

# Estimación de modelos predictivos de accidentes en ámbito urbano para la incorporación en la evaluación social de proyectos en Chile

## ESTIMATION OF ACCIDENT PREDICTION MODELS IN URBAN SETTINGS FOR THEIR INCLUSION IN SOCIAL APPRAISAL OF PROJECTS IN CHILE

Mauro Huenupi<sup>a\*</sup>, Gabriel Montero<sup>a</sup>, Alan Thomas<sup>b</sup>.

a. Aristo Consultores Ltda.

b. Secretaría de Planificación de Transporte de Chile (Sectra)

---

\* Autor para correspondencia:  
mhuenupi@aristo.cl

### RESUMEN

Un requisito clave para la incorporación de los accidentes en la evaluación social de proyectos de transporte es contar con herramientas que permitan hacer predicciones de la cantidad de accidentes en función de los atributos físicos y operativos de los lugares a intervenir. En este trabajo se estimaron modelos de predicción de accidentes con el método Bayesiano Empírico, buscando explicar la ocurrencia de accidentes en función de distintos atributos de las intersecciones y tramos analizados. Se generó una base de datos que combina información estadística de accidentes y la descripción física/operativa y los flujos vehiculares en intersecciones y tramos de vías urbanas para generar modelos que tuvieran capacidad predictiva y pudieran implementarse de manera relativamente sencilla. Se obtuvo modelos separados para tramos e intersecciones semaforizadas y de prioridad, con ajuste estadístico comparables a los reportados en la literatura internacional y sensibles a distintas variables. La principal variable explicativa de los accidentes resultó ser el flujo vehicular, también tiene influencia el tipo de regulación de la intersección.

Palabras clave: accidentes, modelos de predicción, bayesiano empírico.

### ABSTRACT

*A key requirement for the incorporation of accidents into the social assessment of transport projects is to have tools that allow predictions of the number of accidents, based on the physical and operational attributes of the locations to be intervened. In this paper we estimate models of prediction of accidents using the Empirical Bayes Method. We seek to explain the occurrence of accidents as a function of different attributes of the intersections and sections analyzed. A database was created that combines physical/operational description and flow information at various locations analyzed, keeping in mind the objective of generating models with predictive capacity and relatively simple. Models were obtained for road sections, traffic light and priority intersections, with statistical measures of goodness-of-fit that are comparable to those reported in the international literature. The main explanatory variable of the accidents turned out to be the vehicular flow, the type of regulation of the intersection also influences.*

*Keywords: accidents, predictive models, empirical bayes method.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La inversión pública en Chile en general, y en infraestructura de transporte en particular, está sometida a un proceso de aprobación que consiste en la verificación ante el Ministerio de Desarrollo Social (MDS) de la rentabilidad social asociada, para lo cual se ha construido en las últimas décadas una batería de metodologías de evaluación que recogen distintas dimensiones de los impactos de los proyectos. Conforme ha pasado el tiempo, el sistema que administra este proceso (Sistema Nacional de Inversiones, SNI) ha ido sofisticando, mejorando las metodologías existentes y agregando nuevas que incorporan otras dimensiones.

En particular, si bien la seguridad de tránsito ha sido un elemento permanente en la declaración de objetivos de los sistemas de transporte en Chile, sólo recientemente se ha incorporado esta dimensión al Sistema Nacional de Inversiones con una metodología ad-hoc, que sólo trata el caso interurbano (Sectra 2011). Para suplir esta falencia, el Programa de Vialidad y Transporte Urbano: Sectra, desarrolló un trabajo orientado a definir una metodología para el ámbito urbano que involucra diversos aspectos relacionados con la valoración social de los accidentes urbanos y con la proyección de los impactos en cantidad de accidentes y sus consecuencias: víctimas fatales y no fatales de los proyectos de transporte. Dentro de estos aspectos, uno de particular interés metodológico, guarda relación con la estimación de modelos predictivos de accidentes, materia que se aborda en el presente artículo.

Mediante estos modelos predictivos del número y tipo de accidentes asociados a los proyectos de vialidad urbana es posible estimar la reducción del número de accidentes respecto de una situación base optimizada, y posteriormente valorar cada una las reducciones de acuerdo a los precios sociales establecidos por el Ministerio de Desarrollo Social.

El artículo se estructura en cuatro capítulos, además de esta introducción. En el primero de ellos, se hace una descripción de la bibliografía consultada, extrayendo los aspectos de ella que tuvieron mayor importancia en el desarrollo del trabajo. Posteriormente, se trata el proceso de obtención de datos de accidentes y el trabajo de geolocalización conducido, así como el trabajo de obtención de datos de flujos vehiculares y descripciones geométricas de los lugares en análisis. En el punto siguiente se trata el proceso de estimación de los modelos definidos, así como se presentan los resultados obtenidos. En el capítulo final se discute sobre los resultados obtenidos, sus implicancias de política pública y sobre proyecciones futuras.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Un primer aspecto que vale la pena mencionar es que el tema en cuestión ha recibido bastante atención en la literatura, tanto desde el mundo académico como desde el planteamiento de políticas públicas. Es un tema que, además, presenta algún desarrollo a nivel local.

Existen variados enfoques para enfrentar el problema de la predicción de accidentes, los cuales cuentan con distintos niveles de agregación espacial (a nivel de una intersección en particular o a nivel agregado de un área geográfica) y temporal (cantidad de accidentes por año o la probabilidad de ocurrencia de accidentes en un instante dado). Si bien todos ellos parecen tener distintas aplicaciones, la revisión de bibliografía reveló que el enfoque más utilizado a nivel de definición de política pública para evaluación social o cost benefit analysis corresponde al denominado método bayesiano empírico (AASHTO 2010, NZ Transport Agency 2013, Sectra 2007 y 2011). Mediante este método se busca estimar modelos que expliquen la ocurrencia de accidentes en lugares específicos (intersecciones o tramos de vía) para un periodo relativamente agregado (accidentes por año, por ejemplo) a partir del uso combinado de modelos predictivos generales e información histórica específica del lugar en análisis. Cabe hacer notar que en el caso de Chile, este enfoque resulta aplicable gracias a la existencia del sistema Sistema Integrado Estadístico de Carabineros de Chile, Formulario 2 (SIEC-2) administrado por Carabineros de Chile, en el cual se registran todos los accidentes de tránsito a los que concurren efectivos de la institución, y que permite conocer el historial de accidentes de un determinado lugar. En este enfoque, la modelación del fenómeno para el caso interurbano o rural admite diversas formas funcionales.

La estimación de este tipo de modelos considera una distribución binomial negativa del término de error, de cuya aplicación surge un parámetro de sobredispersión que define las proporciones en que el resultado del modelo y la historia específica del lugar influyen en la predicción final de accidentes.

En AASHTO (2010) y Sectra (2007, 2011) se utilizan aproximaciones prácticamente equivalentes:

$$Y = e^{\beta_0} \cdot VK^{\beta_{VK}} \quad (1)$$

En que

- $Y$  es la cantidad de accidentes predichos (por año).
- $\beta_0$  y  $\beta_{VK}$  son parámetros de calibración.
- $VK$  es el tránsito medido como  $TMDA \cdot 365 \cdot L$ , siendo  $L$  la longitud del tramo.

En el caso de Sectra (2007, 2011), además se utiliza:

$$N = \alpha Y + (1 - \alpha)A \quad (2)$$

con  $\alpha = \frac{1}{1 + \phi Y}$ , en que

- $N$  es la proyección con el método bayesiano empírico.
- $\phi$  es el parámetro de sobredispersión que surge de la estimación del modelo de  $Y$ . El valor estimado fue 0,51.

En ambas referencias (AASHTO, 2010 y Sectra 2011), destinadas al análisis en el ámbito rural, se hizo uso de variables explicativas sencillas (flujo y longitud), generando algunas precisiones mediante la estimación de los parámetros por separado por región o tipo de camino. En el ámbito urbano, sin embargo, resulta interesante explorar qué otras variables era de interés incorporar, para lo cual se recurrió a literatura científica internacional.

La mayoría de los artículos de estimación de accidentes en el ámbito urbano utilizan en método bayesiano empírico (Maher y Summersgill, 1996; Mountain, et al. 1996; Ye, et al. 2013; Gomes, 2013; Lorda et al., 2005; Rizzi, 2003). En Rizzi (2013) se discute sobre el uso de distintas distribuciones del término de error en la predicción de accidentes, siendo de particular interés la que se presenta sobre la distribución con exceso de ceros (zero inflated) que ha sido propuesta por algunos investigadores como una alternativa a la función binomial negativa. El uso de la función con exceso de ceros tiene implícito el supuesto de que existen dos estados para la vía o intersección analizada: un estado seguro en el cual no se producen accidentes y un estado donde sí ocurren. Dicho supuesto, sin embargo, ha sido criticado por distintos especialistas que sostienen que esa situación no ocurre en la práctica, lo que ha hecho que en general no se recomiende su uso a pesar de que genera Modelos Predictivos de Accidentes (MPA) con un mejor ajuste estadístico.

En términos de las variables consideradas en los distintos trabajos revisados, en la mayoría de los casos se utiliza como variable dependiente la cantidad de accidentes por año, en desmedro de la tasa de accidentes (accidentes por veh-km), utilizada en trabajos como Elvik (2007). Esta variable en casi la totalidad de los casos se estima de forma agregada, aunque algunos autores intentan presentar desagregaciones como la gravedad de las lesiones (Gomes 2013, Golob y Recker 2003), tipo de usuario (Maher y Summersgill 1996, AASHTO 2010) o tipo de accidente (Golob y Recker 2003, AASHTO 2010).

Respecto de las variables explicativas, la variedad es mayor. En el caso de los modelos para predecir accidentes en tramos, todos los trabajos consideran flujo vehicular y longitud del tramo y siempre resultan ser las variables más relevantes. Otras variables utilizadas incluyen número de pistas (Elvik 2007, Gomes 2013, AASHTO 2010), luminosidad (Golob y Recker 2003, AASHTO 2010) y velocidad límite (Greibe 2003, Ye et al. 2013). En los modelos para intersecciones, en cambio, la variable más relevante es flujo por vía prioritaria/secundaria, siendo la excepción los que consideran solo el flujo total. Otras variables consideradas incluyen flujo peatonal (Maher 1996, Golob 2003, Turner y Nicholson 1998), presencia de pistas de viraje (Gomes 2013, AASHTO 2010), cantidad de ramas de la intersección (Layfield et al. 1996, Greibe 2003, AASHTO 2010) y tipo de señalización (Maher 1996, Golob y Recker 2003, AASTHO 2010).

Finalmente, cabe destacar la importancia del trabajo de Elvik (2007), cuya revisión muestra el estado del arte a esa fecha en estimación de modelos de predicción de accidentes, repasando varios aspectos metodológicos clave como especificaciones de modelos, selección de variables explicativas, relaciones funcionales, sobredispersión, etc. Elvik (2007) fue utilizado para el desarrollo de la estimación de modelos que se presenta más adelante.

### 3. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

El objetivo de este trabajo fue generar, haciendo uso de información existente, modelos de predicción de accidentes (MPA) que fuesen aplicables en Chile. Para esto se recopiló y sistematizó datos de flujos vehiculares y catastros físico-operativos incluidos en estudios de transporte realizados en un grupo de ciudades de Chile con diferentes climas, topografía y tamaño y, por otro lado, se procesó el registro de accidentes que administra Carabineros de Chile. La información utilizada cubre el período 2008-2015.

El área de análisis involucró el área urbana de Antofagasta, Gran Valparaíso<sup>1</sup>, Gran Santiago<sup>2</sup>, Temuco y Punta Arenas entre los años 2008 y 2015 que en total registran casi 70 mil accidentes con lesionados (no existe información oficial sobre accidentes sin lesionados). La mayor proporción de los accidentes ocurrió en el Gran Santiago (72%) mientras que el resto se reparte en las otras ciudades como sigue: Gran Valparaíso 13%, Temuco 6%, Antofagasta 5% y Punta Arenas 3%. La siguiente tabla muestra la tasa promedio de accidentes en cada ciudad. Detalles se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1  
*Tasa promedio de accidentes por ciudad*

Ciudad	Promedio accidentes (acc/año)	Población 2010 (hab)	Tasa (acc/100 mil hab)
Antofagasta	715	367.019	195
G. Valparaíso	1.798	907.383	198
G. Santiago	9.822	6.060.077	162
Temuco	879	377.486	233
Punta Arenas	417	124.949	333
Total general	13.631	7.836.914	174

Fuente: Elaboración propia

La ciudad de Punta Arenas destaca por lo elevado de su tasa promedio de accidentes, mientras que el resto de las ciudades se encuentran en un rango relativamente acotado. Posiblemente sus condiciones climáticas extremas, que incluyen ventiscas y hielo en las calles, explican en parte esa diferencia.

La información de accidentes proporcionada por la Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito (Conaset) y Carabineros de Chile incluye la intersección (calle 1, calle 2) o el lugar (calle, número) donde ocurrió el siniestro. Sin embargo, esa información no siempre permite ubicar el lugar debido a errores que se producen en los distintos procesos que ocurren desde la toma de datos hasta la generación final de la base de datos. Conocer y describir con la mayor precisión posible el momento y lugar del accidente es fundamental para generar MPA.

En el caso del Gran Santiago la información de la ubicación de los accidentes estuvo disponible ya georreferenciada, para las otras cuatro ciudades se realizó un proceso de normalización de direcciones y georreferenciación tras lo cual fue posible ubicar cerca del 90% de los accidentes. La georreferenciación permitió generar mapas de concentración de accidentes en cada ciudad como el que se muestra en la Figura 1 para la ciudad de Temuco.

Los estudios de transporte revisados permitieron recopilar y sistematizar datos de flujos vehiculares, factores de expansión para generar flujos diarios (TMDA) y características geométricas de intersecciones y tramos de vía en cada ciudad. Es necesario precisar, que no existe un censo de flujos de tráfico urbano, con información histórica y sistematizada, razón por la cual fue necesario recurrir a los diversos estudios existentes. Si bien estos estudios se concentran principalmente en la vialidad estructurante de las ciudades, posible causa de un sesgo, tampoco se debe ignorar que es en esta vialidad, por el volumen de los flujos vehiculares, donde ocurre la mayor cantidad de accidentes.

<sup>1</sup> Conurbación formada por 5 comunas: Valparaíso, Viña del Mar, Concón, Quilpué y Villa Alemana.

<sup>2</sup> Conurbación formada por 34 comunas: Provincia de Santiago y las comunas de Puente Alto y San Bernardo.

Cada lugar analizado (intersección o tramo) fue además localizado mediante sus coordenadas geográficas aproximadas. Como se explica más adelante, las coordenadas fueron utilizadas para establecer el vínculo entre lugares y accidentes en cada año. La información fue dispuesta en formato base de datos con dos tablas ligadas entre sí: lugares y accesos, cuya descripción de contenido se muestra en las Tablas 2 y 3.

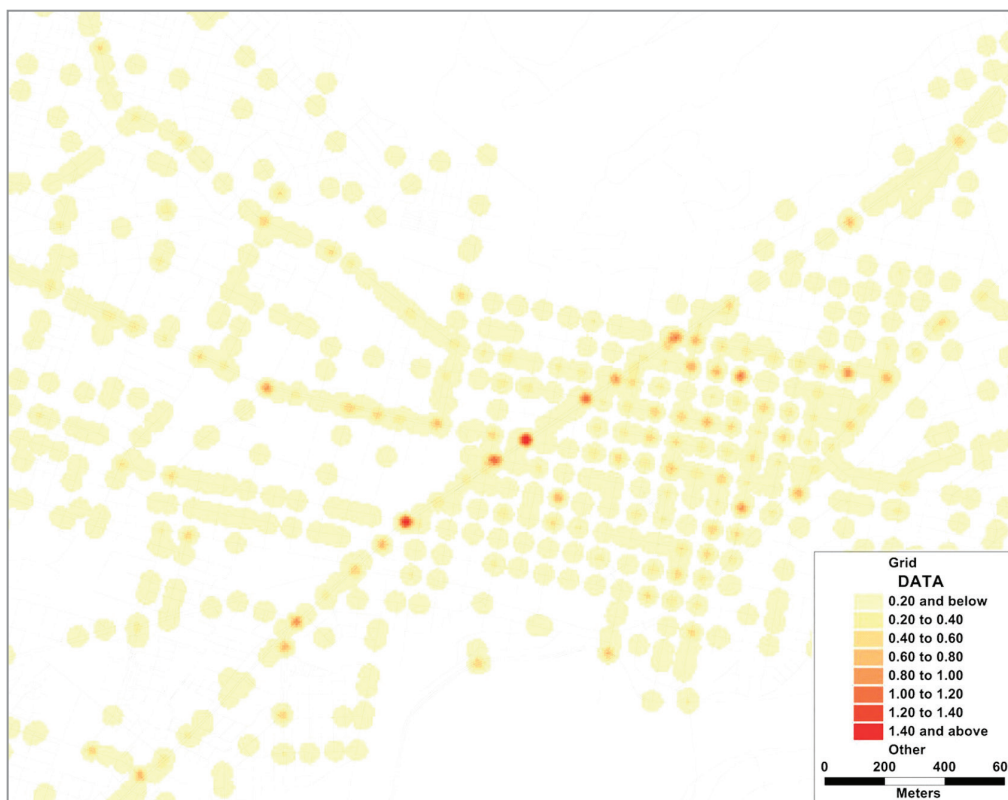


Figura 1. Mapa de concentración de accidentes en Temuco

Tabla 2

Descripción de variables tabla "Lugares"

Variable	Descripción
<b>ID_Lugar</b>	Identificador del lugar en el presente estudio
<b>ID_Original</b>	Identificador del lugar en el estudio en que se recogió la información
<b>Ciudad</b>	Nombre de la ciudad donde se localiza el lugar analizado
<b>Comuna</b>	Nombre de la comuna donde se localiza el lugar analizado
<b>Tipo de lugar</b>	Especifica si se trata de un tramo de vía o un determinado tipo de intersección
<b>Nombre</b>	Nombre de calle del tramo o nombres de calles que llegan a la intersección
<b>Entorno</b>	Indica si el lugar se encuentra en el área céntrica de la ciudad o en áreas de concentración de comercio o servicios fuera del área céntrica donde se produce concentración de peatones y vehículos, o bien en zonas periféricas
<b>Regulación</b>	Tipo de regulación de la intersección
<b>Lat</b>	Latitud geográfica del lugar. En el caso de tramos corresponde al punto medio del tramo
<b>Long</b>	Longitud geográfica del lugar. En el caso de tramos corresponde al punto medio del tramo
<b>F_PX</b>	Factor de expansión del flujo vehicular del período X

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3

Descripción de variables tabla "Accesos"

Variable	Descripción
<b>ID_Lugar</b>	Identificador del lugar en el presente estudio
<b>ID_Acceso</b>	Identificador del acceso
<b>ID_Eje</b>	Identificador del eje al que pertenece el acceso
<b>Year</b>	Año en que se registró la información de flujos y características físico-operativas
<b>Calle</b>	Nombre de la calle donde se ubica el acceso
<b>Direccion</b>	Dirección del eje al que pertenece el acceso
<b>Sentido</b>	Sentido de circulación de los vehículos en el acceso
<b>Prioritario</b>	Indica si el acceso es prioritario o secundario con respecto al derecho de paso
<b>Pistas_Totales</b>	Número de pistas que en total tiene el acceso, no distingue sentido de circulación
<b>Pistas_Acceso</b>	Número de pistas del acceso que llegan a la intersección o número de pistas del tramo en el sentido de circulación definido en la variable "sentido"
<b>Longitud</b>	Longitud de tramo de vía definido. Vale 0 para intersecciones
<b>Mediana</b>	Vale 1 si existe una mediana en el eje al que pertenece el acceso y 0 en caso contrario
<b>Pistas_Viraje</b>	Vale 1 si existen pistas de viraje (a la izquierda o derecha) en el acceso
<b>Isla_Central</b>	Vale 1 si existen pistas de viraje (a la izquierda o derecha) en el acceso
<b>TMDA_liv_PX</b>	TMDA asociado a vehículos livianos en el período X. La suma sobre todos los períodos genera el TMDA de vehículos livianos
<b>TMDA_pes_PX</b>	TMDA asociado a vehículos pesados en el período X. La suma sobre todos los períodos genera el TMDA de vehículos pesados

Fuente: Elaboración propia

Para estimar los MPA se generó una base de datos de accidentes y características físico-operativas uniendo las respectivas bases de datos a través de la localización (coordenadas geográficas) de dichos accidentes y lugares.

Para intersecciones el procedimiento de ligazón de los datos fue el siguiente.

1. Para cada accidente se identificó el lugar más cercano de la base de datos características físico-operativas, en el año en que ocurrió ese accidente. Se consignó además la distancia euclidiana entre el accidente y el lugar señalado como el más cercano.
2. A continuación, se definió para cada accidente un indicador preliminar de pareo al que se asignó valor 1 si la distancia euclidiana al lugar más cercano era menor o igual a 25 m. La distancia se calculó utilizando las coordenadas de los accidentes y los lugares.
3. Finalmente, se realizó un proceso manual de revisión de los nombres de las calles involucradas en ambas fuentes de información verificando que coincidieran, pero ignorando diferencias en la escritura de los nombres.

Como resultado de esta revisión manual se generó un indicador definitivo de pareo, que toma valor 1 cuando se cumplen todas las condiciones mencionadas y 0 en caso contrario.

Para tramos de vía el procedimiento fue similar al ya descrito, pero considerando como umbral de distancia la mitad de la longitud del tramo con una tolerancia de 10%. De esta manera se buscó incluir los accidentes ocurridos dentro de la "cuadra" que representa el tramo. Después se revisó manualmente que el nombre del eje en la información del accidente y del tramo coincidiera, ignorando diferencias de escritura de esos nombres.

El resultado del proceso de pareo de accidentes y lugares permitió generar un listado de accidentes con una intersección o un tramo de vía asignado porque se cumplieron las condiciones impuestas.



Una parte considerable de los accidentes no pudo parearse pues ocurrieron en lugares sin información físico-operativa, pero esto no afectó la estimación de tasas y MPA porque la unidad de referencia en ese proceso fueron los lugares y no los accidentes.

En efecto, terminado el proceso descrito se procedió a asignar a cada lugar (localización y año) el número de accidentes ocurridos allí como la suma de los accidentes que fueron pareados con ese lugar. Una parte de los lugares (56%) resultó sin accidentes, lo que era esperable y además deseable para que la estimación de los MPA no estuviera sesgada.

#### 4. ESTIMACIÓN DE MODELOS

De acuerdo a la revisión de antecedentes y la información disponible se procedió a estimar MPA con la siguiente especificación para el caso de intersecciones:

$$acc = \alpha q_p^k q_s^\eta \exp(\sum_i \gamma_i x_i) \quad (3)$$

$$acc = \sigma L^\theta q^\rho \exp(\sum_i \tau_i x_i) \quad (4)$$

Donde

- acc: es el número esperado de accidentes por año.
- $q_p$ ,  $q_s$ ,  $q$ : son el TMDA en la vía prioritaria, secundaria o del tramo, respectivamente, expresados en miles de veh/h.
- L: es la longitud del tramo de vía, expresada en kilómetros.
- $x_i$ : son variables físico-operativas o factores de riesgo que describen la intersección.
- $\alpha$ ,  $\kappa$ ,  $\eta$ ,  $\gamma_i$ ,  $\sigma$ ,  $\theta$ ,  $\rho$ ,  $\tau_i$ : son parámetros a estimar. En particular, los exponentes de los flujos representan la elasticidad del número de accidentes con respecto al flujo vehicular prioritario, secundario o del tramo, según corresponda.

No se consideró incluir variables que permitieran capturar efectos propios de cada ciudad ya que estos MPA estaban orientados a una metodología de evaluación social aplicable a nivel nacional. En este sentido, los resultados de este trabajo capturan los efectos promedio en el número de accidentes de cada variable explicativa. La inclusión de efectos locales de cada ciudad es un tema de investigación futura.

A continuación se muestran los resultados de la estimación de los parámetros de cada modelo, incluyendo el factor de sobredispersión asociado al supuesto de una distribución binomial negativa de los datos de accidentes. En cada caso se indican distintos estadígrafos que permiten analizar la calidad de los modelos. En la estimación se utilizó la técnica de máxima verosimilitud y el software EViews.

Las variables explicativas utilizadas ( $x_i$ ) en los distintos MPA fueron las siguientes:

- LOG(CONSTANTE): logaritmo de la constante del modelo. Surge porque la estimación se realiza sobre el logaritmo del MPA (ver ecuación más arriba) para generar una especificación lineal en los parámetros.
- ENTORNO: 1 si el entorno del lugar (intersección) es céntrico y 0 en caso contrario.
- ISLA\_CENTRAL: 1 si la intersección cuenta con isla(s) para proteger a los peatones y 0 si no.
- MEDIANA: 1 si la intersección cuenta con mediana(s) para proteger a los peatones y 0 en caso contrario.
- PISTAS\_VIRAJE: vale 1 si la intersección cuenta con pista(s) de viraje para proteger a los peatones y 0 en caso contrario.
- TIPOCRUZ: vale 1 si la intersección tiene 4 accesos y 0 en caso contrario.
- TIPOT vale 1 si la intersección tiene 3 accesos y 0 en caso contrario.
- LOG( $q_p$ ): logaritmo de (TMDA/1000) en la vía prioritaria.
- LOG( $q_s$ ): logaritmo de (TMDA/1000) en la vía secundaria.
- LOG(SOBREDISPERSION): logaritmo del parámetro de sobredispersión ( $\mu$ ) asociado al supuesto de distribución binomial negativa de los accidentes. Se cumple entonces que  $V = \text{acc}(1 + \mu \cdot \text{acc})$  donde V es la varianza y acc la media de los accidentes.

Debido al tamaño de la muestra disponible y su composición por consecuencias en las personas y ciudad, los MPA se estimaron sin distinguir la gravedad de las consecuencias y tampoco la ciudad en que ocurrieron. La estimación se realizó sobre una transformación logarítmica de las expresiones definidas para la variable  $acc$  para obtener un modelo lineal en los parámetros. Los modelos para intersecciones semaforizadas se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4  
Modelos de predicción de accidentes por tipo de intersección

Variable	No semaforizadas		Semaforizadas	
	Coficiente	P-valor	Coficiente	P-valor
LOG(CONSTANTE)	-3,443	0,000	-1,452	0,000
ENTORNO	0,354	0,059	-0,299	0,018
TIPOCRUZ	1,751	0,000	0,407	0,144
TIPOT	1,155	0,009	0,262	0,422
LOG(qp) *	0,634	0,000	0,379	0,001
LOG(qs)	0,188	0,074	0,430	0,000
LOG(SOBREDISPERSIÓN)	0,545	0,001	0,132	0,284
Número de observaciones	423		415	
pseudo R2	0,272		0,267	

(\*) Es la vía con mayor flujo en el caso de intersecciones semaforizadas

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros estimados son significativos estadísticamente y el ajuste obtenido tiene valor aceptable en cada caso. Los modelos muestran que en intersecciones no semaforizadas (reguladas con señales Pare o Ceda el Paso) la elasticidad del número de accidentes con respecto al flujo de la vía prioritaria es más del triple de la elasticidad con respecto al flujo de la vía secundaria. En el caso de intersecciones semaforizadas las elasticidades son similares para ambas vías, pero eso es razonable porque la prioridad alterna entre una y otra vía en cada ciclo del semáforo: no hay una vía que tenga permanentemente derecho de paso como en las intersecciones no semaforizadas. En todos los casos la elasticidad es menor que 1 y en consecuencia se tiene un crecimiento a tasa decreciente de los accidentes con respecto al flujo vehicular. Este comportamiento puede explicarse por la disminución de la velocidad que induce la mayor congestión que se observa al aumentar el flujo.

Manteniendo fijas las restantes variables explicativas, para ambos tipos de intersecciones la configuración en cruz tiene asociado un mayor número de accidentes, efecto más notorio en el caso de las semaforizadas. Por otro lado, las intersecciones céntricas semaforizadas muestran menos accidentes que las ubicadas fuera del centro; lo contrario ocurre en las intersecciones no semaforizadas. Para tramos de vía, el modelo estimado se presenta en la Tabla 5. Al igual que en el caso de las intersecciones, los parámetros estimados son estadísticamente significativos y el ajuste es aceptable. En este caso, el resultado principal es que la elasticidad del número de accidentes (0,416) con respecto al flujo es similar a la de intersecciones semaforizadas.

La literatura especializada recomienda que la estimación del número de accidentes se realice mediante la técnica bayesiana empírica. Esto implica que la mejor estimación de los accidentes es el promedio ponderado del valor estimado con el MPA ( $acc_m$ ) y los accidentes registrados en el lugar ( $acc_\gamma$ ). El ponderador en ese promedio ( $\alpha$ ) es una función del parámetro de sobredispersión ( $\mu$ ) y  $acc_m$ , como se indica en la ecuación (5):

$$\alpha = \frac{1}{(1 + \mu \cdot acc_m)} \quad (5)$$

Por lo tanto, la estimación bayesiana empírica del número de accidentes ( $acc_f$ ) está dada por la ecuación (6):

$$acc_f = \alpha \cdot acc_m + (1 - \alpha) acc_\gamma \quad (6)$$



Según los resultados reportados previamente, el ponderador  $\alpha$  toma valores entre 0,3 y 0,5 aproximadamente. Esto significa que los MPA generados representarán entre el 30% y el 50% del número de accidentes que resulte al aplicar el método bayesiano empírico. Este resultado es similar al obtenido en el caso de MPA para vías interurbanas. En definitiva, el número estimado de accidentes será siempre un valor intermedio entre el promedio de accidentes registrados en el lugar y los estimados con el MPA; lo que da cuenta del fenómeno de regresión a la media.

Tabla 5  
*Modelo de predicción de accidentes para tramo de vía*

Variable	Coficiente	P-valor
LOG(CONSTANTE)	-0,960	0,015
LOG(LONGITUD)	1,121	0,000
ENTORNO	--	--
ISLA_CENTRAL	--	--
MEDIANA	--	--
PISTAS_VIRAJE	--	--
LOG(q)	0,416	0,007
LOG(SOBREDISPERSION)	1,515	0,000
Número observaciones	1003	
pseudo R2	0,355	

Fuente: Elaboración propia

## 5. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue generar, haciendo uso de información existente, modelos de predicción de accidentes (MPA) que fuesen aplicables en Chile. La revisión bibliográfica permitió conocer el estado del arte en la modelación de accidentes de tránsito urbanos, y orientar la formulación de los modelos a utilizar, así como la información requerida. Se recopiló y sistematizó datos de flujos vehiculares y catastros físico-operativos incluidos en estudios de transporte realizados en un grupo de ciudades de Chile con diferentes climas, topografía y tamaño y, por otro lado, se procesó el registro de accidentes que administra Carabineros de Chile. La información utilizada cubre el período 2008-2015. Por último, calibraron modelos de predicción de accidentes urbanos (MPA), los cuales forman parte de la metodología de evaluación social de la reducción accidentes urbanos utilizada por el Ministerio de Desarrollo Social de Chile.

Se concluye, en primer lugar, que el proceso de calibración resultó exitoso, en el sentido de que fue posible generar modelos relativamente simples y con ajustes similares a los reportados en la literatura revisada. Se logró además incorporar distintas variables explicativas, lo que hace a los modelos sensibles a otros elementos además del flujo. Posiblemente, el trabajo de detalle en la identificación de flujos y variables físicas y operativas jugó un rol en este aspecto.

Se estima que los modelos obtenidos son funcionales al objetivo propuesto y que serán útiles para incorporar la seguridad de tránsito a la evaluación social de proyectos en Chile. La incorporación oficial de una metodología de evaluación social de impactos en la seguridad de tránsito urbano, cabe mencionar, puede tener un importante impacto a la hora de escoger proyectos que mejoren la seguridad vial.

Lo anterior cobra mayor relevancia con el nuevo enfoque adoptado por el Ministerio de Desarrollo Social (MDS) de Chile para la estimación del Valor Estadístico de la Vida por Reducción de Riesgo de Accidentes, de Capital Humano al de Disposición a Pagar por Reducción de Riesgo. Debido a esto, el impacto de la reducción del número y gravedad de los accidentes de tránsito será significativo en la Evaluación Social de Proyectos de Vialidad Urbana.

Se estima que esta línea de análisis debiera ser complementada por al menos dos vías. Por un lado, sería conveniente aumentar la base de datos de modo de contar con más elementos de calibración, tanto agregando información de variables físicas y operativas en las ciudades analizadas (de modo de aprovechar la información de accidentes geolocalizados) como agregando ciudades al análisis, de modo de recoger eventuales diferencias entre las distintas zonas del país. Por otro lado,

ya sea con las bases de datos actuales o ampliadas, explorar nuevas formulaciones y enfoques de estimación que permitan mejorar la capacidad predictiva. Por ambas vías se debiera lograr mejores modelos predictivos que permitan incorporar con una adecuada precisión la reducción de accidentes de tránsito en la evaluación social de proyectos.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se basa en los resultados del estudio “Metodología para la evaluación social de la reducción de accidentes urbanos”, contratado por SECTRA, Chile, a Aristo Consultores Ltda. en 2014.

Su desarrollo fue posible gracias a la existencia de datos de accidentes levantados por Carabineros de Chile y administrados en el sistema SIEC-2, los cuales fueron puestos a disposición del estudio por parte de la Comisión Nacional de Seguridad de Tránsito (Conaset). La información de flujos vehiculares y características físico-operativas de las vías se obtuvieron de diversos estudios de transporte contratados principalmente por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, a través de Sectra. Se hace presente que Conaset y MDS participaron como contraparte del estudio que fue la base de este artículo.

## REFERENCIAS

AASHTO (2010) Highway Safety Manual (HSM).

Elvik, R. (2007) State-of-the-art approaches to road accident black spot management and safety analysis of road networks. TFI Report 883, 2007. The Institute of Transport Economics. Oslo, Noruega.

Golob, T.F. y Recker, W.W. (2003) A method for relating type of crash to traffic flow characteristics on urban freeways. *Transport Research Part A: Policy and Practice*, 38(1), 53-80.

Gomes, S.V. (2013) The influence of the infrastructure characteristics in urban road accidents occurrence. *Accident Analysis and Prevention*, 60, 289-297.

Greibe, P. (2003) Accident prediction models for urban roads. *Accident Analysis and Prevention*, 35, 273-285.

Layfield, R.E., Summersgill, I., Hall, R.D. y Chatterjee, K. (1996) Accidents at urban priority crossroads and staggered junctions. Crowthorne, GB, Transport Research Laboratory, 120. TRL Report 185.

Lord, D., Washington, P. y Ivan, S. (2005) Poisson, Poisson-gamma and zero-inflated regression models of motor vehicle crashes: balancing statistical fit and theory. *Accident Analysis and Prevention*, 37, 35-46.

Maher, J. y Summersgill, I. (1996) A comprehensive methodology for the fitting of predictive accident models. *Accident Analysis and Prevention*, 28, 281-296.

Mountain, L., Fawaz, B. y Jarrett, D. (1996) Accident prediction models for roads with minor junctions. *Accident Analysis and Prevention*, 28, 695-707.

NZ Transport Agency (2013) Economic Evaluation Manual.

Rizzi, L.I. (2003) Fotorradares y seguridad vial: un análisis empírico bayesiano. Actas del XI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte. 20-24 octubre 2003. Santiago, Chile 531-543.

Sectra (2007) Análisis y definición de una metodología para la evaluación social de impactos de proyectos sobre la seguridad vial en rutas interurbanas. Informe final del estudio. Secretaría de Planificación de Transporte, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Chile.

Sectra (2011) Metodología simplificada de estimación de beneficios sociales por disminución de accidentes en proyectos de vialidad interurbana. Secretaría de Planificación de Transporte, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. Chile.

Turner, S. y Nicholson, A. (1998) Intersection accident estimation: the role of intersection location and non-collision flows. *Accident Analysis and Prevention*, 30, 505-517.