

ESTIMACIÓN DEL IMPACTO DE INCIDENTES EN AUTOPISTAS URBANAS: UN ANÁLISIS EMPÍRICO

Louis de Grange

Escuela de Ingeniería Civil Industrial, Universidad Diego Portales, Santiago de Chile.

FONO: (56-2) 2213 0469; e-mail: louis.degrange@udp.cl

Nicolás Odeh

Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile.

FONO: (56-2) 2213 0468; e-mail: neodeh@uc.cl

Felipe González

Escuela de Ingeniería Civil Industrial, Universidad Diego Portales, Santiago de Chile.

FONO: (56-2) 2213 0468; e-mail: felipe.gonzalezr@udp.cl

Rodrigo Troncoso

Facultad de Gobierno, Universidad del Desarrollo, Santiago de Chile

FONO: (56-2) 2377 4817; e-mail: rtroncoso@udd.cl

RESUMEN

En este trabajo presentamos un análisis empírico que permite cuantificar el impacto que distintos tipos de incidentes tienen sobre la velocidad promedio y sobre el flujo máximo promedio (capacidad) de una autopista urbana. Entre los incidentes incorporamos daños en la infraestructura, volcamiento de vehículos, choques y colisiones entre vehículos, lluvia y niebla, vehículos detenidos, vehículos en panne y presencia de peatones, entre otros. Usando datos de alta frecuencia y variables instrumentales para corregir endogeneidad, formulamos un modelo de regresión lineal múltiple para estimar el efecto de estos incidentes sobre la velocidad promedio en un tramo de la autopista urbana más importante de Chile. Posteriormente, estimamos el impacto sobre el flujo, usando la ecuación fundamental del tráfico (flujo, velocidad, densidad). Finalmente, construimos un ranking de impacto de los distintos tipos de incidentes. Concluimos que, para el caso estudiado, los tres incidentes de mayor impacto sobre la autopista, considerando su frecuencia y gravedad, son: vehículos en panne, colisión de vehículos y la lluvia.

Keywords: incidentes de tráfico, densidad, velocidad, flujo máximo, capacidad de autopistas, accidentes, vehículos en panne, colisión, lluvia, variables instrumentales, endogeneidad.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo presentamos un análisis empírico para determinar el impacto que diferentes incidentes generan sobre la velocidad promedio de una autopista urbana, y también sobre el flujo que circula en dicha autopista (que en determinados casos coincide con la capacidad de la autopista). El caso que estudiamos fue para el tramo de mayor demanda de la Autopista Central, que es la principal autopista urbana de Chile, y atraviesa de norte a sur la capital, Santiago.

A partir de un modelo de regresión lineal múltiple, y usando variables instrumentales para corregir la endogeneidad, estimamos el impacto que tienen los distintos incidentes sobre la velocidad promedio de circulación en la autopista. Sobre la base de esta estimación, encontramos que existe una jerarquía respecto de los impactos que diferentes incidentes son capaces de generar sobre el normal funcionamiento de una autopista urbana (velocidad y capacidad); algunos de estos incidentes están relacionados directamente con la conducción de los vehículos dentro de la autopista (como accidentes y vehículos en pana, por ejemplo) y otros relacionados con factores climáticos exógenos (como la lluvia y la niebla).

Analizando cada incidente de manera aislada, estimamos que el mayor impacto (o mayor reducción de velocidad promedio y capacidad en la autopista) es causada por el incidente “Caída de carga con daño estructural”, que en promedio reducía la velocidad en casi 34 km/h y la capacidad máxima en más de un 70%. En segundo lugar se ubicaba el incidente “Volcamiento de vehículo”, que reduce la velocidad promedio en cerca de 13 km/h y la capacidad máxima en un 26%. Por otra parte, si consideramos además la frecuencia con la que ocurre cada uno de estos incidentes (número de ocurrencias), y multiplicamos el impacto aislado atribuible a cada incidente por el número de casos registrados durante un año, obtenemos que el mayor impacto global anual lo genera el incidente “Vehículo en pana”, seguido por “Colisión” y en tercer lugar el incidente “Lluvia”. Es decir, los dos principales incidentes que impactan negativamente el nivel de servicio de una autopista urbana (vehículos en pana y colisiones) son presumiblemente resultado de fallas humanas, mientras que la “Lluvia” es un factor exógeno para los usuarios y para la administración de la autopista.

En la sección 2 se presenta una revisión de otros estudios en los que se han estudiado los efectos de incidentes dentro de autopistas urbanas y carreteras en general. Estos resultados permiten contrastar las estimaciones que obtuvimos en el caso de la autopista estudiada por nosotros. En la sección 3 se presenta una breve descripción estadística de los datos utilizados. En la sección 4 se reporta la metodología utilizada, dando énfasis en la especificación del modelo econométrico, variables explicativas, variables instrumentales y en las variables de control utilizadas. En la sección 5 se exponen y discuten los principales resultados obtenidos. Finalmente, en la sección 6 se reportan las principales conclusiones.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El análisis de accidentes e incidentes en autopistas urbanas ha sido estudiado en la literatura especializada principalmente desde un enfoque de accidentes y de seguridad vial. Dado que nuestro trabajo busca estudiar el impacto de distintos tipos de incidentes sobre flujo y velocidad en autopistas urbanas, nos centraremos en aquellos trabajos que guardan relación directa al tipo de incidente que consideramos en nuestro análisis.

Sin pérdida de generalidad, los incidentes los podemos asociar a tres tipos de factores: incidentes causados por vehículos (i.e. accidentes), características climáticas, y factores estacionales. En la mayoría de los casos, la obtención de los datos se realiza a partir del uso de sensores automáticos o “loop detectors”. Un trabajo reciente que estudia los incidentes en autopistas y su efecto sobre la congestión es el desarrollado por Tavassoli-Hojati et al (2013a). En este trabajo los autores estiman que cerca de un 25% de las demoras en autopistas urbanas de USA se explican por efecto de incidentes. Esta cifra se puede contrastar con el trabajo previo de publicado por Cambridge Systematics Inc. and Texas Transportation Institute el año 2005, donde también estiman que cerca de un 25% de la congestión se explica por incidentes dentro de las autopistas. Por su parte, Ikrata y Michell (1997) estiman en cerca de un 50% la demora adicional en autopistas causada por incidentes (a lo que denominan “congestión no recurrente”).

Tavassoli-Hojati et al. (2013b) aplicaron modelos paramétricos para predecir la duración de incidentes en autopistas basado en 12 meses seguidos de datos de incidentes, usando registros obtenidos de la red de autopistas de Australia para predecir la duración incidente. Los resultados indican que la duración de cada tipo de incidente, incluyendo accidente o vehículo detenido, eran muy diferentes. En Tavassoli-Hojati et al. (2014) se desarrolla un análisis complementario que revela que los factores que afectan a la duración de un incidente incluyen características como gravedad del incidente, el tipo de lesión causado a los conductores, requerimiento de médicos, etc.; también aparecen como relevantes características de la infraestructura, hora del día, y las características del tráfico.

En el trabajo de Chung (2012), se concluye que el comportamiento del tráfico en autopistas es diferente dependiendo de las condiciones climáticas y de los días de la semana (factores estacionales), razón por la cual estas características deben ser incluidas en los análisis de los incidentes y también su efecto sobre la congestión no recurrente. En esta misma línea, que analiza el efecto de factores climáticos y estacionales sobre la ocurrencia y severidad de los accidentes, se encuentran los trabajos de Massie et al. (1995), Hijar et al. (2000), Valent et al. (2002) y Lam et al. (2003). Saberi and Bertini (2010) estudian la variabilidad del servicio (reliability) en segmentos de autopistas de Portland y Oregon, usando información proveniente también de “loop detectors”. Sin embargo, no pudieron separar el efecto de los incidentes sobre la demora y sobre la variabilidad.

Pisano et al (2008) estudian el efecto sobre los accidentes de tráfico en autopistas que tienen las condiciones climáticas adversas. Concluyen que en presencia de condiciones climáticas adversas, la capacidad de las autopistas se reduce principalmente por dos razones: un mayor número de accidentes, y porque los conductores tienden a conducir a menor velocidad. Estiman que la lluvia y nieve suave reducen entre 5% y 10% la capacidad de las autopistas, y entre 3% y 13% su velocidad promedio. La lluvia intensa reduciría un 14% la capacidad y entre 3% y 16% la velocidad promedio. La nieve intensa reduciría entre 30% y 44% la capacidad y entre 5% y 40% la velocidad promedio. Finalmente, la baja visibilidad por niebla reduciría la velocidad promedio cerca de un 10%.

Laapotti y Keskinen (1998) concluyen que los accidentes son más frecuentes durante los períodos nocturnos. Abdel-Aty y Radwan (2000) concluyen que los accidentes de tráfico en autopistas son más comunes en presencia de volúmenes altos de flujos. Skabardonis et al (1999) estudian el impacto de incidentes incluyendo frecuencia, duración y demora, usando para ello datos longitudinales de autopistas de la ciudad de Los Ángeles. La información la obtienen de detectores automáticos de flujo y velocidad (loop detectors).

En esta misma línea de investigación, Shrake (2006) estima que un accidente genera un bloqueo de pistas entre aproximadamente 45 y 90 minutos. Kwon et al (2006) estudian la demora en autopistas en relación a las condiciones de flujo libre usando también “loop detectors”, para los períodos punta mañana y punta tarde en la ciudad de San Francisco. Mediante un modelo de regresión lineal, en el que usan como variables explicativas distintos tipos de incidentes, eventos especiales, condiciones climáticas, entre otras. Sin embargo, no pudieron aislar el efecto de estas variables sobre la congestión normal y sobre la congestión no recurrente. Tampoco incorporaron el efecto de variables endógenas en la modelación.

En una evaluación que incorpora tanto clima como efectos estacionales sobre los accidentes de carretera en California, Satterthwaite (1976), concluyó que el clima resultó ser un factor importante. En días muy húmedos, frecuencia de choque fue el doble de la tasa en los días secos. Andrey y Yagar (1993) estiman que durante los días de lluvia, la probabilidad de accidentes por choques es un 70% mayor respecto de los días secos. En esta misma línea de investigación, Khattak and Knapp (2000) concluyen que durante los eventos de nieve la capacidad de las autopistas en Iowa se reduce cerca de un 30%. También concluyen que la frecuencia de accidentes los días en que nieva son mayores que los días secos.

Otra línea complementaria de investigación corresponde a la predicción de accidentes (Lyman and Bertini, 2008). Utilizando los datos para Estados Unidos e Israel, Brodsky y Hakkert (1988) analizaron el riesgo de accidente durante el tiempo lluvioso. Estimaron que el riesgo de lesionarse en un accidente en condiciones de lluvia fue de dos a tres veces mayor que en condiciones secas. Los investigadores también concluyen que el riesgo de accidente es mayor cuando la lluvia siguió a un período de tiempo seco. Otros trabajos, como los de Newbery (1988), Jansson (1994) Dickerson et al (2000), Edlin y Karaca-Mandic (2006), se han enfocado en la relación que tienen los accidentes sobre los volúmenes de tráfico. Zhang et al (2013) estudian la violación de las normas de tránsito y su relación con la severidad de los accidentes, corrigiendo por factores humanos, tipo de vehículo, tipo de camino y factores medioambientales.

Este conjunto de antecedentes descritos nos permitió enfocarnos en la formulación de un modelo y sus respectivos factores que permitió inferir estadísticamente la magnitud del impacto que, diferentes tipos de incidentes, tienen sobre la velocidad promedio y flujo en una autopista urbana.

3. DATOS

Los datos para estimar el modelo de este estudio fueron obtenidos a partir de mediciones automáticas que realiza permanentemente la empresa que administra la Autopista Central (loop detectors). La información se registra automáticamente para cada vehículo que circula por la autopista, durante las 24 horas del día, los 365 días del año.

A partir de estos registros, se estima, para distintos puntos de cada tramo de la autopista, la velocidad promedio (kilómetros por hora), el flujo total (vehículos por hora) y la densidad de flujo (vehículos por kilómetro; recordar que la densidad se estima a partir de la razón entre flujo y velocidad).

El registro considera un total de 11 tipos diferentes de incidentes, que se describen a continuación:

- i) Caída de carga con daño estructural: carga cae del vehículo y daña estructuralmente la autopista. Autopista requiere reparación.
- ii) Caída de carga sin daño estructural: carga cae del vehículo y pero no daña estructuralmente la autopista. Autopista requiere retirar la carga caída.
- iii) Volcamiento de vehículo
- iv) Choque: impacto de un vehículo contra un cuerpo estático (por ejemplo, contra un muro de la autopista)
- v) Colisión: impacto entre vehículos en movimiento
- vi) Lluvia
- vii) Niebla
- viii) Objeto en la vía (incluye madera, palos, neumáticos, piezas de vehículos y otro tipo de objetos)
- ix) Peatón dentro de la vía
- x) Vehículo detenido
- xi) Vehículo en pana (incluyendo panas de batería, combustible, temperatura, eléctrica, mecánica, neumático y otros)

La cantidad total de estos 11 tipos de incidentes a lo largo de toda la autopista para el año 2012 fue de 102,010 ocurrencias, lo que corresponde al 96% de la cantidad de todos los tipos de incidentes registrados a lo largo del año. El otro 4% que totaliza el total de incidentes está conformado por 13 tipos de incidentes diversos de menor relevancia. La Tabla 1 resume lo anterior (se normaliza respecto al total de incidentes considerados, omitiendo el 4% no considerado).

Para la estimación consideramos un tramo representativo de la Autopista Central, como autopista urbana. La elección del tramo se realizó considerando dos razones principalmente: primero, el tramo que presenta la mayor cantidad de incidentes. Segundo, que sea un tramo de alta demanda. En los tramos donde rara vez se produce congestión (a las afueras de la ciudad) es esperable que los incidentes tengan menor efecto o que este sea muy heterogéneo.

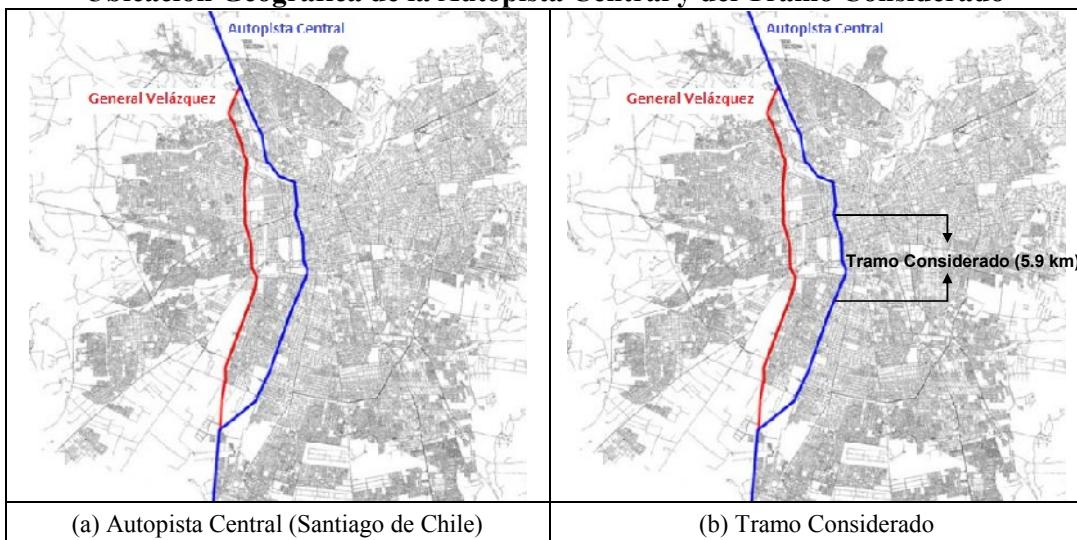
La Autopista Central cruza la ciudad de Santiago (capital de Chile) de norte a sur completamente. En un tramo compite con la Autopista General Velázquez. El tramo considerado para realizar el análisis corresponde al tramo de mayor demanda diaria, tiene una longitud de 5.9 kilómetros y se ubica en la zona central de la autopista (ver Figura 1). En el tramo considerado existen 8 puntos de medición (loop detectors), y para cada uno las mediciones de velocidad, flujo y densidad se reportaron cada media hora. Esto corresponde a una base de datos en panel, con una dimensión N pequeña (corte transversal) y una dimensión T grande (corte longitudinal).

Tabla 1
Número de Incidentes Registrados Según Tipo (Autopista Central, año 2012)

Tipo de Incidente	Cantidad	%
Vehículo en Pana	62,715	61.5%
Lluvia	10,697	10.5%
Niebla	8,530	8.4%
Colisión	7,892	7.7%
Objetos en la vía	4,764	4.7%
Choque	2,996	2.9%
Vehículo detenido	2,686	2.6%
Caída de Carga sin Daño Estructural	899	0.9%
Volcamiento de vehículo	482	0.5%
Peatón dentro de la vía	293	0.3%
Caída de Carga con Daño Estructural	56	0.1%
Total	102,010	100.0%

Vale la pena hacer notar que la distribución de incidentes reportados en la Tabla 2 para los puntos de medición del tramo estudiado es similar a la reportada en la Tabla 1 para la autopista completa. Por último, antes de estimar el modelo, se depuró la base de datos y se eliminaron observaciones inconsistentes producto de errores cometidos por los sistemas de medición (fallas técnicas temporales). Luego de realizar esto, nuestro modelo para el tramo estudiado se alimentó con 128,729 observaciones, equivalentes al 92% de las observaciones originales contenidas en la base de datos. Es decir, se eliminó un 8% de los datos por considerarse defectuosos.

Figura 1
Ubicación Geográfica de la Autopista Central y del Tramo Considerado



Para el tramo considerado en el análisis, los incidentes registrados se reportan en la Tabla 2:

Tabla 2
Número de Incidentes Registrados Según Tipo (en el tramo estudiado, año 2012)

Tipo de Incidente	Cantidad	%
Vehículo en Pana	7,128	68.2%
Lluvia	1,082	10.3%
Niebla	320	3.1%
Colisión	673	6.4%
Objetos en la vía	366	3.5%
Choque	175	1.7%
Vehículo detenido	246	2.4%
Caída de Carga sin Daño Estructural	283	2.7%
Volcamiento de vehículo	98	0.9%
Peatón dentro de la vía	45	0.4%
Caída de Carga con Daño Estructural	40	0.4%
Total	10,456	100.0%

La unidad experimental considerada para el análisis es la “media hora” de operación en cada punto de medición del tramo seleccionado de la autopista. Es decir, para cada punto de medición del tramo estudiado, se registra la información promedio cada media hora respecto de su velocidad, flujo, densidad, y también se indica si en dicho período ocurrió alguno de los 11 incidentes descritos en la Tabla 1. Con ello se obtuvo finalmente la base de datos con las 128,729 observaciones.

4. MÉTODO

La ecuación fundamental del tráfico, para un tramo o arco a de la autopista, relaciona flujo (f_a) con densidad (d_a) y velocidad (v_a) de la siguiente manera (Greenshields, 1935; May, 1990):

$$f_a = v_a \cdot d_a \quad , \quad \forall a \quad (1)$$

Por otra parte, la relación entre velocidad y densidad es decreciente. Es decir, conforme aumenta la densidad de tráfico, la velocidad decrece (Greenshields, 1935; May, 1990). Bajo esta premisa, podemos proponer una relación lineal decreciente entre velocidad y densidad de la siguiente forma:

$$v_a = \beta_{a,0} + \beta_{a,d} \cdot d_a \quad , \quad \forall a \quad (2)$$

donde $\beta_{a,0}$ y $\beta_{a,d}$ son parámetros. El parámetro $\beta_{a,0}$ (debe ser positivo) se interpreta en este caso como la velocidad a flujo libre del tramo a de la autopista, mientras que el parámetro $\beta_{a,d}$ corresponde al efecto marginal sobre la velocidad producto de aumentar la densidad (debe ser negativo). Si queremos estimar el efecto que tiene un determinado incidente sobre la velocidad promedio de un tramo a , podemos basarnos en la ecuación (2) y especificar el siguiente modelo de regresión lineal múltiple (enfoques similares son presentados en Garib et al, 1997; Abdel-Aty y Radwan, 2000; Wirtz et al, 2005; Kau, 2007; Boyles et al., 2007):

$$v_{a,i,t} = \beta_{a,0} + \beta_{a,d} \cdot d_{a,i,t} + \sum_k \delta_k \cdot I_{a,k,i,t} + \varepsilon_{a,i,t} \quad (3)$$

donde δ_k representa el efecto que tiene el incidente de tipo k sobre la velocidad promedio del tramo a de la autopista en el punto de medición i en el período t ; $\varepsilon_{a,i,t}$ es el error del modelo. Las variables $I_{k,i,t}$ son un conjunto de variables dicotómicas que toman el valor uno cuando hay un incidente de tipo k en el punto de medición i en el período t , y cero si no. Cada observación o unidad experimental se representa por un par i, t y corresponde a media hora de flujo en un punto de medición. La velocidad está expresada en kilómetros por hora, y la densidad en vehículos por kilómetro. El flujo (1) es por lo tanto vehículos por hora. Nam y Mannering (2000) proponen un enfoque similar pero usando una regresión logística. También existen trabajos basados en el uso de modelos Poisson y Binomial Negativa (Jovanis y Chang, 1987; Miaou y Lum, 1993; Joshua y Garber, 1990; Kockelman y Ma, 2007). Sin embargo, para efectos de inferencia estadística (no de predicción), que es el objetivo de nuestro trabajo, consideramos que el uso de modelos de regresión lineal es adecuado.

En el modelo (3), la densidad $d_{a,i,t}$ es una variable endógena, ya que el nivel de densidad puede verse afectado por la velocidad de circulación, y viceversa. Para resolver este problema, usamos rezagos de la variable densidad como instrumentos (variables instrumentales). Consideramos rezagos de una hora, de 24 horas y de una semana. Estas variables serían exógenas y estarían correlacionadas con la variable endógena, por lo que serían buenos instrumentos. Para ver aplicaciones de rezagos como instrumentos válidos, consultar Chowdhury (1987) y Oxley and Greasley (1998); en materia de transporte un buen ejemplo de variables instrumentales se presenta en Andrikopoulos y Loisides (1998).

Por último, para definir el modelo econométrico final, agregamos a la relación entre velocidad y densidad (3), nuevas de variables dicotómicas estacionales para controlar por hora del día, día de la semana y mes del año. De esta manera, el modelo econométrico para estimar el impacto de un incidente sobre la velocidad promedio del “loop detector” i del tramo a de la autopista lo podemos presentar de la siguiente forma:

$$v_{a,i,t} = \beta_{a,0} + \beta_{a,d} \cdot \hat{d}_{a,i,t} + \sum_k \delta_{a,k} \cdot I_{a,k,i,t} + \sum_j \theta_{a,j} \cdot C_{a,j} + \varepsilon_{a,i} \quad (4)$$

donde $\hat{d}_{a,i}$ es la densidad instrumentalizada que se obtiene de la siguiente regresión auxiliar:

$$d_{a,i} = \gamma_{a,0} + \phi_{a,1h} \cdot d_{a-1h,i} + \phi_{a,1d} \cdot d_{a-1d,i} + \phi_{a,1w} \cdot d_{a-1w,i} + \sum_k \delta_{a,k} \cdot I_{a,k,i} + \sum_j \theta_{a,j} \cdot C_{a,j,i} + e_{a,i} \quad (5)$$

Al estimar los parámetros del modelo (5) podemos obtener un estimador de $\hat{d}_{a,i}$ que posteriormente introducimos dentro de (4). Por lo tanto, el método de estimación corresponde al clásico método de Mínimos Cuadrados en Dos Etapas (2SLS). Adicionalmente, como ejercicio de robustez también estimamos los modelos de efectos fijos y efectos aleatorios con variables instrumentales, que se hacen cargo de la estructura de datos en panel que tiene la muestra (una buena referencia para modelos con datos de panel corresponde a Baltagi, 2013).

Los parámetros $\{\delta_{a,k}\}$ de la ecuación (4) se interpretan directamente como la reducción promedio en la velocidad que produce el incidente tipo k en el tramo a de la autopista.

Adicionalmente, usando la ecuación fundamental del tráfico definida en (1), podemos indirectamente obtener el efecto que el incidente de tipo k produce sobre el flujo promedio del tramo a de la autopista. Para ello basta con evaluar la expresión (1) con la estimación de la velocidad \hat{v}_a que se obtiene del modelo (4) y su respectiva densidad \hat{d}_a en presencia del incidente de tipo k ($I_{a,k} = 1$), y compararla con el caso en que no se detecta dicho incidente ($I_{a,k} = 0$). Si este cálculo lo realizamos para la densidad asociada al flujo máximo del tramo, sería equivalente a estimar el efecto que el incidente de tipo k tiene sobre la capacidad del tramo a de la autopista.

5. RESULTADOS

La Tabla 3 muestra las estimaciones del modelo econométrico de la ecuación (4) mediante tres técnicas de regresión: Mínimos Cuadrados en Dos Etapas (2SLS), Efectos Fijos (FE) y Efectos Aleatorios (RE) con variables instrumentales para datos en panel. Para una presentación más sencilla de los resultados, no mostramos las estimaciones de los parámetros asociados a las variables de control estacional ni al intercepto.

De la Tabla 3 se desprenden los siguientes resultados:

- a) Los parámetros de todas las variables explicativas que representan incidentes tienen el signo correcto (negativo), y una adecuada significancia estadística (todos significativos al 95% de confianza y casi todos al 99%).
- b) Los parámetros asociados a los incidentes los ordenamos de mayor a menor (en valor absoluto). Se observa que el incidente que genera un mayor impacto sobre la velocidad promedio de la autopista es “Caída de Carga con Daño Estructural”, cuyo parámetro tiene un valor estimado de -34.18. Este resultado se interpreta como una reducción promedio de la velocidad, *ceteris paribus*.
- c) El segundo tipo de incidente que más reduce la velocidad promedio de la autopista es el “Volcamiento de Vehículo” (-12.47).
- d) La “Colisión” (impacto entre vehículos en movimiento), cuyo parámetro es cercano a -8, resultó ser significativamente mayor en módulo que el “Choque” (impacto de un vehículo contra un objeto, por ejemplo, un muro de la autopista).
- e) Variables climáticas como la “Lluvia” y la “Niebla” inciden en menor medida, pero significativamente, sobre la velocidad promedio de la autopista. Lo mismo el “Vehículo en Panne”.

Por otra parte, a partir de los parámetros descritos en la Tabla 3, y de la ecuación (1), podemos obtener el impacto de cada incidente sobre el nivel de flujo de la autopista. Dado que el resultado dependerá del nivel de densidad, consideraremos aquel nivel de densidad que se relacione con la capacidad máxima promedio del tramo estudiado.

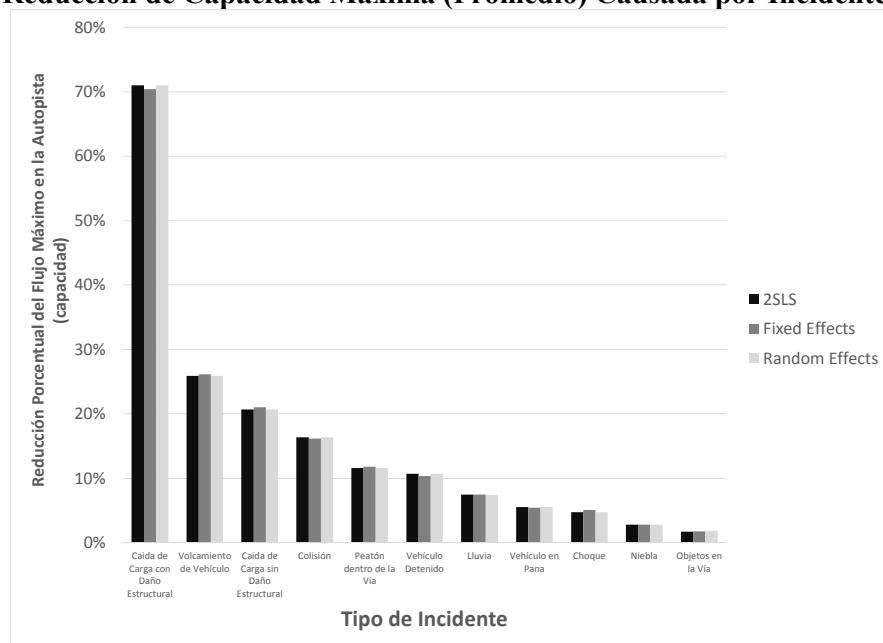
Tabla 3
Parámetros Estimados para la Ecuación (4)

Variable dependiente: Velocidad (Km/h)	2SLS	FE	RE
Densidad	-0.939*** (0.003)	-0.97*** (0.003)	-0.939*** (0.004)
Caída de Carga con Daño Estructural	-34.18*** (1.031)	-33.882*** (0.992)	-34.172*** (1.251)
Volcamiento de Vehículo	-12.474*** (0.658)	-12.603*** (0.633)	-12.472*** (0.799)
Caída de Carga sin Daño Estructural	-9.946*** (0.391)	-10.124*** (0.377)	-9.944*** (0.475)
Colisión	-7.858*** (0.264)	-7.781*** (0.254)	-7.855*** (0.32)
Peatón dentro de la Vía	-5.545*** (0.97)	-5.655*** (0.934)	-5.548*** (1.178)
Vehículo Detenido	-5.107*** (0.419)	-4.963*** (0.403)	-5.103*** (0.508)
Lluvia	-3.543*** (0.201)	-3.565*** (0.194)	-3.541*** (0.244)
Vehículo en Panne	-2.621*** (0.082)	-2.569*** (0.079)	-2.618*** (0.099)
Choque	-2.241*** (0.492)	-2.39*** (0.473)	-2.239*** (0.597)
Niebla	-1.321*** (0.367)	-1.317*** (0.353)	-1.318*** (0.446)
Objetos en la Vía	-0.787** (0.342)	-0.809** (0.329)	-0.883** (0.415)
R2	0.717	0.7179	0.5831
No. Observaciones	128,729	128,729	128,729

Standar errors in parenthesis. ** indicates significance at the 5% level and *** at the 1% level.

Introduciendo los parámetros de la ecuación (4) dentro de la ecuación (1), para luego derivar respecto a la densidad e igualar a cero, obtenemos que la densidad que genera el máximo flujo en este tramo de la autopista es de 98 vehículos por kilómetro ($d^* = 98 \text{ veh/k}$). Notar que para esta densidad la capacidad máxima promedio de la autopista es de 4,718 veh/h. Luego, considerando este valor como referencia, podemos estimar directamente el impacto de cada incidente sobre la capacidad máxima promedio de la autopista (flujo máximo promedio), que se reporta en la Figura 2:

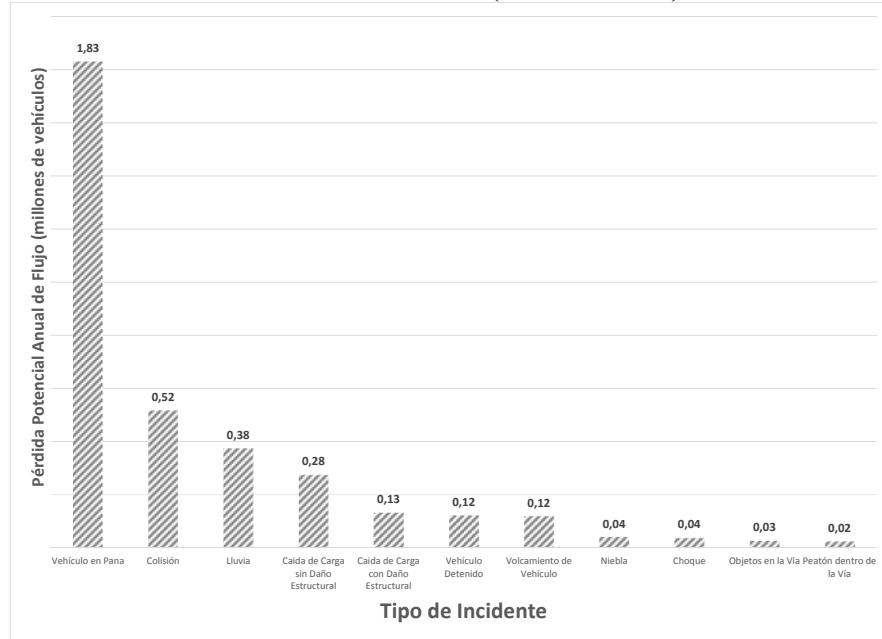
Figura 2
Reducción de Capacidad Máxima (Promedio) Causada por Incidentes



De la Figura 2 se aprecia que el incidente “Caída de Carga con Daño Estructural” reduce en promedio la capacidad máxima de la autopista poco más de un 70%. Luego viene “Volcamiento de Vehículo” con poco más de 26%. Sin embargo, y tal como se observa en la Tabla 2, la cantidad de veces que ocurre el incidente “Caída de Carga con Daño Estructural” es bastante baja (0.4% de los casos). Al mismo tiempo, el incidente “Vehículo en Pana” representa el 68.2% del total de los incidentes. Es decir, tenemos un incidente de alto impacto pero de baja ocurrencia, y otro de bajo impacto pero de muy alta ocurrencia.

Luego, es necesario considerar ambas dimensiones (impacto del incidente y número de veces que ocurre el incidente). Como indicador de impacto acumulado anual usamos la multiplicación entre el valor que representa la reducción del flujo promedio máximo y su respectivo número de ocurrencias (reportado en Tabla 2). Al multiplicar ambos valores obtenemos el ranking expuesto en la Figura 3. El eje vertical de la Figura 3 representa la pérdida máxima potencial anual de flujo de la autopista para cada tipo de incidente. El incidente que más pérdida ocasiona es “Vehículo en Pana”, en segundo lugar aparece “Colisión” y en tercer lugar, sorpresivamente, aparece “Lluvia”. Estos resultados muestran que la presencia de “Vehículos en Pana” dentro de la autopista es el incidente de mayor impacto. Y no sólo implica una pérdida de flujo para la empresa que opera la autopista, sino también representa una reducción potencial en el uso de la infraestructura por parte de los viajeros del sistema de transporte.

Figura 3
Pérdida Potencial de Flujo Anual (Impacto Acumulado) Causada por Incidentes en el Tramo Seleccionado (Modelo 2SLS)



6. CONCLUSIONES

En este trabajo presentamos un análisis empírico para determinar el impacto que diferentes incidentes generan sobre la velocidad y capacidad de una autopista urbana. El caso estudiado correspondió a la Autopista Central, ubicada en Santiago, capital de Chile. El tramo considerado correspondió al de mayor demanda y que a su vez registraba el mayor número de incidentes.

Consideramos once tipos distintos de incidentes. i) Caída de carga con daño estructural, ii) Caída de carga sin daño estructural, iii) Volcamiento de vehículo, iv) Choque, v) Colisión, vi) Lluvia, vii) Niebla, viii) Objeto en la vía, ix) Peatón dentro de la vía, x) Vehículo detenido y, por último, xi) Vehículo en pana. Estos once tipos de incidentes representan el 96% de todos los incidentes registrados en la autopista estudiada. El Vehículo en pana representaba más del 60% de los incidentes, seguido por la colisión con un 8.4% de los casos. La Caída de carga con daño estructural representaba apenas un 0.1% de los incidentes.

La metodología consistió en formular un modelo de regresión lineal múltiple entre velocidad y los diferentes tipos de incidentes, controlando por densidad y por factores estacionales. Dado que la densidad es una variable endógena, usamos rezagos de ella como variables instrumentales. El método de estimación fue el de mínimos cuadrados en dos etapas.

Analizando cada evento de manera aislada, estimamos que el mayor impacto (reducción de velocidad promedio y flujo máximo promedio) correspondía al incidente “Caída de carga con daño estructural”, que en promedio reducía la velocidad en 34 km/h y la capacidad máxima en más de un 70%. En segundo lugar se ubicaba el incidente “Volcamiento de vehículo”, que reduce la velocidad promedio en cerca de 13 km/h y la capacidad máxima en un 26%.

Sin embargo, si consideramos la frecuencia con la que ocurre cada uno de estos incidentes (número de casos), y multiplicamos el impacto aislado por el número de casos anuales registrados, obtenemos que el mayor impacto global anual lo genera el incidente “Vehículo en pana”, seguido por “Colisión” y en tercer lugar el incidente “Lluvia”. Es decir, los dos principales incidentes que impactan negativamente el nivel de servicio de una autopista urbana (vehículos en pana y colisiones) son presumiblemente resultado de fallas humanas.

Estos resultados nos parecen muy interesantes, ya que dan una señal respecto a la importancia relativa de los distintos incidentes. Los vehículos en pana causan un enorme daño en el correcto funcionamiento de la autopista estudiada, generando una reducción potencial del flujo superior a los 1.8 millones anuales en vehículos que podrían circular por la autopista pero que, debido a los vehículos en pana, no pueden hacerlo o se ven obligados a cambiar o atrasar su viaje. Las colisiones tienen un impacto equivalente de 0.53 millones de vehículos al año, y la lluvia (variable exógena al sistema de transporte) afecta el equivalente a 0.39 millones para el tramo estudiado.

Concluimos que existe una clara jerarquía respecto de los impactos que diferentes incidentes son capaces de generar sobre el normal funcionamiento de una autopista urbana, algunos relacionados directamente con la conducción de los vehículos en su interior y otros relacionados con factores climáticos como la lluvia y la niebla.

ACKNOWLEDGMENTS

Agradecemos financiamiento del Centro de Desarrollo Urbano Sustentable (CEDEUS), Conicyt/Fondap/15110020.

REFERENCIAS

- Abdel-Aty, M.A., Radwan, A.E., (2000). Modeling traffic accident occurrence and involvement. *Accident Analysis and Prevention*, 32, 633–642.
- Andrikopoulos, A.A. and Loisides, J. (1998). Cost Structure and Productivity Growth in European Railways Systems. *Applied Economics*, 30, 1625-1639.
- Andrey, J. and Yagar, S. (1993). A Temporal Analysis of Rain-Related Crash Risk, University of Waterloo, Ontario, Canada; *Accident Analysis and Prevention*, 25, 4, 465-472.
- Baltagi, B.H. (2013). *Econometric Analysis of Panel Data* (5th ed), John Wiley & Sons.
- Boyles, S., Fajardo, D. and Waller, S. T. (2007). A naïve Bayesian classifier for incident duration prediction. *TRB 86th Annual Meeting Compendium of Papers*. Washington, DC, Transportation Research Board.
- Brodsky, H. and Hakkert, A. S. (1988). Risk of a Road Accident in Rainy Weather; University of Maryland at College Park, U.S.A. & Technion, Road Safety Center, Haifa, Israel. *Accident Analysis and Prevention*, 20, 3, 161-176.
- Cambridge Systematics Inc. & Texas Transportation Institute (2005) *Traffic congestion and reliability: trends and advanced strategies for congestion mitigation* Washington, DC, Federal Highway Administration.

- Chowdhury, B. (1987). Are causal relationships sensitive to causality tests. *Applied Economics*, 19, 459-465.
- Chung, Y. (2012) Assessment of non-recurrent congestion caused by precipitation using archived weather and traffic flow data. *Transport Policy*, 19(1), 167-173.
- Dickerson, A., Peirson, J. and Vickerman, R. (2000). Road Accidents and Traffic Flows: An Econometric Investigation. *Economica*, 67, 101-121.
- Edlin, A. S. and Karaca-Mandic, P. (2006). The Accident Externality from Driving. *Journal of Political Economy* 114, 931-955.
- Garib, A. E. Radwan and H. Al-Deek. (1997) Estimating Magnitude and Duration of incident Delays. *Journal of Transportation Engineering*, 123, 6, 459-466.
- Greenshields, B. D. (1935). A Study of Traffic Capacity. *Highway Research Board Proceedings*, 14, 448-477.
- Hijar, M., Carrillo, C., Flores, M., Anaya, R., Lopez, V. (2000). Risk factors in highway traffic accidents: a case control study. *Accident Analysis and Prevention*, 32, 703-709.
- Ikhrata, H. and Michell, P. (1997) Technical Report of Southern California Association of Governments' Transportation Performance Indicators. *Transportation Research Record*, 1606, 103-114.
- Jansson, J. O. (1994). Accident externality charges, *Journal of Transport Economics and Policy*, 38, 31-43.
- Joshua, S.C., and Garber, N. J. (1990). Estimating Truck Accident Rate and Involvements using Linear and Poisson Regression models, *Transportation Planning and Technology*, 15, 41-58.
- Jovanis, P.P., and Chang, H. L. (1987). Modeling the Relationship of Accidents to Miles Traveled. *Transportation Research Record*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C. 1068, 42-51.
- Kau, V. H. L. (2007). Estimating Freeway Incident Clearance Duration Using Multiple Linear Regression, The University of Texas at Arlington, Arlington, Tex, USA, 2007
- Khattak, A. and Knapp, K. (2000). Interstate Highway Crash Injuries during Winter Snow and Non-Snow Events, presented at the 2001 Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting.
- Kockelman, K.M. and Ma, J. (2007). Freeway speeds and speed variations preceding crashes, within and across lanes. *Journal of Transportation Research Forum*, 46, 43-62.
- Kwon, J., Mauch, M. & Varaiya, P. (2006) Components of Congestion: Delay from Incidents, Special Events, Lane Closures, Weather, Potential Ramp Metering Gain, and Excess Demand. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1959(-1), 84-91.
- Laapotti, S., Keskinen, E. (1998). Differences in fatal loss-of-control accidents between young male and female drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 30, 435-442.
- Lam, L.T., Norton, R., Woodward, M., Connor, J., Ameratunga, S. (2003). Passenger carriage and car crash injury: a comparison between younger and older drivers. *Accident Analysis and Prevention* 35, 861-867.
- Lyman, K. and Bertini, R. L. (2008) Using Travel Time Reliability Measures to Improve Regional Transportation Planning and Operations. *TRB 87th Annual Meeting Compendium of Papers*. Washington, DC, Transportation Research Board.

- Massie, D.L., Campbell, K.L., Williams, A.F. (1995). Traffic accident involvement rates by driver age and gender. *Accident Analysis and Prevention*, 27, 73–87.
- May, A. D. (1990). *Traffic Flow Fundamentals*. Prentice-Hall.
- Miaou, S.P. and Lum, H. (1993). Modeling Vehicle Accidents and Geometric Design Relationships, *Accident Analysis and Prevention*, 25, 6, 689-709.
- Nam, D.H. and Mannering, F. (2000) An Exploratory Hazard-Based Analysis of Highway Incident Duration. *Transportation Research Part A*, Vol. 34A, No. 2, 85-102.
- Newbery, D. M. (1988). Road User Charges in Britain, *The Economic Journal* 98, 161-176.
- Oxley, L. and Greasley, D. (1998). Vector autoregression, cointegration and causality: testing for the causes of the British industrial revolution. *Applied Economics*, 30, 1387-1397.
- Pisano, P.A., Goodwin, L.C. and Rossetti, M.A. (2008). U.S. Highway crashes in adverse road weather conditions. *Proceedings of the 88 th Annual American Meteorological Society meeting*, 20–24 January, New Orleans, LA .
- Saberi, M. K. and Bertini, R. L. (2010) Beyond Corridor Reliability Measures: Analysis of Freeway Travel Time Reliability at the Segment Level for Hotspot Identification TRB 89th Annual Meeting Compendium of Papers. Washington, DC, Transport Research Board.
- Schrage, A. (2006). Traffic Congestion and Accidents. University of Regensburg Working Papers in Business, Economics and Management Information Systems 419, University of Regensburg, Department of Economics. http://epub.uni-regensburg.de/4535/1/Congestion_and_Accidents_WP.pdf
- Skabardonis, A., Petty, K. & Varaiya, P. (1999) Los Angeles I-10 Field Experiment: Incident Patterns. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1683(-1), 22-30.
- Satterthwaite, S. (1976). An Assessment of Seasonal and Weather Effects on the Frequency of Road Accidents in California, University College London, Traffic Studies Group; *Accident Analysis and Prevention*, 8, 2, 87-96.
- Tavassoli-Hojati, A., Ferreira, L., Charles, P. and Shobeirinejad, A. (2013a). Quantifying the impacts of traffic incidents on urban freeway speeds. 36th Australasian Transport Research Forum Brisbane, Australia.
- Tavassoli-Hojati, A., Ferreira, L., Washington, S. and Charles, P. (2013b). Hazard based models for freeway traffic incident duration. *Accident Analysis and Prevention*, 52, 171-181.
- Tavassoli-Hojati, A., Ferreira, L., Washington, S. and Charles, P. (2014). Modelling total duration of traffic incidents including incident detection and recovery time. *Accident Analysis and Prevention*, 71, 296-305.
- Valent, F., Schiava, F., Savonitto, C., Gallo, T., Brusaferro, S., Barbone, F. (2002). Risk factors for fatal road traffic accidents in Udine, Italy. *Accident Analysis and Prevention*, 34, 71–84.
- Wirtz, J., Schofer, J. and Schulz, D. (2005). Using simulation to test traffic incident management strategies: the benefits of preplanning. *Transportation Research Record*, 1923, 82-90.
- Zhang, G., Yau, K. K. W. and Chen, G. (2013). Risk factors associated with traffic violations and accident severity in China. *Accident Analysis and Prevention*, 59, 18-25.