio de pista, previo a la rampa de salida. Otra medida que se propone es la gestión dinámica de rampas de salida, lo cual consiste en cerrar selectivamente ciertas rampas de salida congestionadas y desviar el tráfico que desea salir de la autopista hacia otras rampas que no se encuentren congestionadas. En estos artículos estas medidas son propuestas pero no son implementadas ni evaluadas.

3. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es estudiar detalladamente las interacciones de tráfico que suceden en torno a una rampa de salida que genera una congestión severa y recurrente, su impacto sobre el funcionamiento de la autopista urbana y junto con ello, proponer y evaluar

¹ *TDM*: Transportation Demand Management, *ATIS*: Advanced Traveler Information Systems, *ATMS*: Advanced Traffic Management Systems.

medidas de gestión para mitigar estos impactos. La red vial en torno a la rampa de salida es bastante común, lo que hace que los resultados y procedimientos puedan ser repetibles en otras autopistas.

Entre los objetivos específicos se encuentran determinar la reducción de capacidad de la autopista generada por la cola en la rampa de salida, analizando esta caída de capacidad a nivel agregado y por pista, identificando cuánto afectan a automovilistas que no desean salir de la autopista y cuánto se reduce la capacidad total.

Adicionalmente, se quiere determinar la influencia de la vialidad ubicada inmediatamente aguas abajo de la rampa de salida en la formación de las colas, analizando las interacciones de tráfico entre los vehículos que salen de la autopista y los vehículos de la vialidad adyacente, así como también la influencia de redes semaforizadas en las cercanías de la rampa.

Finalmente, se estudiarán medidas de mitigación para la congestión que se produce en la autopista y se analizará en cuánto afecta a la red aledaña las medidas de mitigación que se apliquen y la manera de minimizar estos efectos.

4. ANÁLISIS PRELIMINAR

Sandoval y Muñoz (2008) analiza en forma detallada un tramo de 5 kms. del sentido sur norte de la Autopista Central. Ésta corresponde al tramo urbano en la ciudad de Santiago de Chile de la carretera Panamericana y se encuentra concesionada a privados. La Figura 1 presenta un esquema detallado (dividido en tres partes) de los 3 kms. en el extremo aguas abajo de la sección. En dicha sección se indican los puntos donde se obtuvieron datos mediante filmaciones (g), espiras (e) y pórticos (p) y la distancia en metros de estos puntos con respecto al extremo aguas abajo de la sección, designado como km. 0. Este trabajo permitió detectar un primer cuello de botella en torno a una rampa de salida ubicada en el punto g-700 y un segundo en torno a una rampa de entrada ubicada en el punto g-2900.

El cuello de botella que se genera en torno a la rampa de salida comienza con la acumulación de vehículos en el tramo de caleta ubicada entre la rampa y el semáforo de la intersección ubicada inmediatamente aguas abajo. Esta congestión alcanza la rampa de salida y se propaga hacia la autopista, donde se genera una cola que eventualmente bloquea las tres pistas de la autopista.

En aquel trabajo los datos provenientes de filmaciones, de espiras y de pórticos ubicados en diferentes puntos de la sección fueron procesados, y los conteos acumulados de vehículos fueron graficados en coordenadas oblicuas.

En la Figura 3 (a) se presenta el gráfico del número acumulado de vehículos entre los puntos de filmación g-700 y g-1200 en la autopista (el punto g-700 incluye los vehículos de la rampa de salida) reportados por Sandoval y Muñoz (2008). Se observa que después de las 7:15 las curvas correspondientes a los puntos de medición mencionados comienzan a separarse, lo que indica que aumenta el exceso de acumulación de vehículos entre los detectores y que hay cola en el tramo. Esto coincide con el período en que el flujo en la rampa de salida es el máximo observado durante el período, lo que es un claro indicador de que el cuello de botella se genera en torno a la rampa de salida. El flujo en la autopista cae durante el período congestionado, lo que indica que

hay un impacto creciente hacia la autopista. Las curvas vuelven a juntarse cerca de las 8:30, lo que indica que a partir de ese momento circula tráfico en flujo libre por la autopista, lo que coincide con la disminución del flujo en la autopista.

Por otro lado, en la Figura 4 (a) se presentan las velocidades en la autopista por pista y en la rampa de salida, agregadas en períodos de un minuto y graficadas en el tiempo. Se observa que durante el período en que disminuye la velocidad coincide con el período en que aumenta la acumulación de vehículos y el cuello de botella está activo. Las reducciones de velocidad ocurren en primer lugar en la rampa de salida y en la pista adyacente a ella, y luego se propaga hacia las otras dos pistas de la autopista.

Para complementar el análisis de los datos de la autopista reportados por Sandoval y Muñoz (2008), se realizó un estudio en terreno del entorno de la rampa de salida, donde se hicieron mediciones de flujo y se observó el comportamiento de los vehículos en la vialidad adyacente. Los vehículos de la rampa de salida y de la caletera confluyen hacia el tramo de caletería ubicado hacia aguas abajo de la rampa y llegan luego a un semáforo ubicado a 200 metros aguas abajo del final de la rampa.

A partir de estas observaciones se atribuyó que una de las causas del primer cuello de botella podía ser el entrecruzamiento de los vehículos que salen por la rampa con los que provienen de la vía caletería. Esto se produce debido a que en una corta distancia los vehículos provenientes de la rampa de salida en su mayoría desean virar a la derecha en el semáforo ubicado aguas abajo y los vehículos provenientes de la caletería en su mayoría desean seguir directo o virar hacia la izquierda. Ambos flujos compiten por el tramo de caletería aguas abajo de la rampa de salida generando una sección de entrecruce que genera la cola que luego se propaga hacia la rampa y eventualmente bloquea la autopista.

Los autores no comprueban la causa de la congestión, sin embargo presumen que puede deberse a este entrecruce de flujos, a la insuficiencia de capacidad en el semáforo ubicado inmediatamente aguas abajo (al final de la sección de entrecruce), a la corta distancia entre la rampa de salida y dicho semáforo o a alguna combinación de estos tres factores.

En la Figura 2 (a) se presenta el detalle de la vialidad en torno a la rampa de salida. En ella se destaca la sección de la caletería donde se produce la sección de entrecruce. Así, parece oportuno evaluar diferentes medidas que puedan mitigar la congestión generada en torno a esta rampa. En la siguiente sección se explica cómo se diseñaron y evaluaron estas alternativas a través de herramientas de microsimulación, así como la selección de una de ellas para implementar en terreno.

5. DISEÑO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

El diseño de alternativas a simular se agrupó en tres tipos de medidas, las cuales fueron simuladas en el microsimulador de tráfico AIMSUN, debidamente calibrado para Chile utilizando los parámetros calibrados por Velasco (2004), Lacalle (2003) y Espinoza (2004).

El criterio de evaluación de las medidas fue el costo social que afecta la red de modelación. Se utilizaron indicadores de demoras y paradas obtenidos de AIMSUN para calcular el costo social de acuerdo a las metodologías de evaluación social de proyectos aplicadas en Chile, donde se realizó una agregación de los costos para todos los usuarios de la red. En este caso se evaluó el impacto sobre algunos ejes característicos (autopista, rampa de salida y otros ejes secundarios) y el costo social sobre todos los usuarios de la red.

El primero de los grupos de medidas simuladas consistió en evaluar el impacto de aumentar la capacidad de la rampa de salida, a través de mejoras geométricas en la rampa y en el tramo entre ella y la intersección ubicada inmediatamente aguas abajo. En la columna (1) de la Tabla 1 se presenta el costo social de aumentar el largo de la rampa de salida en 50 metros y en la columna (2) el costo social de aumentar a dos pistas la rampa.

Un segundo grupo corresponde a medidas de gestión en la intersección ubicada aguas abajo de la rampa de salida, donde se evaluó aumentar la capacidad que el semáforo ubicado en esa intersección ofrece a la vía caleterera, a través de cambios en la programación del mismo y algunas mejoras geométricas. En la columna (3) de la Tabla 1 se presenta el costo social de aumentar el tiempo de verde para los vehículos provenientes de la caleterera en el semáforo ubicado aguas abajo de la rampa de salida y en la columna (4) se presenta el costo social de realizar mejoras geométricas para favorecer el viraje a la derecha en dicha intersección.

Un último grupo se refiere a medidas para reducir el flujo que alimenta la sección de entrecruce desde la caleterera, para lo cual se evaluó reorientar este flujo por vías alternativas evitando que se active el cuello de botella. Un esquema de esta reorientación de flujos se presenta en la Figura 2 (b). En la columna (5) de la Tabla 1 se presenta el costo social de esta medida.

Aplicando el criterio de minimizar costo social la medida seleccionada para su implementación en terreno fue el desvío por una vía paralela de los vehículos provenientes de la caleterera para evitar la sección de entrecruce en la caleterera. Se obtienen disminuciones del costo social mayores que en las restantes simulaciones y adicionalmente es la medida que genera mayores disminuciones del costo social en los usuarios de la autopista y la rampa de salida.

Es interesante vincular esta propuesta a la Paradoja de Braess (Braess, 1968; Braess et al., 2005), en la cual se postula que cuando los usuarios eligen su ruta minimizando sus propios costos, agregar capacidad extra a la red podría generar una reducción del rendimiento agregado en ella. En este caso estaría ocurriendo exactamente eso, pero de manera inversa, ya que se obtiene una mejora en la red a través de eliminar algunas conexiones.

6. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

El experimento realizado consistió en la implementación en terreno del esquema de desvíos propuesto, tal como se presenta en la Figura 2 (b). Se programó la realización del experimento durante 3 días consecutivos, entre el martes 14 y jueves 16 de Abril de 2009. Se previó inicialmente realizar el experimento entre 6:00 y 10:00 hrs.

Se ubicaron cámaras de video en los puntos g-700, g-1200 y g-2250 de la Figura 1, las dos primeras ubicadas en la azotea de un edificio y la última sobre un paso a desnivel. A partir de los

videos se esperaba realizar gráficos de conteos acumulados de vehículos en coordenadas oblicuas tal como los presentados en Sandoval y Muñoz (2008). Adicionalmente, se contaba con la información de las espiras ubicadas en el tramo, que fue entregada por la concesionaria de la Autopista Central, las cuales permiten obtener información de flujos, ocupación y velocidades.

7. RESULTADOS

7.1 Resultados primer y segundo día de medición

Durante los 2 primeros días en que se implementó el esquema de desvíos se observaron resultados similares. Debido a que se eliminó la interacción de vehículos en la sección de entrecruce entre la rampa de salida y la intersección ubicada inmediatamente aguas abajo, la cola de la autopista desapareció por completo, tal como auguraban las simulaciones.

Dada la similitud de resultados en estos días, a continuación se presentan los resultados para el primer día. En la Figura 3 (b) se presenta el gráfico del número acumulado de vehículos en coordenadas oblicuas entre los puntos de grabación g-700 y g-1200. Al comparar este gráfico con la Figura 3 (a) se observa que en este tramo, mientras se mantuvieron activos los desvíos no se generó cola en la autopista proveniente de la rampa de salida, dado que las curvas se mantienen juntas durante el período en que estuvieron activos los desvíos de tránsito.

Sin embargo, para los vehículos desviados se observaron efectos negativos mayores a lo simulado, para los cuales se formó una cola mayor a la que había sido predicha. Un primer factor que influyó en la mayor cola observada en terreno fue el bloqueo constante que causaban peatones en el punto donde los vehículos desviados retomaban la caletera, dado que en lugar existe una estación de metro. Otro factor que influyó fue la imposibilidad de coordinar adecuadamente los semáforos para dar prioridad a los vehículos desviados sin afectar otros puntos de la red, como la calle que cruza transversalmente la red, lo que podía afectar negativamente a la otra rama de la autopista.

Por otro lado, en la Figura 4 (b) se presentan las velocidades medidas en la espira e-975, donde se observa que durante el período en que estuvieron activos los desvíos de tránsito la velocidad de circulación se mantuvo alta, manteniéndose las velocidades que había previo a la hora en que se activa normalmente el cuello de botella.

Sin embargo, luego de que se reabrieron las calles cerradas por el desvío, a las 8:30, las velocidades bajaron a niveles similares a las que se observaba normalmente cuando estaba activo el cuello de botella, lo que se observa en la Figura 4 (b). Esta situación no prevista fue causada por los vehículos que se encontraban en cola por la calle secundaria. La cola de vehículos alcanzaba la caletera en el punto donde comenzaban los desvíos y se propagó hacia aguas arriba. Esto provocó que al reabrir las calles cerradas estos vehículos ingresaran en pelotón a la sección de entrecruzamiento, lo que bloqueó la rampa de salida y activó el cuello de botella.

7.2 Resultados tercer día de medición

Considerando que durante los dos primeros días de medición hubo efectos negativos mayores a los previstos sobre los vehículos desviados y que al abrir las calles cerradas por el desvío se generaba un bloqueo inmediato de vehículos en la rampa de salida, se decidió realizar un desvío durante un período más corto de tiempo controlado por el largo de la cola que se generaba en la calle por donde se desviaban los vehículos. Es decir, se decidió reabrir la caletería antes de que la cola por la calle secundaria alcanzara el punto de desvío.

Esto permitió que este día el desvío de vehículos se realizara hasta las 7:50 en contraste con las 8:30 aproximadamente que terminó los dos días previos. De esta forma, se disminuyeron los largos de colas de los vehículos desviados y se evitó el ingreso en forma de pelotón de los vehículos en cola provenientes de la caletería.

Al implementar los desvíos de esta manera, la cola de vehículos desviados por la calle secundaria se disipó en 10 minutos, mientras que el ingreso a una tasa constante a la sección de entrecruce en lugar de el ingreso en forma de pelotón hizo que no se bloqueara la rampa de salida de inmediato, sino que se activara un cuello de botella similar al que se produce normalmente en la rampa de salida, pero de corta duración. Tal como se observa en la Figura 3 (c), desde el momento en que se reabrieron las calles cerradas comenzó a aumentar el exceso de acumulación de vehículos entre los puntos g-700 y g-1200, pero sin llegar a los niveles de un día normal. Por otro lado, como se observa en la Figura 4 (c), las velocidades disminuyen lentamente en la espira g-975 y no repentinamente como en los días anteriores y se observa un período corto de velocidades bajas y con una rápida recuperación.

7.3 Indicadores de rendimiento

Si se observa el flujo en la autopista durante los días de medición en comparación con días normales se puede ver el aumento de la capacidad de descarga de la autopista y la rampa de salida. Durante una semana previa a la implementación de desvíos en terreno el flujo promedio entre 7:00 y 9:00 en la autopista fue 3433 veh/hr, mientras que durante los días de medición fue de 4399 veh/hr, lo que representa un aumento de un 28% en la capacidad de descarga. En la rampa de salida, en el mismo período, el flujo promedio fue de 603 veh/hr, mientras que durante la semana de mediciones fue de 1639 veh/hr, lo que representa un aumento de un 172% de la capacidad de descarga.

En la Tabla 1 se presentan los resultados de las simulaciones en AIMSUN de la situación base y distintos escenarios asociados al experimento realizado en terreno, en las columnas (5) a (8), para los cuales se indica el costo social y su disminución. En la columna (5) se presentan los resultados de aplicar el desvío durante el período completo, donde al comparar con la situación base el costo social en la autopista y en la rampa de salida disminuye en un 83% y 62%, respectivamente.

A continuación, se presentan en la Tabla 1 los resultados arrojados por la simulación al replicar lo ocurrido durante la implementación en terreno. En la columna (6) se presentan los resultados representativos de los 2 primeros días de medición, en que los desvíos terminaron a las 8:30. En

la columna (7), se presenta el resultado de la simulación al explicar lo ocurrido el tercer día de medición, en que los desvíos terminaron a las 7:50. En estas simulaciones se incorporó de la mejor manera posible los efectos que causaron que las colas medidas en terreno fueran mayores a las predichas por las simulaciones. Adicionalmente, se incorporan los bloqueos que se producían en la rampa de salida al reabrir las calles cerradas, lo que causa la disminución del costo social con respecto a la simulación de aplicar el desvío durante el período completo. Estos factores causan que a nivel agregado en la red los índices de rendimiento sean peores a los de aplicar el desvío durante el período completo.

7.4 Propuesta de esquema de control dinámico de flujos

En el tercer día de medición la cola de los vehículos desviados por la calle secundaria se disipó rápidamente al abrir las calles cerradas, sin que se generara una cola significativa en la rampa de salida. Esto sugiere que para evitar la cola que se formó en la rampa de salida una vez reabierto la caletera se tendría que haber vuelto a cerrar las calles forzando nuevamente el desvío. De este modo, se formaría nuevamente una cola de vehículos desviados, la cual se podría volver a eliminar abriendo las calles cerradas antes de que se bloquee el punto de comienzan los desvíos.

Así, se podría seguir sucesivamente alternando entre apertura y cierre de calles durante el período punta hasta que el flujo baje, implementando un esquema similar al de un semáforo, o a uno de *ramp metering* en una rampa de entrada en que la estrategia de dosificación de flujo depende de las condiciones observadas en la autopista. En este caso se propone un esquema de control dinámico para gestionar un cuello de botella en una rampa de salida. La existencia de una calle secundaria paralela a la caletera permite que los vehículos que son restringidos por este tipo de esquema puedan seguir circulando, no como en un esquema de *ramp metering*, en el cual los vehículos esperan directamente sobre la rampa de entrada.

Se utilizaron las simulaciones en AIMSUN realizadas previo a la implementación en terreno y fueron calibradas nuevamente para replicar lo sucedido efectivamente en terreno. En base a este nuevo modelo se simuló este esquema de control dinámico. La forma de controlar este esquema se realizó monitoreando la cola que se generaba en la calle por donde se desviaban los vehículos y de esta manera, cuando se formaba cola se abría el desvío y cuando se disipaba, se volvía a cerrar.

En la columna (8) de la Tabla 1 se presentan los resultados de la simulación en AIMSUN para este esquema de control dinámico de flujos. Se observa que disminuyen notablemente las demoras para los vehículos desviados, con lo se observan indicadores de rendimiento a nivel agregado en la red mucho mejores que los observados en todos los casos anteriores. Se observa que en la rampa de salida y en la autopista los indicadores de rendimiento son similares a los obtenidos para las simulaciones de los desvíos aplicados en terreno y levemente inferiores a la simulación del desvío durante el período completo. Sin embargo las demoras en la red secundaria se reducen drásticamente.

8. CONCLUSIONES

Se estudió de manera detallada el comportamiento del tráfico en torno a una rampa de salida de la autopista en estudio, en la que existía una cola que se originaba en un cuello de botella en la red secundaria, aguas abajo de la rampa y se propagaba hacia la autopista.

Se encontró que la interacción y entrecruzamiento entre los vehículos que salían de la autopista y los vehículos que provenían de las calles laterales era uno de los principales factores que influían en la irrupción de la cola hacia la autopista, ya que se producía una sección de entrecruce entre el final de la rampa de salida y la intersección ubicada inmediatamente aguas abajo de ésta. Otros factores que influían en la formación de la cola era la existencia de un semáforo en la intersección ubicada inmediatamente aguas abajo de la rampa de salida y la corta distancia entre este semáforo y la rampa de salida.

Se simularon diferentes esquemas de medidas de mitigación, encontrándose en todos ellos mejoras en las condiciones de operación de la autopista y la rampa de salida. Sin embargo la medida que arrojó los mejores indicadores en forma significativa evitando completamente la formación de la cola que irrumpía hacia la autopista consistió en implementar desvíos de tránsito en la vialidad ubicada en torno a la rampa de salida. Esto permitió eliminar la interacción de vehículos entre los que salían de la autopista y los provenientes de las calles laterales a la autopista, aumentando la capacidad de descarga de la autopista y de la rampa de salida. Con este esquema se obtuvieron disminuciones de un 62% y 83% en el costo social para la rampa de salida y la autopista, respectivamente, y de un 36% a nivel agregado de la red de modelación.

Al implementar en terreno un esquema de desvío de vehículos para eliminar la interacción de vehículos en la sección de entrecruce ubicada aguas abajo de la rampa de salida, se encontró que la cola de la autopista y de la rampa de salida desaparecen por completo, al igual que la interacción y entrecruzamiento de vehículos en la sección de entrecruce. Las capacidades de descarga aumentan de manera importante, especialmente en el caso de la rampa de salida.

Se diseñó una propuesta de control dinámico de flujos en el entorno de la rampa de salida, el cual consiste en aplicar desvíos temporales de vehículos en la caletería hacia una vía paralela mientras la congestión para los vehículos sea baja. Cuando aumenta la cola para los vehículos desviados, la cual actúa como mecanismo de control del esquema, se reabren las calles cerradas hasta que baje la cola generada y en ese momento se vuelve a aplicar el desvío. De esta manera, se minimizan los efectos negativos sobre los vehículos afectados por la medida.

Al simular este esquema para la rampa de salida se encontró que el costo social en los vehículos desviados disminuye notablemente con la aplicación del esquema. En comparación con la realización de un desvío durante el período punta completo, en el esquema de control dinámico de flujos se observan costos sociales significativamente menores. Por otro lado, al aplicar este esquema, se obtienen disminuciones del costo social en la autopista y en la rampa de salida cercanas a las obtenidas por el esquema de desvíos aplicado durante el período completo, con un 52% y 72% de disminución para la rampa de salida y la autopista, respectivamente, y de un 42% a nivel agregado de la red de modelación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Felipe Sandoval por la entrega de los datos de su investigación que sirvieron de base para este estudio. A la concesionaria de la Autopista Central por su colaboración durante la implementación en terreno de los desvíos y por la entrega de datos de espiras y pórticos del tramo de estudio. A Carabineros de Chile, la Seremi Metropolitana de Transporte, la Municipalidad de Santiago y la Unidad Operativa de Control de Tránsito (UOCT), por su apoyo en la autorización de los desvíos y su apoyo en la implementación en terreno de los desvíos. Finalmente, al proyecto Anillos Tecnológicos ACT-32 de CONICYT por el financiamiento recibido.

REFERENCIAS

- Braess D. (1968). Über ein Paradoxon aus der Verkehrsplanung. **Unternehmensforschung** 12, 258-268. [Traducido al inglés en Braess et al. (2005)]
- Braess, D., Nagurney, A. y Wakolbinger, T. (2005). On A Paradox of Traffic Planning. **Transportation Science**, 39(4), 446-450.
- Cassidy, M. J. (2003). Freeway On-Ramp Metering, Delay Savings and the Diverge Bottleneck. **Transportation Research Record**, (1856), 1-5.
- Cassidy, M. J. y Windover, J. R. (1995). Methodology for Assessing Dynamics of Freeway Traffic Flow. **Transportation Research Record**, (1484), 73-79.
- Cassidy, M. J., Anani, S. B. y Haigwood, J. M. (2002), Study of Freeway Traffic near an Off-Ramp. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 36(6), 563-572.
- Daganzo, C. F. (1999), Remarks on Traffic Flow Modeling and its Applications. **Traffic and Mobility Simulation Economics and Environment Conference**, Aachen, Germany, 105-115.
- Daganzo, C. F., Cassidy, M. J. y Bertini, R. L. (1999). Possible Explanations of Phase Transitions in Highway Traffic. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 33(5), 365-379.
- Daganzo, C. F., Laval, J. A. y Muñoz, J. C. (2002). Some Ideas for Freeway Congestion Mitigation with Advanced Technologies. **Traffic Engineering and Control**, 43(10), 397-403.
- Espinoza, C. (2004), **Calibración de parámetros de transporte público en tráfico mixto para modelos micro: GETRAM en Santiago**. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Hagen, L., Pei-Sung, L. y Fabregas, A. (2006). A Toolbox for reducing queues at Freeway Off-Ramps. **Center for Urban Transportation Research, Florida Department of Transportation, University of South Florida**. Report BD544-10.

Jia, Z., Varaiya, P., Chen, C., Petty, K. y Skabardonis, A. (2000). **Congestion, Excess Demand, and Effective Capacity in California Freeways**. PeMS Development Group, University of California at Berkeley.

Kerner, B. S. y Rehborn, H. (1997). Experimental Properties of Phase Transitions in Traffic Flow. **Physical Review Letters**, 79(20), 4030-4033.

Lacalle, M. (2003), **Calibración del microsimulador AIMSUN para flujo ininterrumpido en la ciudad de Santiago**. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Muñoz, J. C. y Daganzo, C. F. (2002a). Fingerprinting Traffic from Static Freeway Sensors. **Cooperative Transportation Dynamics I**, 1-11.

Muñoz, J. C. y Daganzo, C. F. (2002b). The Bottleneck Mechanism of a Freeway Diverge. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, 36(6), 483-505.

Newell, G. F. (1999). Delays Caused by a Queue at a Freeway Exit Ramp. **Transportation Research Part B: Methodological**, 33(5), 337-350.

Sandoval, F. y Muñoz, J. C. (2008). Análisis de formación y propagación de congestión en autopistas urbanas en Santiago de Chile. Caso de estudio: Autopista Central. **XV Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte**, Cartagena de Indias, Colombia, 14-17 de Septiembre de 2008.

Velasco, L. M. (2004), **Calibración de parámetros básicos vehiculares para flujo interrumpido en modelos de simulación microscópica: GETRAM en Santiago**. Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Von Mühlenbrock, H. (2005), **Optimización de Semáforos: SIGCOM 2**. Memoria de título de Ingeniero Civil de Industrias, con Diploma en Ingeniería de Transporte. Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile.

APÉNDICES

Tabla 1: Costos sociales en la red

	Base	(1)		(2)		(3)		(4)	
		Sim.	Dif. %	Sim.	Dif. %	Sim.	Dif. %	Sim.	Dif. %
Rampa Salida	178218	180533	1%	208668	17%	115697	-35%	155115	-13%
Autopista	250667	218279	-13%	112318	-55%	132735	-47%	183622	-27%
Caletera	127257	106204	-17%	107202	-16%	67154	-47%	106648	-16%
Dieciocho	55928	56078	0%	52958	-5%	91586	64%	54184	-3%
Santa Isabel	127487	127874	0%	125901	-1%	130063	2%	131613	3%
10 de Julio	96059	86642	-10%	96598	1%	107623	12%	86214	-10%
Total Red	752645	702602	-7%	622943	-17%	538130	-29%	639908	-15%

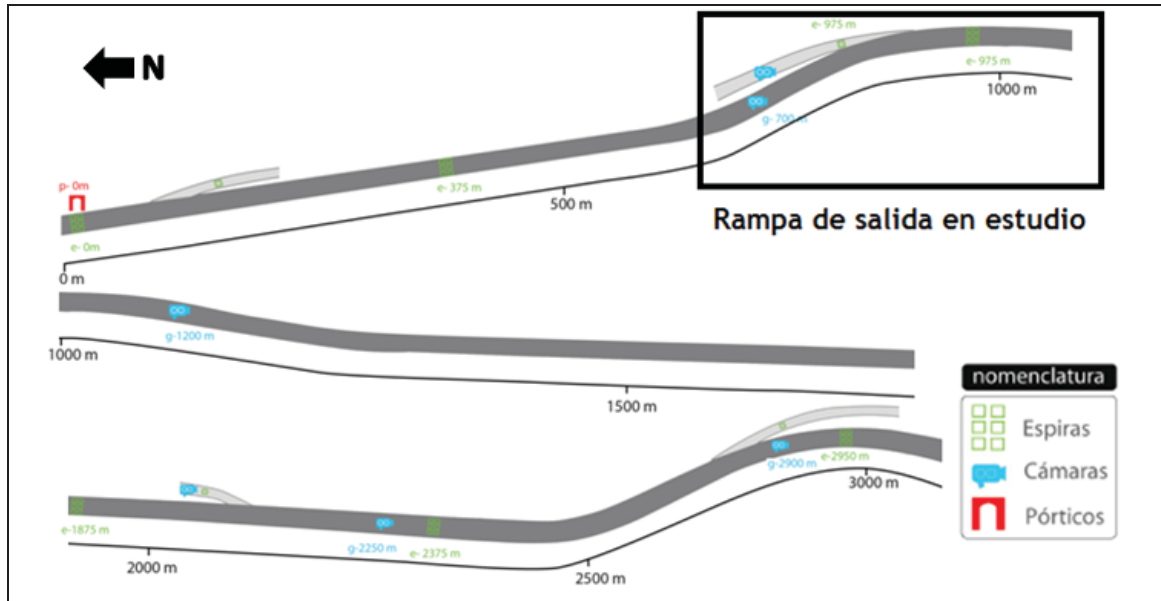
	Base	(5)		(6)		(7)		(8)	
		Sim.	Dif. %	Sim.	Dif. %	Sim.	Dif. %	Sim.	Dif. %
Rampa Salida	178218	68175	-62%	85885	-52%	94785	-47%	86401	-52%
Autopista	250667	42131	-83%	71357	-72%	70076	-72%	69581	-72%
Caletera	127257	228019	86%	142660	12%	148960	17%	65469	-49%
Dieciocho	55928	139352	149%	101488	81%	80398	44%	80398	44%
Santa Isabel	127487	154560	21%	142451	12%	139189	9%	132845	4%
10 de Julio	96059	78484	-18%	105491	10%	111796	16%	85535	-11%
Total Red	752645	478078	-36%	598656	-20%	566754	-25%	439183	-42%

Fuente: Elaboración propia

Nota: Para el cálculo del costo social se utilizó la fórmula implementada en SIGCOM (Von Mühlbrock, 2005):

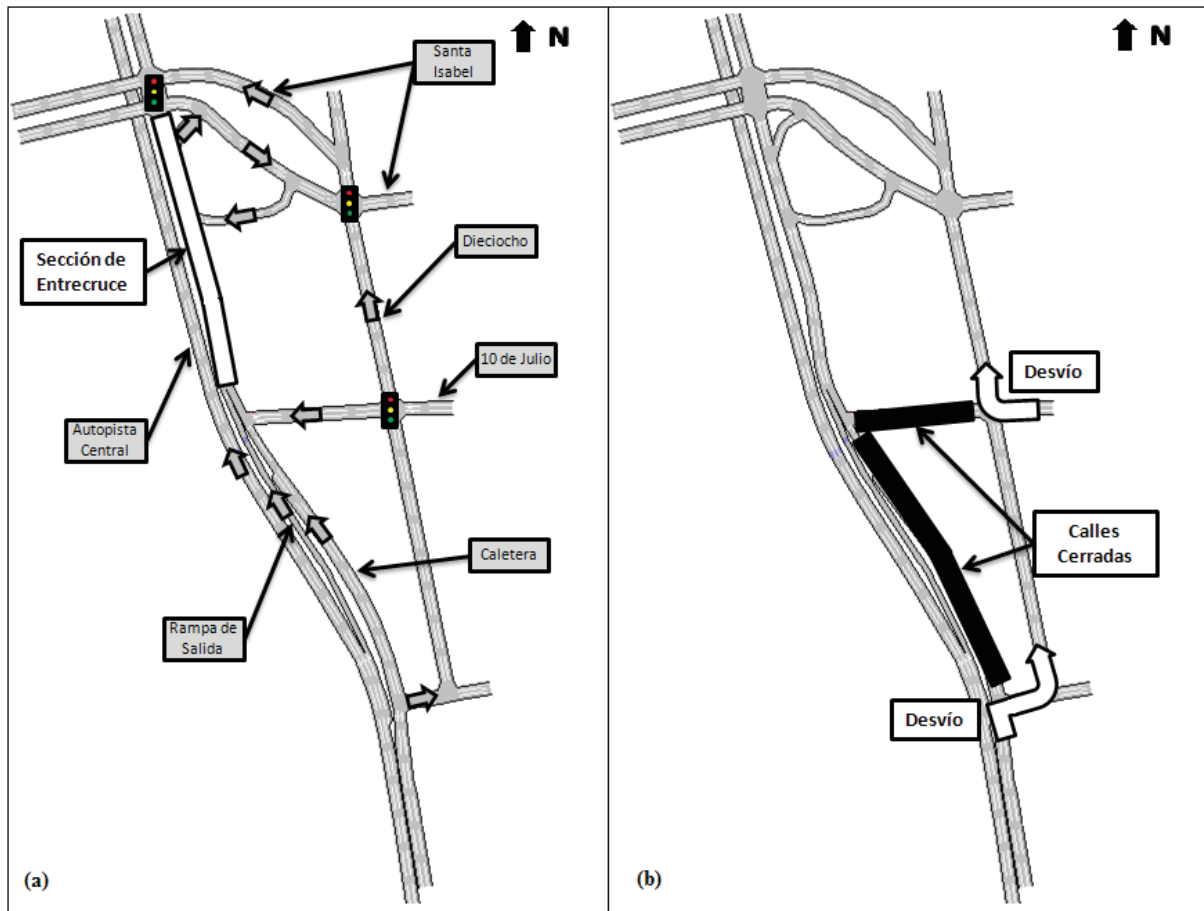
$$CS = cst \cdot \sum_{j=1}^n d_j \cdot q_j + 2 \cdot csc \cdot \left[\sum_{j=1}^n f_2 \cdot d_j \cdot q_j + \sum_{j=1}^n f_{3j}' \cdot h_j \cdot q_j \right]$$

Donde: CS = costo social; cst = valor social del tiempo; csc = valor social del combustible; q_j = flujo; d_j = demoras; h_j = paradas; f_2 = consumo de combustible en ralentí; f_{3j}' = consumo de combustible por paradas.



Fuente: Sandoval y Muñoz (2008)

Figura 1: Tramo de estudio

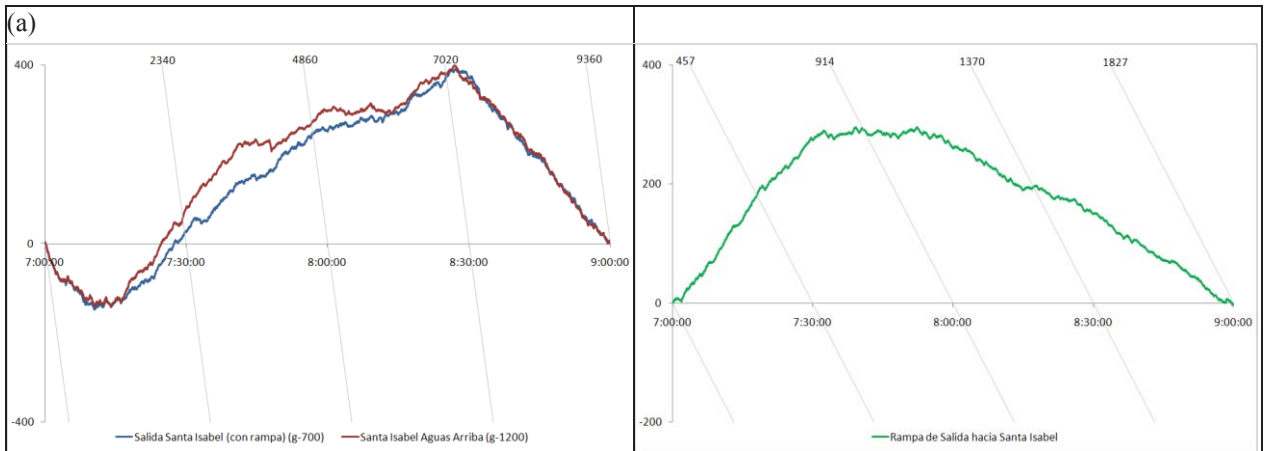


Fuente: Elaboración propia

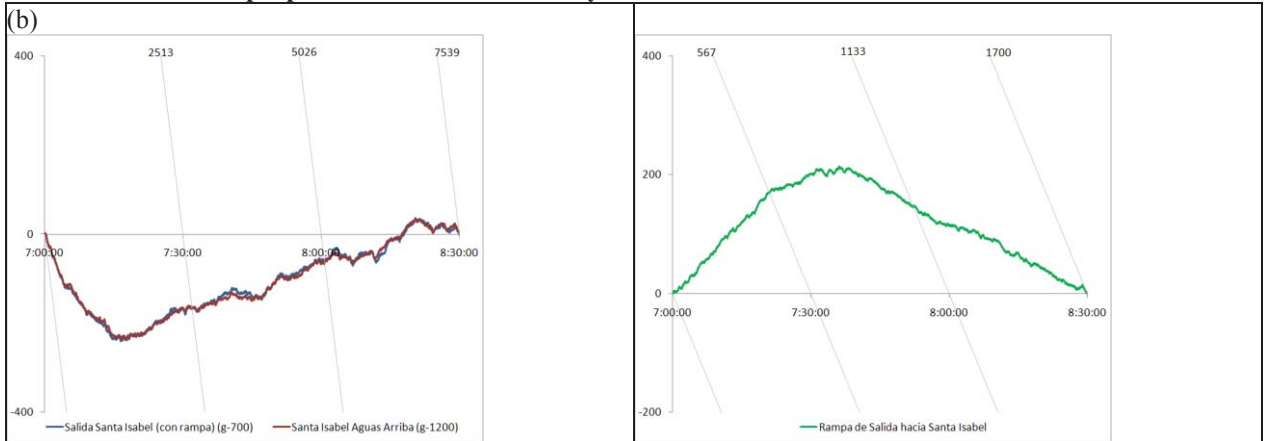
Figura 2: Detalle vialidad en torno a rampa de salida destacando el sentido de tránsito: (a) sección de entrecruce y (b) desvíos propuestos

Autopista

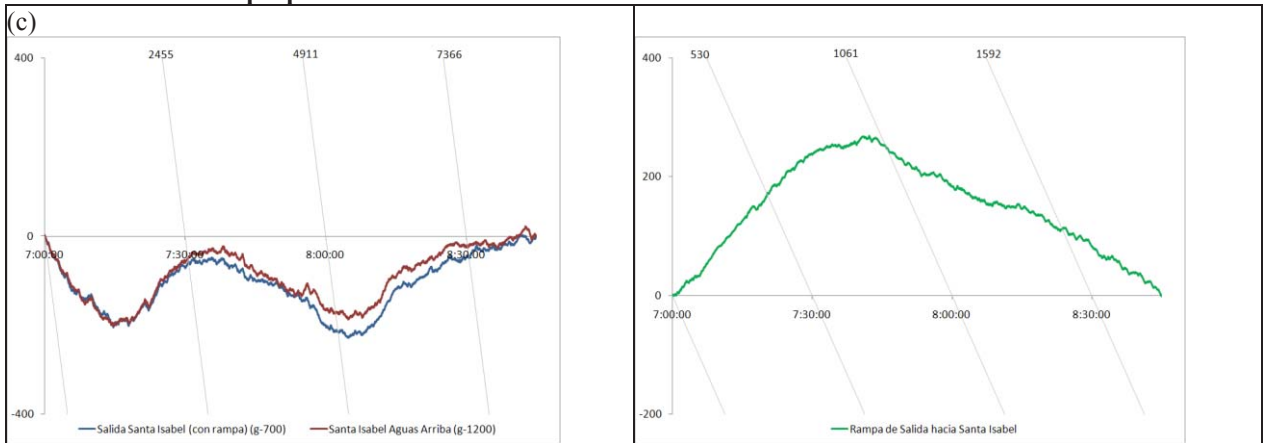
Rampa de Salida



Fuente: Elaboración propia con datos de Sandoval y Muñoz

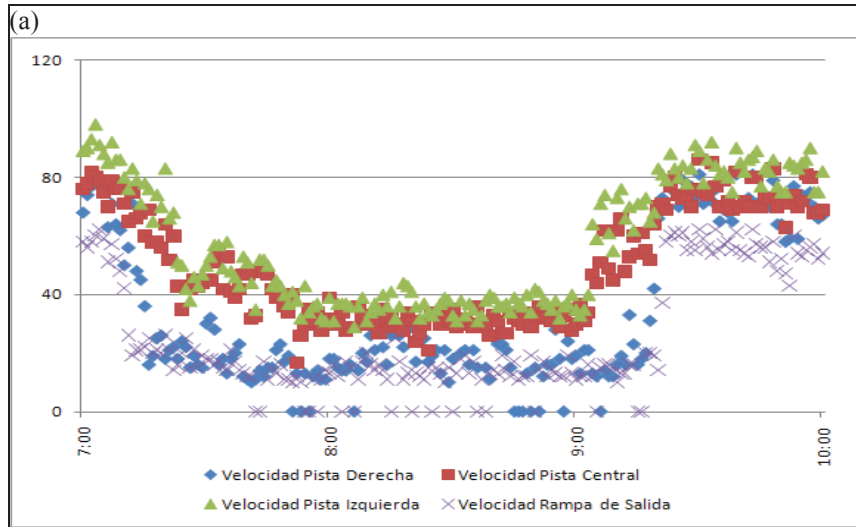


Fuente: Elaboración propia

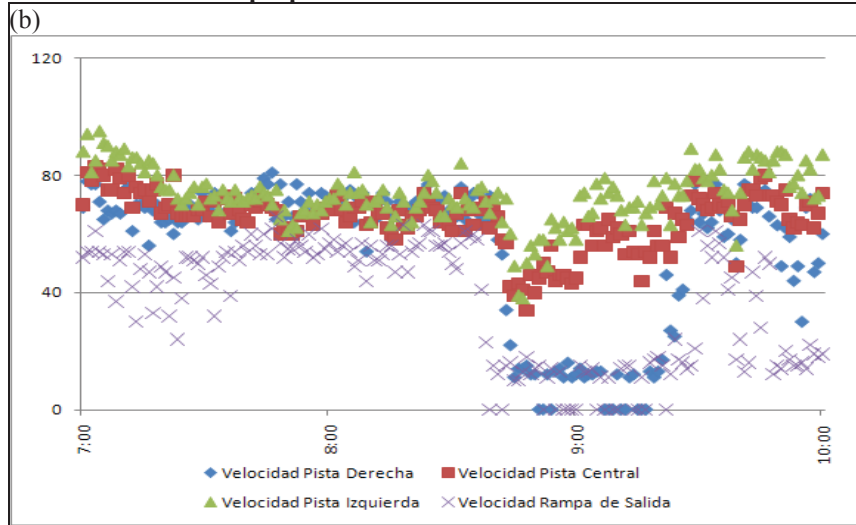


Fuente: Elaboración propia

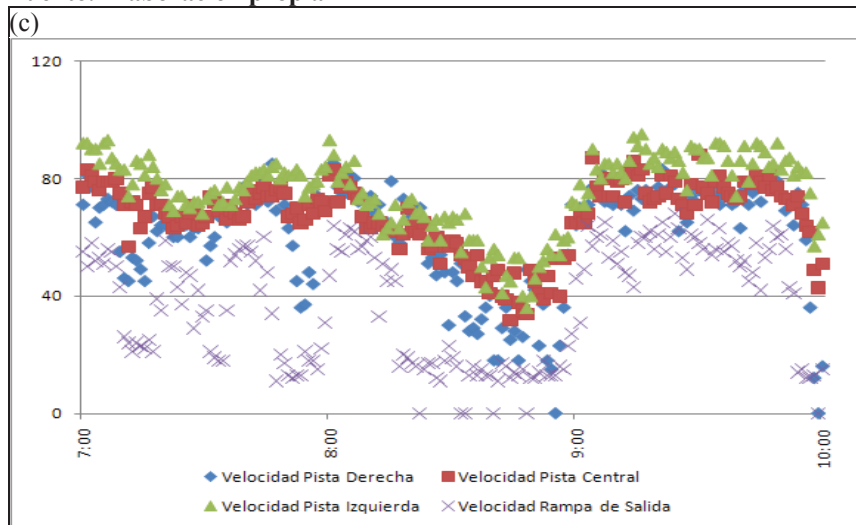
Figura 3: Acumulación de vehículos en coordenadas oblicuas entre puntos g-700 y g-1200



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Figura 4: Velocidades agregadas al minuto en espira e-975