

TEMAS DE SEGURIDAD DE TRANSITO EN SECCIONES DE ENTRELACE: UN ANALISIS ESTADISTICO

Verónica M. Alvarez, Thomas F. Golob, Wilfred W. Recker

Institute of Transportation Studies

University of California, Irvine

522 Social Science Tower

University of California

Irvine, CA 92697-3600, USA

e-mail: valvarez@translab.its.uci.edu, tgolob@uci.edu, wwrecker@uci.edu

RESUMEN

Una de las principales fuentes de conflicto en la interacción de vehículos se produce en las secciones de entrelace en autopistas, en las cuales las entradas y salidas hacia y desde la autopista se encuentran muy cerca y bajo diversas configuraciones. Esto hace que los vehículos tengan que hacer múltiples cambios de pista tanto cuando entran así como cuando salen de la vía principal. Utilizando información de accidentes ocurridos en una porción del Sur de California, Estados Unidos, examinamos los tres tipos de secciones de entrelace definidas en la literatura como: tipo A, donde cada vehículo que entra o sale de la autopista debe ejecutar un cambio de pista, tipo B, donde la entrada o salida puede ser realizada sin cambios de pista y tipo C, donde una maniobra requiere al menos dos cambios de pista. No se encontraron diferencias entre estos tres tipos de secciones en términos del total de accidentes en las 55 secciones de entrelace sobre un año (1998). Sin embargo, se encontraron diferencias en términos de la clase de accidentes que ocurren dentro de los tipos de secciones en términos de severidad, ubicación del accidente, los factores que causan el accidente y el período en el cual el accidente tiene una mayor probabilidad de ocurrencia. Estas diferencias en temas de seguridad de tránsito podrían llegar a ser una guía importante en el mejoramiento de metodologías usadas hasta hoy por los ingenieros de tráfico en el diseño de autopistas.

1. INTRODUCCION

En búsqueda de operaciones más seguras y eficientes en las autopistas, los estudios en ingeniería de tráfico buscan rediseñar la infraestructura y manejar el tráfico de manera de atenuar la congestión y reducir los conflictos entre vehículos que podrían generar incidentes resultando en congestión no recurrente. Una importante fuente de conflictos en autopistas son las secciones de entrelace, donde las maniobras de entrada y salida hacia y desde la vía principal requiere que los vehículos ejecuten uno o más cambios de pista. (Una entrada y una salida separadas por menos que 0.4 a 0.5 millas es considerada de proximidad cercana, dependiendo del tipo de sección de entrelace considerado).

Se identifican tres tipos de secciones de entrelace basadas en el mínimo número de pistas requeridas para completar las maniobras de intercambio (TRB 1997; 2000).

- **Sección de entrelace tipo A:** cada vehículo que entra o sale de la autopista debe ejecutar sólo un cambio de pista. El tipo A más común es el par de rampa-entrada rampa-salida conectado por una pista auxiliar.
- **Sección de entrelace tipo B:** uno de los movimientos descritos (ya sea entrada o salida) puede ser ejecutado sin cambiar de pista, mientras que el otro requiere a lo más un cambio de pista. Secciones tipo B en general, tienen una pista adicional en la rampa de entrada, por lo que los vehículos que entran a la autopista no necesitan hacer cambio de pista, sin embargo el tráfico aguas abajo con intenciones de abandonar la vía principal debe moverse hacia la pista adicional para acceder a la rampa de salida.
- **Sección de entrelace tipo C:** uno de los movimientos descritos puede ser ejecutado sin cambiar de pista, mientras el otro requiere al menos dos cambios de pista.

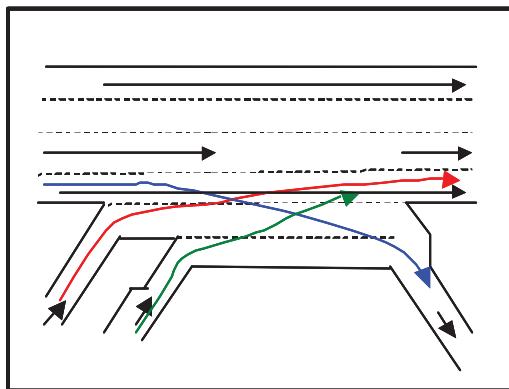


Figura 1: Sección de Entrelace y Movimientos Asociados

Es posible que dos de estos tipos de secciones de entrelace puedan traslaparse. En tal situación, en este estudio, la sección resultante tendrá características conjuntas de dos de los tipos mencionados anteriormente. Un ejemplo de sección de entrelace típica se muestra gráficamente en Figura 1. En la última edición de Highway Capacity Manual (HCM), se incluyen los cálculos de la velocidad de los vehículos que salen de y entran a la autopista, de lo cuál es posible computar medidas tales como la densidad de vehículos en el área para luego asignar el nivel de servicio correspondiente (TRB, 2000). Las características geométricas requeridas para analizar las secciones de entrelace son las siguientes: longitud de la sección, configuración (para determinar parámetros de operación) y numero de pistas. Adicionalmente, las características de

los vehículos y su distribución sobre la corriente de tráfico constituyen información relevante a ser considerada en este tipo de análisis.

Con respecto al diseño y al análisis de las secciones de entrelace, se han desarrollado varios métodos de evaluación, entre los cuales podemos mencionar el Método de California (Moskowitz y Newman, 1963), HCM 1965 (TRB, 1965), Método de Leisch (Leisch, 1983), Procedimiento PINY (Pignataro *et al.*, 1975), Algoritmo JHK (Reilly *et al.*, 1984), *HCM* (1985) y el Método de Fazio y Roushail (1986). En general, estos procedimientos predicen la velocidad promedio de los vehículos en el área y típicamente establecen un nivel de servicio basado en las velocidades estimadas. Adicionalmente, estos procedimientos han sido utilizados para evaluar diseños geométricos de secciones de entrelace.

Los estudios existentes se han centrado típicamente en características operacionales relacionadas con el flujo de vehículos dentro de la sección de entrelace. Por ejemplo, Steward *et al.* (1996), encontró que el número de pistas era el factor crítico en la determinación de la capacidad de la sección de entrelace, mientras Fitzpatrick and Nowlin (1996), usando la velocidad de los vehículos en la sección como medida de efectividad, determinaron que secciones con longitud menor a 656 pies comienzan a colapsar con bajos volúmenes de tráfico en contraste con secciones de longitud sobre 656 pies. Cassidy *et al.* (1989) compararon ocho secciones de entrelace encontrando diferencias significativas en velocidad promedio de los vehículos que entran a la autopista con respecto de los que salen de ella. Un importante resultado encontrado fue que la velocidad resultó ser insensible con respecto a cambios en la geometría y a factores de tráfico. En otro estudio, Fazio y Roushail (1986) presentaron una revisión de tres procedimientos para analizar secciones de entrelace (Leisch, 1979, 1983; Reilly *et al.*, 1984 y *HCM*, 1985); concluyendo que el número de pistas requeridos por los conductores en las secciones de entrelace afecta la velocidad de los vehículos que entran y salen de la autopista y, que la inclusión del cambio de pista como una variable independiente en el cálculo de la velocidad de los vehículos en la sección mejora significativamente la capacidad de predecir dicha variable.

A pesar de aceptarse que la seguridad en adición a la capacidad, velocidad y flexibilidad en la operación de los vehículos, así como los costos involucrados y el nivel de servicio constituyen un criterio fundamental de diseño, relativamente pocos estudios se han centrado en analizar la relación entre las características de las secciones de entrelace y la seguridad de tránsito. Utilizando datos recopilados en los años 60, Cirillo (1970) estudió los accidentes ocurridos en 700 secciones de entrelace en 20 estados de Estados Unidos. El autor encontró que mientras más cortas son las pistas de aceleración y deceleración, mayor es la tasa de accidentes para el total de tráfico en la sección. El efecto de incrementar la longitud de la pista de acceso parece ser beneficioso cuando el porcentaje de tráfico que ingresa a la autopista es mayor que el 6% del total de flujo en la sección. Los resultados fueron similares para las pistas de salida, pero el beneficio debido al aumento en la longitud de la pista de salida no fue tan significativo como el obtenido para las pistas de acceso. Fazio *et al.* (1993) proponen utilizar las tasas de conflicto en vez de las tasas de accidentes en la sección como indicador de la seguridad en la sección de autopista. Estos autores analizaron dos tipos de conflictos en secciones de entrelace: choque por atrás y por cambio de pista y sus posibles interacciones. Utilizando el software de simulación INTRAS, se analizaron 10 secciones en la autopista interestatal 294 en el área metropolitana de Chicago, generando los tipos de conflictos mencionados anteriormente. Los resultados mostraron una relación positiva entre las tasas de conflicto y tasas de accidentes para secciones de entrelace de

moderada longitud. Además, se encontró que las tasas de conflicto se estabilizan en secciones de entrelace con longitudes mayores a 750 pies. Se concluyó finalmente que los conflictos no debieran ser asociados con los accidentes para ser un buen indicador de seguridad, puesto que las tasas de conflicto tienen mayor ventaja que las de accidentes, ya que por ejemplo, no todos los accidentes son reportados o bien, la ubicación exacta y tiempo de ocurrencia puede no ser representativo.

Glad (2001) estudió accidentes ocurridos en una sección de entrelace particular, por tipo de colisión y severidad desde 1994 hasta 1996, encontrando que el tipo de accidente predominante durante horas punta fue del tipo choque por atrás a baja velocidad aguas arriba de la sección de entrelace, mientras que en períodos fuera de punta, la incidencia de accidentes de tipo lateral y por atrás aumenta considerablemente. Por otra parte, el análisis demostró que la mayoría de los incidentes ocurrieron en la pista de la derecha de la sección con la severidad como función de la velocidad. Usando el HCM (TRB, 1997) y el modelo de simulación de tráfico ITRAF, cuatro alternativas de diseño fueron simuladas de manera de estimar el impacto de nuevos diseños en la seguridad de una sección de entrelace particular. Finalmente el estudio recomendó necesario analizar los impactos de seguridad en secciones de entrelace.

2. RECOLGIDA DE DATOS

2.1. Secciones de Entrelace en Cinco Autopistas del Condado de Orange, California, Estados Unidos

Se identificaron todas las secciones de entrelace en cinco autopistas del condado de Orange, California, la cual representa un área urbana de grandes dimensiones ubicada geográficamente entre las ciudades de Los Angeles y San Diego. La longitud total de ruta es 223 millas, con 55 secciones de entrelace, cubriendo una longitud total de 22,9 millas, lo que corresponde a aproximadamente un 10,3 % del total de largo de ruta. La distribución de secciones de entrelace por tipo es presentada en Tabla 1. Ocho de esas 55 secciones corresponden a tipos compuestos provenientes del traslapo de dos secciones básicas cualesquiera, pudiendo ser ya sea de tipo A, B o C. En lo que sigue, no se pondrá hincapié en la configuración específica de la sección compuesta a partir de secciones básicas. Cada sección de entrelace es definida desde el inicio de la pista de entrada hasta el final de la pista de salida.

2.2. Accidentes y Bases de Datos Disponibles

La información de accidentes fue recopilada a partir de la base de datos TASAS (Traffic Accident Surveillance and Analysis System), (Caltrans, 1998). TASAS cubre información policial de accidentes que ocurren en el Sistema de Autopistas de California. En 1998, 7400 accidentes fueron reportados en TASAS para las cinco autopistas estudiadas. De ellos, 829 se produjeron en alguna de las 55 secciones de entrelace. El porcentaje de accidentes que ocurre en la sección es comparable con el porcentaje de longitud de autopistas dentro de las secciones de entrelace (10,3%). Uno de los objetivos de este estudio es determinar como los accidentes en secciones de entrelace difieren de los accidentes ocurridos en secciones centrales de las autopistas y como el tipo de accidente se relaciona con el tipo de sección de entrelace. La base de datos

TASAS contiene información de las características de cada colisión, incluyendo: (a) número de vehículos involucrados, (b) movimiento de cada vehículo antes de la colisión, (c) ubicación del accidente, (d) los objetos golpeados por cada vehículo y (e) la severidad del accidente representada por el número de personas u objetos dañados en el accidente. La base de datos también incluye información del clima, las condiciones del camino, la iluminación ambiente y la estimación de promedio anual de vehículos diarios (AADT) pasando por todas las secciones de entrelace. El AADT estimado para 1998 fue utilizado para generar el promedio anual de vehículos milla diarios en cada una de las 55 secciones en estudio.

La distribución por sección de entrelace y el número de accidentes que ocurren dentro de cada área durante 1998 es reportada en Golob, Recker y Álvarez (2003). El promedio de la tasa de accidentes por vehículo milla varía bastante entre los 6 tipos de secciones de entrelace, pero estas diferencias no son estadísticamente distintas debido a la alta varianza entre secciones del mismo tipo. Similarmente, no se observa diferencia significativa en la tasa de accidentes entre los tres principales tipos de secciones de entrelace (tipos A, B, y C).

Tabla 1
Datos de 55 Secciones de Entrelace en Cinco Autopistas del Condado de Orange, CA.

Tipos de secciones de entrelace	Número total de secciones	Longitud media en millas	Distribución por autopistas				
			I-5	SR-22	SR-55	SR-57	I-405
A	21	0.36	9	3	2	4	3
B	19	0.37	5	4	4	2	4
C	7	0.41	1	1	2	2	1
AB	1	0.72			1		
AC	3	0.59	2		1		
BC	4	0.74		1	3		
Total	55		17	9	13	8	8

3. PERFILES DE SEGURIDAD DE TRAFICO PARA DIFERENTES TIPOS DE SECCIONES DE ENTRELACE

3.1 Tipos de Accidentes

Con el objeto de hacer una clasificación del tipo de colisión, se construyó una variable compuesta basada en el movimiento de los vehículos involucrados en un accidente, así como también en el tipo de accidente en sí. Las categorías son 1) choques por atrás, definidos como aquellas colisiones en los cuales los vehículos involucrados en el accidente viajaban por la misma pista. 2) accidentes causados por cambio de pista, definidos ya sea choque por atrás o por el costado en los cuales al menos uno de los vehículos envueltos en la colisión estaba ejecutando un cambio de pista al momento del accidente y 3) accidentes causados al golpear objetos, considerando todo accidente distinto de aquellos descritos en las dos categorías anteriores, la mayoría de los cuales en donde un vehículo choca un objeto fijo, usualmente fuera del camino.

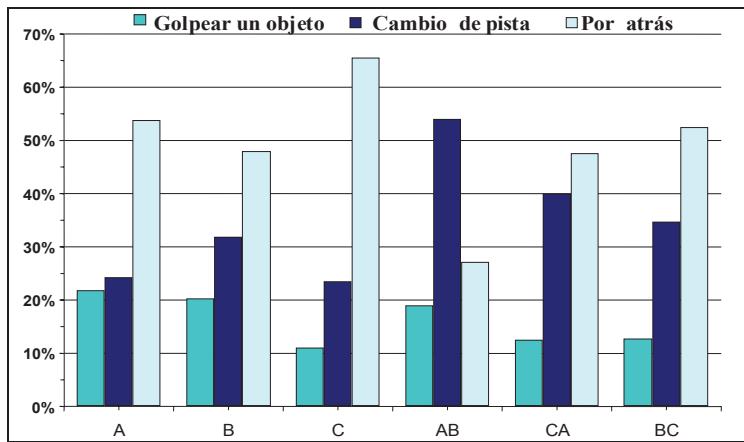


Figura 2: Tipos de Accidentes en Seis Tipos de Secciones de Entrelace

De este análisis, se encontró una diferencia estadísticamente significativa entre el tipo de accidente y el tipo de sección de entrelace ($p < .0005$). Mientras los choques por atrás tienen la probabilidad más alta de ocurrencia en todo tipo de sección, los accidentes provocados por cambio de pista tienen una alta probabilidad de ocurrencia para los tres tipos de secciones de entrelace compuestas, en particular el tipo AB (Figura 2). En contraste, el comportamiento en secciones del tipo C se asemeja bastante a lo que pasa fuera de las secciones de entrelace, con relación al relativo bajo número de accidentes provocados por golpear objetos y a la preponderancia de choques por atrás. De los tres tipos de secciones de entrelace, el tipo B tiene la más alta proporción de accidentes provocados por cambio de pista.

Similares diferencias en tipo de accidente se reflejan en la relación entre tipo de sección de entrelace y movimiento realizado por los vehículos antes de producirse el accidente. Los accidentes que ocurren en secciones compuestas tipo AB tienen una mayor probabilidad de que el primer vehículo realice un cambio de pista previo al accidente (18,2% versus no más que un 10,3% para otros tipos de secciones), mientras que accidentes en secciones del tipo C tienen una mayor probabilidad de involucrar vehículos que deceleran o paran (53,4% versus un promedio de 44,1% sobre todos los tipos de accidentes). Accidentes ocurridos en secciones del tipo C parecen estar más relacionados con el fenómeno de congestión.

3.2. Período de Ocurrencia de Accidentes

La asociación de accidentes en secciones de tipo C con el fenómeno de congestión se puede apreciar también en la fuerte relación entre el tipo de sección y el hecho que los accidentes ocurran o no en períodos de horas punta (definidas de Lunes a Viernes, entre 6:00 AM - 9:00 AM y entre 3:30 PM-6:30 PM) como se detalla en Golob, Recker y Álvarez (2003). Accidentes en secciones tipo C y también en tipos CA y BC tienen una alta probabilidad de ocurrencia durante horas punta ($p = 0.23$). Accidentes en secciones de tipos A y B presentan una tasa similar de ocurrencia de aproximadamente un 32% durante las horas punta (Figura 3), mientras que alrededor de la mitad de los accidentes ocurridos en secciones tipo C sucede durante horas punta. Este resultado es intuitivo ya que secciones de entrelace tipo C se distinguen de las otras en las maniobras de entrada o salida de la autopista, las que requieren dos o más cambios de pista. Esta

última característica tiene consecuencias negativas en la seguridad durante períodos de altos niveles de flujo.

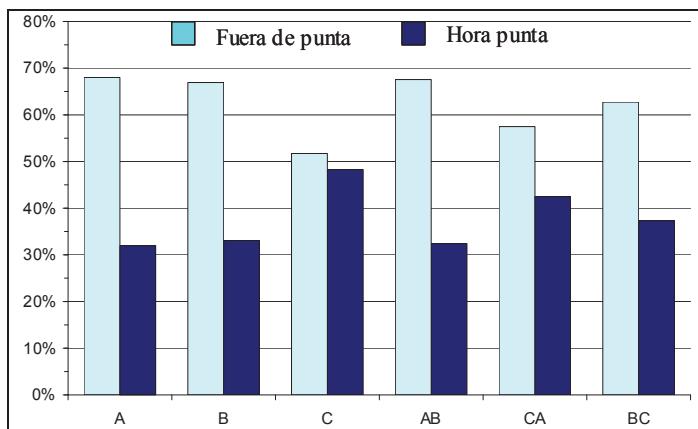


Figura 3: Período de Ocurrencia de Accidentes en Seis Tipos de Secciones de Entrelace

3.3. Condiciones del Camino al Momento del Accidente

Se encontraron diferencias entre tipos de secciones de entrelace en términos de los accidentes asociados y las condiciones del tiempo ($p = .002$). Accidentes que ocurren durante períodos de lluvia son más frecuentes en secciones tipo CA y AB, mientras que accidentes en camino seco prevalecen en secciones tipo BC y C (Golob, Recker y Alvarez, 2003). Al parecer las secciones de tipo AB y CA exhiben una composición de efectos evidenciada en las componentes básicas que las conforman. Estas secciones compuestas requieren múltiples cambios de pista por parte de las dos corrientes de tráfico (entrada y salida), resultando en maniobras más peligrosas durante períodos de lluvia incrementando por ende la probabilidad de que ocurra un accidente. En el caso de la sección compuesta tipo BC el resultado no es tan significativo, ya que la operación requiere múltiples cambios de pista pero sólo para una de las corrientes de tráfico (ya sea entrada o bien salida, pero no ambas).

3.4. Modelo Probit Multivariado de las Características de los Accidentes en Secciones de Entrelace

El análisis de características de los accidentes presentado anteriormente puede resultar incompleto al identificar importantes combinaciones de accidentes, debido a que muchas de estas características están correlacionadas. Para entender la clasificación de accidentes en secciones de entrelace, se utilizó un modelo probit multivariado (MPM) con el objeto de cubrir las relaciones condicionales y determinar cuales características son relevantes al momento de explicar la ocurrencia de accidentes. Un MPM tiene múltiples variables discretas dependientes y un conjunto común de variables independientes. MPM asume que existe un conjunto T de variables latentes definidas por la siguiente relación:

$$y_{it}^* = \beta_t' x_{it} + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

donde el vector k -dimensional x_{it} representa $i = 1, \dots, N$ observaciones con K variables exógenas por cada una de las $t = 1, \dots, T$ variables endógenas con error ε_{it} . Estas variables latentes no son observables, pero están relacionadas con las variables discretas de acuerdo a

$$\begin{aligned} y_{it} &= 1 && \text{si } y_{it}^* > 0 \\ y_{it} &= 0 && \text{en caso contrario} \end{aligned} \quad (2)$$

El error ε_{it} se asume T -variado y normalmente distribuido con una matriz de varianza-covarianza Ψ definida positiva ($T \times T$). Los parámetros a ser estimados son los elementos de β_t y Ψ . En este caso, existen $T = 3$ variables endógenas representando los tipos de secciones de entrelace A, B y C. El modelo MPM maneja los tipos compuestos AC, BC y AB elegantemente dado que ellos son combinaciones simples de las tres variables discretas que representan las secciones de entrelace. Por lo tanto, se tiene $N = 829$ observaciones, que equivalen a todos los accidentes ocurridos en todos los tipos de secciones de entrelace, incluyendo los tipos compuestos. Para observaciones (accidentes) que ocurren en cualquiera de los tipos compuestos AB, CA o BC, dos (en vez de una) variables discretas son estimadas. Para cada accidente, se tiene que $K = 12$ variables exógenas. Una de las variables independientes representan características de los accidentes consideradas importantes en el análisis univariado. Finalmente, la ultima variable independiente corresponde a vehículos milla diarios (DVMT), la que puede ser utilizada para calcular el número de vehículos que pasan diariamente por las secciones estudiadas. Estas variables son listadas en Tabla 2.

Se estimó el modelo MPM usando un enfoque basado en un modelo de ecuaciones estructurales SEM, (ver Golob, 2003). El SEM es estimado usando el método conocido en la literatura como “asymptotically distribution free, weighted least squares (ADF-WLS)”, descrito por Golob y Hensher (1998) y van Wissen y Golob (1990). Este método ha mostrado obtener estimaciones consistentes las que son asintóticamente eficientes con covarianzas asintóticamente correctas. El estimador chi-cuadrado computado de la función ajustada debiera producir un test de ajuste del modelo global asintóticamente correcto también, asumiendo un tamaño muestral suficientemente grande al ser comparado con el alcance del problema.

El enfoque dado al modelo MPM a través del uso de ecuaciones estructurales (SEM) puede encontrarse en Muthén (1979, 1983) y Amemiya (1978). MPM pueden ser también estimadas usando métodos de simulación, los que evitan la evaluación de integrales múltiples en la estimación de máxima verosimilitud (McFadden y Ruud, 1994) aunque su actual estado de desarrollo ha estado sujeto a numerosas dificultades computacionales para encontrar la solución optima en casos complejos. El rendimiento de estos algoritmos debiera mejorar en el futuro con la experiencia que aporten tanto investigadores como usuarios.

Todos los MPM requieren un tamaño de muestra relativamente grande; ambos métodos MPM estructural y máxima verosimilitud simulado se basan en la teoría asintótica y a la fecha se desconoce si los supuestos pueden mantenerse con tamaños de muestra reales. Los problemas con el tamaño muestral pueden manifestarse en inferencia sesgada debido a pobres estimaciones de los parámetros de varianza-covarianza. Una regla a seguir, es que el número de observaciones debe ser mayor que $1.5 * k(k + 1)$, donde k es el número total de variables (Jöreskog y Sörbom, 1993). En este caso la regla se cumple, dado que se cuenta con 829 observaciones y trece

variables (tres dependientes y diez independientes). Aunque este estudio no satisface los requerimientos de tamaño minino recomendado de muestra, el cual debería ser de al menos 1000 observaciones para la estimación ADF-WLS (Hoogland y Boomsma, 1998), nuestro modelo final, el cual contiene 20 parámetros libres, si reúne el criterio de que el tamaño de muestra para la ecuación estructural con data no normal debiera ser al menos diez veces el número de parámetros libres (Boomsma and Hoogland, 2001).

4. RESULTADOS

El valor resultante de la variable chi-cuadrado (bondad de la estimación) fue 21.51 con 16 grados de libertad, lo que corresponde a $p = 0.16$. Chi-cuadrado mide la diferencia entre la matriz de varianza-covarianza observada y la generada por el modelo. El nivel de significancia indica la probabilidad de que la diferencia de las dos matrices sea debida a una variación en la muestra. Así, el objetivo es obtener un valor de chi-cuadrado con $p > 0.05$ (95% nivel de confianza). El modelo entonces, no puede ser rechazado como una representación precisa de la relación entre el tipo de secciones de entrelace y las características de los accidentes producidos en ellas. De él se obtuvieron muy buenos índices de bondad de ajuste chi-cuadrado, los cuales difieren en términos de normalización usada para incorporar los efectos del tamaño muestral y de la parsimonia del modelo en bondad de ajuste (Golob, 2003). El Criterio de Información de Akaike (AIC; Akaike, 1974) o el Criterio de Información Consistente de Akaike ((CAIC; Bozdogen, 1987) pueden ser utilizados para comparar la bondad de ajuste versus el número de parámetros libres (parsimonia) de los diferentes modelos. El modelo que produce el menor valor para cada uno de los criterios anteriormente nombrados es considerado el mejor. El AIC y el CAIC para nuestro modelo tienen el valor de 229,51 y 824,42 respectivamente. El AIC y CAIC para un MPM con solo tres variables independientes -- DVMT para cada tipo – tienen un valor de 404,66 y 902,32. El AIC y el CAIC para un modelo saturado en el cual el efecto de la regresión esta presente, incluso para coeficientes no significativos al 95% de confianza, son 240.00 y 926.43. Basándose en este criterio, nuestro modelo se comporta muy bien para ambos, el más parsimonioso de los modelos sin efectos del tipo de accidente y para el modelo saturado.

Los coeficientes estimados de la regresión se presentan en Tabla 2. Estos coeficientes pueden ser directamente comparados dado que están estandarizados, ya que la estimación realizada usa una matriz de correlación. Estos resultados, los cuáles controlan por exposición de vehículos, se interpretaron de la siguiente forma:

Accidentes en Secciones Tipo A

Accidentes en secciones tipo A tienen una mayor probabilidad de estar localizados en la pista interior de la sección. El accidente tiende a ser menos severo que un accidente en otro tipo de secciones de entrelace y tiene una mayor probabilidad de ocurrencia durante períodos fuera de punta, especialmente al anochecer y durante períodos de lluvia. Accidentes en secciones de entrelace tipo A no están fuertemente relacionados con la variable vehículos-milla de viaje.

Accidentes en Secciones de Entrelace Tipo B

Alternativamente, accidentes ocurridos en secciones tipo B tienen una menor probabilidad de estar ubicados en pistas interiores y una mayor posibilidad de resultar con daños y heridos. Las

maniobras previas al accidente tienen una alta probabilidad de corresponder a algún cambio de pista y con menor probabilidad a ser un choque por atrás involucrando aquellos vehículos que siguen derecho. Las causas más probables de accidente son generalmente distintas a la velocidad en este caso. Accidentes en secciones de entrelace tipo B están fuertemente relacionados con los vehículos-milla de viaje, una simple medida de exposición de vehículos.

Tabla 2
Coeficientes Estimados Modelo Probit Multivariado (z-estadístico en paréntesis)

Variable Independiente	Variable Dependiente		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Ubicación del accidente: pista izquierda			0.046 (2.85)
Ubicación del accidente: pista interior(es)	0.084 (3.36)	-0.117 (-4.73)	
Ubicación del accidente: pista derecha			
Tipo de accidente: entrelace (maniobra de cambio de pista)		0.032 (1.82)	-0.100 (-5.13)
Tipo de accidente: 2-vehículos choque por atrás		-0.047 (-2.33)	
Tipo de accidente: 3-o-más-vehículos choque por atrás		-0.039 (-2.10)	
Exceso de velocidad		-0.068 (-3.35)	
Accidente ocurrido durante horas punta	-0.057 (-2.19)	-0.040 (-1.65)	0.101 (3.84)
Accidente con resultado de muertos o heridos	-0.057 (-2.41)	0.075 (3.05)	
Accidente ocurrido durante períodos de lluvia	0.059 (2.43)	0.047 (1.77)	-0.049 (-2.58)
Accidente ocurrido durante la noche	0.044 (3.23)		
Vehículos milla promedio diarios x 10 ⁶	-0.033 (-1.38)	0.389 (14.40)	0.442 (15.47)

Accidentes en Secciones de Entrelace Tipo C

Finalmente un accidente que ocurre en secciones tipo C tiene una mayor probabilidad de incidencia durante períodos punta y en la pista de más a la izquierda. Los accidentes tienen una menor probabilidad de ocurrir debido a maniobras que involucran cambios de pista así como de ocurrir durante períodos de lluvia. Tal como los accidentes en secciones tipo B, accidentes en secciones de entrelace tipo C están fuertemente relacionados con vehículos-millas de viaje.

5. CONCLUSIONES

La comparación estadística entre accidentes ocurridos en secciones de entrelace versus aquellos ocurridos en las pistas centrales de la autopista, es fundamental para descubrir los factores que

contribuyen a la ocurrencia de accidentes, y que son propios de cada lugar de la vía. Los factores con mayor influencia en el caso de secciones de entrelace, fueron el tipo de movimiento realizado por los vehículos involucrados en el accidente y la ubicación exacta del accidente. Como se esperaba, accidentes por el costado presentan la más alta probabilidad de ocurrencia en las secciones de entrelace, con una mayor tendencia a ocurrir en la pista interior; ubicación que también tiene una alta probabilidad de ocurrencia de accidentes de cualquier tipo dentro de todas las secciones de entrelace.

La mejor manera de cuantificar las características más importantes de los accidentes que ocurren en las secciones de entrelace fue utilizando un modelo multivariado incorporando las características de los accidentes ocurridos en secciones de entrelace tipo A, B, C y sus combinaciones. Usando once variables independientes representando las características más importantes de los accidentes según el análisis bivariado, el modelo multivariado reveló diferentes patrones en las características de los accidentes. Una doceava variable independiente fue utilizada para controlar por diferencias en exposición de vehículos entre secciones de entrelace. Dado que en la modelación se definieron explícitamente los tipos de secciones de entrelace compuestas (tipos AC, BC y BA), el análisis multivariado minimiza los problemas asociados con el relativamente bajo número de secciones compuestas

Los resultados indican que la seguridad en secciones tipo A, donde cada vehículo que entra o sale de la autopista debe ejecutar un cambio de pista, está comprometida con los conflictos vehiculares que concurren en las pistas interiores. Estos conflictos prevalecen en períodos fuera de punta, especialmente durante la noche y en períodos de lluvia. Aunque no se encontró ningún tipo de colisión predominante, las secciones de entrelace tipo A parecen ser las más seguras entre los tres tipos de secciones de entrelace. Usando estos resultados, los ingenieros de tráfico podrían implementar mejoras en este tipo de secciones, tales como las relacionadas con señalética, condiciones de luz y/o mejoras en el pavimento de manera de que la superficie presente una mejor fricción durante la lluvia, etc. La seguridad en secciones de entrelace tipo B, donde uno de los movimientos de entrada o salida puede ser ejecutado sin cambiar de pista, mientras que el otro movimiento debe al menos cambiar una pista, está comprometida por conflictos que involucran vehículos que cambian pista, predominantemente en cualquiera de las pistas, ya sea derecha o izquierda. Estos accidentes tienen una mayor probabilidad de ser más severos que en secciones A o C. Ostensiblemente los resultados indican que la causa de estos accidentes tiene raíz en la diferencia entre la velocidad de los vehículos que cambian de pista y los que siguen derecho o no necesitan cambiar de pista. En tales casos, se recomienda imponer restricciones especiales a la velocidad de circulación.

Finalmente, la seguridad en secciones de entrelace tipo C, donde un movimiento (entrada o salida) puede ser realizado sin cambiar de pista, mientras el otro requiere al menos dos cambios de pista, está comprometida con los conflictos vehiculares que tienden a ocurrir en la pista izquierda durante horas punta. Dada la complejidad de movimientos que se producen en este tipo de sección especialmente durante horas punta, no es simple realizar una recomendación práctica relacionada con los accidentes que aquí ocurren.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada en parte por "The California Partners for Advanced Transit and Highways (PATH)" y "The California Department of Transportation (Caltrans)". Los autores agradecen en forma muy especial la colaboración y comentarios de Cristián Cortés C. en la elaboración de este manuscrito.

REFERENCIAS

- Akaike, H. (1974) A new look at the statistical identification model. **IEEE transactions on Automatic Control** **19**, 716-723.
- Amemiya, T. (1978) The Estimation of a Simultaneous Equation Generalized Probit Model. **Econometrica** **46**, 1193-1205.
- Boomsma, A. and Hoogland, J.J. (2001) The robustness of LISREL modeling revisited. In R. Cudeck, S. du Toit and D. Sörbom (Eds.). **Structural Equation Modeling: Present and Future**, 139-168. Scientific Software International, Chicago.
- Caltrans (1993) **Manual of Traffic Accident Surveillance and Analysis System**. California Department of Transportation, Sacramento, CA.
- Cassidy, M., Skabardonis, A. and May, A.D. (1989) Operation of major freeway weaving sections: recent empirical evidence. **Transportation Research Record**, 1225, 61-72.
- Cirillo, J. A. (1970) The relationship of accidents to length of speed-change lanes and weaving areas on Interstate highways, **Highway Research Record**, 312, 17-32.
- Fazio, J., and Routhail, N.M. (1986) Freeway weaving sections: comparison and refinement of design and operations analysis procedures, **Transportation Research Record**, 1091, 101-109.
- Fazio, J., Holde, J. and Routhail, N.M. (1993) Use of freeway conflict rates as an alternative to crash rates in weaving section safety analysis. **Transportation Research Record** 1401, 61-69.
- Fitzpatrick, K., and Nowlin, L. (1996) One-sided weaving operations on one-way frontage roads. **Transportation Research Record** 1555, 42-49.
- Glad, R.W. (2001) **Weave Analysis and Performance: The Washington State Case Study**. Research Report, Washington State Department of Transportation. Olympia, WA.
- Golob, T.F. (2003) Structural equation modeling for travel behavior research. **Transportation Research - Part B: Methodological**, Vol. 37, 1-25.
- Golob, T.F. and Hensher, D.A. (1998) Greenhouse gas emissions and Australian commuters' attitudes and behaviour concerning abatement policies and personal involvement. **Transportation Research D**, Vol. 3, 1-18.

- Golob, T.F., Recker, W.W. and Alvarez, V.M.. (2003) Safety aspects of freeway weaving sections. **Presented at the 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board**, January 12-16, Washington, DC.
- Hoogland, J.J. and A. Boomsma (1998) Robustness studies in Covariance Structure Modeling: An overview and a meta-analysis. **Sociological Methods and Research 26, 329-3**.
- Jöreskog, K.G. and D. Sörbom (1993) **LISREL 8 User's Reference Guide; PRELIS 2 User's Reference Guide**. Scientific Software International, Chicago.
- Leisch, J. E. (1979). A new technique for design and analysis of weaving sections on freeways, **ITE Journal 49, 26-29**.
- Leisch, J. E. (1983) Completion of procedures for analysis and design of weaving sections, **Final Report, Federal Highway Administration**, Washington, DC.
- McFadden, D.L. and Ruud, P. (1994) Estimation by simulation. **Econometrica Vol. 57, 1027-1057**.
- Moskowitz, K., and L. Newman (1963) Note on freeway capacity. **Highway Research Record, Vol. 27, 44-68**.
- Muthén, B. (1979) A structural probit model with latent variables. **Journal of the American Statistical Association, Vol. 74, 807-811**.
- Muthén, B. (1984) A general structural equation model with dichotomous, ordered categorical and continuous latent variable indicators. **Psychometrika, Vol. 49, 115-132**.
- Pignataro, L. J., *et al.* (1975) **NCHRP Report 159: Weaving Areas-Design and Analysis**. Highway Research Board, National Research Council, Washington.
- Reilly, W., Kell, J. and Johnson, J. (1984) **Weaving Analysis Procedures for the New Highway Capacity Manual**, JHK & Associates, Tucson AZ.
- Steward, J., Baker, M. and Van Aerde, M. (1996) Evaluating weaving section designs using INTEGRATION. **Transportation Research Record 1555, 33-41**.
- TRB (1965) **Highway Capacity Manual**. Special Report 87, Transportation Research Board, National Research Council, Washington.
- TRB (1985) **Highway Capacity Manual**. Special Report 209, Transportation Research Board, National Research Council, Washington.
- TRB (1997) **Highway Capacity Manual**. Special Report 209, Transportation Research Board, National Research Council, Washington.

TRB (2000) **Highway Capacity Manual**. Special Report 209, Transportation Research Board, National Research Council, Washington.

van Wissen, L.J. and Golob, T.F. (1990) Simultaneous equation systems involving binary choice variables. **Geographical Analysis, Vol. 22, 224-243.**