

MODELOS PREDICTIVOS DEL EFECTO DE LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS SOBRE LA SEGURIDAD VIAL EN CARRETERAS CONVENCIONALES

Ignacio Pérez Pérez

Profesor Titular Interino. Universidade da Coruña.

Santiago López Fontán

Profesor Asociado. Universidade da Coruña.

RESUMEN

En esta ponencia se realiza una exposición de algunos modelos multivariantes que permiten predecir la accidentalidad en carreteras rurales de una sola calzada en función de las características siguientes: anchura del carril y del arcén y tipo de arcén; zonas laterales de la carretera; anchura de los puentes; alineaciones curvilíneas y distancia de visibilidad en acuerdos verticales.

1. INTRODUCCIÓN

Pese a que los ingenieros de caminos responsables del perfeccionamiento del diseño geométrico de las carreteras, tanto de las existentes como de las que están por construir, están desde hace bastante tiempo otorgando una paulatina trascendencia a la seguridad de la circulación vial, la necesaria investigación científica y de ingeniería sobre esta materia es contradictoria e insuficiente. Como se sabe, esto se debe a que, además de las características geométricas, existen una variedad de factores que afectan a la seguridad la circulación vial. La presencia de estos factores desfigura el efecto que todo diseño geométrico tiene, sea éste positivo o negativo, en el acaecimiento de los accidentes de tráfico. La mayoría de los accidentes son el resultado la interacción de dichos factores de tal manera que impiden determinar una causa única del accidente. No obstante, debería tenerse en cuenta que, aún en aquellas ocasiones en las que los accidentes fueran susceptibles de ser provocados exclusivamente por algunas de las anomalías imputables a los factores del usuario o del vehículo, siempre el diseño geométrico de la carretera afectaría a la probable ocurrencia y gravedad de los mismos. Esta interacción entre los factores del usuario, de la carretera y del vehículo complica la estimación de la eficacia de las actuaciones específicas de mejora de la seguridad de la circulación vial.

El empleo de modelos multivariantes permite determinar o predecir el efecto de ciertos parámetros, relacionados con los factores mencionados anteriormente, sobre el número de accidentes y el índice de peligrosidad. En esta ponencia se estudiarán algunos modelos multivariantes que relacionan las características físicas de la carretera con la accidentalidad. Mediante los mismos se puede abordar indirectamente la evaluación de la efectividad de las actuaciones de seguridad vial mediante la predicción del número de accidentes. Éstos correlacionan las características geométricas y físicas de la infraestructura con los accidentes a través de la técnica conocida con el nombre de *análisis de regresión*. Este método de análisis

asume básicamente el hecho de que entre los accidentes y las características de la infraestructura existe una relación causa-efecto.

2.1 Sección transversal

2.1.1 Anchura del carril y del arcén, tipo de arcén.

En una carretera después de ejecutarse un ensanchamiento de los carriles y de los arcenes se origina una mejora la seguridad de la circulación vial. Esta mejora se manifiesta principalmente favoreciendo el hecho de que los conductores recuperen el control del vehículo y regresen a la carretera cuando sus vehículos se salen fuera de ésta y, también, aumentando la separación lateral entre los vehículos que efectúan la maniobra de adelantamiento y los vehículos que circulan en sentido opuesto. Este es un factor muy importante en los accidentes con colisiones frontolaterales y frontales. En las carreteras convencionales, no existe en la literatura científica internacional un único modelo que relacione los accidentes de tráfico, de una forma clara y consistente, con las características de la sección transversal. La Federal Highway Administration ha estudiado el efecto que sobre la seguridad vial tiene el ancho del carriles y arcenes, el tipo de arcén y, también, otras variables (zonas de recuperación, terreno e intensidad de tráfico). Con este fin dicha administración presentó un modelo que solamente cubre los accidentes de un solo vehículo con salida de la carretera, los que se producen mediante choques frontales entre vehículos y también mediante choques frontolaterales (Zegeer, C.V. et al, 1987):

$$A = 0,0019 \text{ IMD}^{0,882} 0,879^W 0,919^{PA} 0,932^{UP} 1,236^H 0,882^{TER1} 1,322^{TER2} \quad (1)$$

donde:

A = Número de accidentes de los tipos, salida de la carretera, colisión frontal, colisión frontolateral en direcciones opuestas, colisión frontolateral en la misma dirección por milla por año.

IMD = Intensidad media diaria de los dos carriles.

W = Anchura del carril en pies.

PA = Anchura del arcén pavimentado en pies.

H = Índice de peligrosidad promedio en las zonas laterales de la carretera en el segmento de carretera, valorado subjetivamente sobre una escala de 1 (menos peligroso) a 7 (más peligroso).

TER1 = 1 para terreno llano, 0 en otros casos.

TER2 = 1 para terrenos montañosos, 0 en otros casos.

Otro modelo de accidentes que se puede encontrar en la literatura científica es el siguiente (Zeeger y Deacon, 1987):

$$AR = 4,1501 (0,8807)^L (0,9562)^S (1,0026)^{LS} (0,9403)^P (1,0040)^{LP} \quad (2)$$

donde:

AR = Número de accidentes con salida de la carretera y con choques frontales y

frontolaterales por millón de vehículos-millas.

L = Anchura del carril en pies.

S = Ancho del arcén en pies (incluyendo la parte pavimentada y sin pavimentar).

P = Ancho en pies de la parte pavimentada del arcén ($0 \leq P \leq S$: $P=0$ para arcenes sin pavimentar y $P=S$ para arcenes completamente pavimentados).

Los límites de aplicación de estos modelos de accidentes son los siguientes: Ancho de los carriles entre 7 y 12 pies y anchuras de los arcenes entre 0 a 10 pies; carreteras rurales de dos carriles y dos direcciones, una por cada carril y que además estén pavimentadas y, por último, secciones de carreteras homogéneas, lo cual quiere decir que no incluye los accidentes que se producen en las intersecciones.

Obsérvese que a diferencia de la ecuación nº 1 el último modelo de accidentes predice el índice de peligrosidad en vez del número de accidentes registrados. Según ambos modelos, el ensanchamiento de los arcenes resulta ser una actuación de mejora de la seguridad de la circulación vial menos efectiva que el ensanchamiento de los carriles. Además, la efectividad óptima se obtiene al combinar ambas actuaciones. Hay que tener en cuenta que cuando dos características se mejoran al mismo tiempo, la reducción del número de accidentes producida como consecuencia de la mejora de una sola de las características será menor.

2.1.2 Zonas laterales de la carretera y taludes.

Las intromisiones de los vehículos en los márgenes laterales de la carretera se originan cuando inadvertidamente éstos dejan su trayectoria normal a lo largo de los carriles desviándose hacia los bordes de la carretera. En la mayoría de los casos estas intromisiones no suelen tener consecuencias graves. Esto se debe a que el conductor recupera el control de su vehículo cuando éste se encuentra sobre el arcén y, por lo tanto, retorna de forma segura a los carriles de la calzada. Sin embargo, cuando cerca de los márgenes existe algún tipo de objeto peligroso (árboles, postes, taludes muy inclinados, etc.) estas intrusiones provocan accidentes. Esta tipología de accidentes de circulación vial está relacionada con la siniestralidad en las carreteras convencionales en campo abierto. Es por ello que, se han desarrollado actuaciones en los márgenes de la carretera. Entre estas actuaciones cabe citar el desarrollo de barreras y vallas de seguridad con el objetivo de contener y desviar el vehículo que golpea la barrera obligándole a adoptar una trayectoria sensiblemente paralela a la dirección de la misma y la instalación de los soportes de la señalización e iluminación con materiales que se rompen fácilmente con el impacto, de tal manera que causan poco daño tanto al vehículo que ha chocado como a sus ocupantes.

Además de estas actuaciones el diseño convencional de las carreteras puede proporcionar estas otras: a) Áreas despejadas de obstáculos en las que los conductores que han perdido el control de su vehículo saliéndose de la calzada, recuperen dicho control regresando a la calzada, b) Taludes tendidos tanto en desmontes como en terraplenes (con poca inclinación).

Como se decía anteriormente, la irrupción de un vehículo fuera de control en el borde lateral de una carretera no significa que inevitablemente se vaya a producir un accidente. A pesar de

que siempre existe este peligro, en aquellas ocasiones en que el borde de la carretera esté razonablemente parejo, llano y, además, esté despejado de objetos fijos, la probabilidad de un retorno del vehículo a la calzada será alta. Como es lógico, la oportunidad de que se produzca la recuperación del vehículo disminuye cuando el talud de la carretera está muy inclinado. Con el objeto de examinar los efectos que las características específicas de las zonas laterales de las carreteras producen sobre la seguridad de la circulación vial se han empleado diversos modelos de intrusión. Estos modelos tienen en cuenta el tamaño y la forma de la característica lateral de la carretera que se quiere investigar, la distancia a la misma medida desde el borde del carril y la probabilidad de que la colisión con dicha característica lateral resulte en un accidente. Conceptualmente, estos modelos de intrusión lateral capturan la secuencia de acontecimientos que culminan en un accidente ubicado en un margen de la carretera. Dicha secuencia de acontecimientos se describen de la manera siguiente: 1° Un vehículo que está sin control abandona los carriles e invade los márgenes de la carretera; 2° la disposición de esta intrusión es tal que la trayectoria del vehículo va dirigida hacia un objeto potencialmente peligroso o en dirección a un talud muy inclinado. Es decir, existe un elemento peligroso situado en el margen de la carretera; 3° debido a que dicho objeto está próximo al carril de la calzada, el conductor es incapaz de recuperar el control y de evitar la colisión y 4° las consecuencias de la colisión son importantes y, por lo tanto, ocasionan un accidente de circulación vial.

Se da por buena la hipótesis basada en el hecho de que cuando se pierde el dominio de un vehículo, éste podría invadir tanto el carril adyacente del sentido contrario – es decir, hacia la izquierda- como encaminarse en dirección al arcén contiguo -, o sea, hacia la derecha. Además, se asume que la probabilidad de ocurrencia (en caso de perder el dominio) será la misma para los dos sentidos de circulación. Cuando los movimientos se dirigen hacia la derecha, una irrupción desde el carril siempre resulta en una intrusión en la zona lateral de la carretera. Cuando un vehículo sin control gira hacia la izquierda existe la probabilidad de que no recupere con seguridad su trayectoria antes de alcanzar la zona lateral. Por consiguiente, para este último movimiento se asume que no siempre se originan intrusiones en los márgenes de la carretera.

Por otro lado, dada una intrusión en el área de potencial impacto, se asume la hipótesis de que la trayectoria del vehículo se lleva a cabo a lo largo de una línea recta de longitud x . La probabilidad de que el parachoques delantero del vehículo (si no hay ni una colisión previa ni un vuelco ni, tampoco, se recupera el control) pasará de una distancia lateral, y , medida desde el borde del carril está dada en función de una distribución exponencial. De esta manera, en el modelo final el número anual esperado de accidentes vinculados con un elemento peligroso (h) situado en un margen de la carretera $Ex(A_h)$, viene dado por la ecuación siguiente (Transportation Research Board, 1987):

$$Ex(A_h) = \frac{0,07285(IMD)^{0.5935}}{21,120} \Pr(A_h \setminus C_h) \left[\sum_1^8 x_i e^{-0,08224y} + \sum_1^8 x_j e^{-0,08224y} \right] \quad (3)$$

donde:

- x_i, x_j = Distancias en pies a lo largo de la carretera, dentro de la cual cuando una intrusión continúa hacia delante se producirá una colisión con el objeto peligroso.
- y_i, y_j = Distancias laterales medidas desde el borde del carril.
- IMD = Intensidad media diaria.
- $P(A_h|C_h)$ = Probabilidad condicionada de que, dada una colisión, ésta tendrá suficiente gravedad como para provocar un accidente.

2.1.3 Anchura de los puentes.

Como es sabido, en aquellos emplazamientos donde el tablero de un puente es más estrecho que la sección transversal de la carretera se crea una constricción en la capacidad de la circulación vial. Esta reducción de la capacidad está directamente relacionada con la reducción de la probabilidad de recuperación del dominio del vehículo cuando está sin control y, también, con el incremento de la posibilidad de que se produzcan colisiones entre vehículos. En este sentido, diversas investigaciones han revelado que en los puentes el principal factor que afecta a la seguridad de la circulación vial es la anchura de los mismos.

Por otra parte, se define la *anchura relativa de un puente* como la diferencia entre el ancho del puente (incluyendo los dos carriles y los dos arceles) y el ancho de los dos carriles de la carretera que accede al puente. La *anchura relativa de un puente* es mejor indicador de la peligrosidad que el ancho del puente en sí mismo. En un puente el índice de peligrosidad (expresado en términos del número total de accidentes por millón de vehículos) disminuye cuando este indicador aumenta. En carreteras de dos carriles y una sola calzada entre el índice de peligrosidad y la anchura relativa del puente se ha establecido la relación cuantitativa siguiente (Mak, K.K.):

$$AR = 0.50 - 0.061 (RW) + 0.0022 (RW)^2 \quad (4)$$

donde:

AR = Índice de peligrosidad en número de accidentes por millón de vehículos.

RW = Anchura relativa del puente en pies.

Esta última relación predice que un incremento en la *anchura relativa de un puente* desde un valor de 0 pies hasta otro de 4 pies produce alrededor de un 40% de disminución en el índice de peligrosidad. Además, el primer pie de ensanchamiento produce un tercio de esta reducción. La ecuación anterior no es aplicable cuando el ancho de los carriles de acceso es superior a la anchura del puente. Esto es así porque la constricción producida por la disminución del ancho de los carriles en el puente provoca un aumento muy considerable del índice de peligrosidad. Tampoco se puede aplicar cuando la anchura relativa del puente sea mayor de 14 pies. Otros factores que también afectan a la seguridad de la circulación vial de los puentes son los siguientes: La longitud y el tipo de puente, la presencia o ausencia de bordillos, alineación de los accesos y la condición de la superficie del pavimento.

Estos factores no figuran en la ecuación anterior debido a la carencia de información significativa sobre el efecto que producen en la seguridad de la circulación vial. Asimismo, tampoco existen datos concluyentes sobre la consecuencia que tiene sobre la gravedad de los

accidentes la importancia de la constricción del puente. Por último, hay que tener en cuenta que la seguridad de los puentes estrechos también se puede mejorar mediante la utilización de barreras de seguridad, señales de advertencia, etc.

2.2 Alineaciones curvilíneas horizontales.

En este tipo de emplazamientos la seguridad de la circulación no está influenciada solamente por las características geométricas y físicas de la curva en si misma, sino que también se ve afectada por las singularidades de los dos tramos de la carretera que son adyacentes a la curva en cuestión. Los investigadores tradicionalmente se han concentrado en el grado de curvatura con la finalidad de cuantificar los efectos producidos en el índice de peligrosidad como una consecuencia de la modificación de las características geométricas específicas de las alineaciones curvas. Sin embargo, debido a las diferentes técnicas empleadas tanto en la estimación de la intensidad de tráfico como en la identificación de los accidentes vinculados con las alineaciones curvilíneas, estas investigaciones han diferido considerablemente en las predicciones del índice de peligrosidad realizada en función del grado de curvatura. En este sentido, Glennon et al (1983) realizaron un estudio para la **FHWA** donde se investigó la relación existente entre el grado de curvatura y la accidentalidad de estas alineaciones. Dicho estudio se llevó a cabo en tramos de carretera de una sola calzada en campo abierto conteniendo una curva horizontal. En primer lugar, se realizó un diseño experimental que permitió crear una base de datos que incluía la información siguiente: datos de los accidentes, datos geométricos y, por último, datos del tráfico. Los emplazamientos de las carreteras pertenecientes a esta base de datos tenían una longitud de 0.61 millas. Esta longitud era mayor cuando era necesario asegurar a cada lado de una curva horizontal una alineación recta de 650 pies de longitud. A partir de toda esta información, Glennon et al (1983) estimaron que al modificar el grado de curvatura en 1° se obtenía una reducción de 0,0336 accidentes por millón de vehículos:

$$A_c = AR_s (L_c)(V) + 0,0036(D)(V) \quad (5)$$

donde:

- A_c = Número de accidentes acaecidos en la alineación curvilínea.
- AR_s = Índice de peligrosidad promedio en la alineación rectilínea.
- L_c = Longitud de la alineación curvilínea circular en millas.
- V = Intensidad de tráfico en millones de vehículos.

Como se observa, la ecuación anterior está conformada por dos partes integrantes: Por un lado, se representa el efecto de giro de naturaleza continuada que se produce en la curva en si misma, y, es directamente proporcional a los vehículos millas recorridos en la curva pero no depende del grado de curvatura. Por otro lado, se relacionan los efectos producidos en las transiciones de entrada y de salida de la curva, y, es directamente proporcional al grado de curvatura así como a la intensidad de tráfico. En este modelo el valor numérico del índice de peligrosidad en alineaciones rectas (AR_s) es igual a 0,902. Cuando sea posible, el valor de

$AR_s=0,902$ debe ser reemplazado por un índice de peligrosidad en tramos en línea recta que sea representativo de las condiciones locales de la carretera bajo consideración.

2.3 Distancia de visibilidad en acuerdos verticales

Cuando en los acuerdos verticales existe una distancia de visibilidad restringida, basándose primordialmente en el criterio profesional, Newman y Glennon (1983) han desarrollado un modelo teórico que predice la frecuencia de accidentes. Aunque el modelo no ha sido contrastado con datos reales de accidentes, éste proporciona una primera aproximación de los beneficios esperables de la mejora de las condiciones geométricas del alzado en los acuerdos verticales. Este modelo de predicción de los accidentes de circulación vial se expresa de la forma siguiente (Newman y Glennon, 1983):

$$N_c = AR_h (L_{vc})(V) + AR_h (L_r)(V)(F_{ar}) \quad (6)$$

donde:

- N = Número de accidentes acaecidos en un tramo de carretera que contiene un acuerdo vertical.
- AR_h = Índice de peligrosidad promedio para la carretera específica en accidentes por millón de vehículos-millas.
- L_{vc} = Longitud del acuerdo vertical en millas.
- V = Intensidad de tráfico en millones de vehículos en el tramo de carretera.
- L_r = Longitud de la distancia de visibilidad restringida en millas (longitud de la distancia de visibilidad menor o igual que el valor especificado por la **AASHTO**).
- F_{ar} = Factor hipotético del índice de peligrosidad que varía de acuerdo a la naturaleza de la restricción a la visibilidad y a la naturaleza de la peligrosidad escondida.

El índice de peligrosidad promedio (AR_h) se toma en base a los datos recopilados de una longitud de carreteras considerable. En este sentido, Newman y Glennon (1983) indican las condiciones promedio de las carreteras de una sola calzada mediante un índice de 2,4 accidentes por millón de vehículos-millas. Por otro lado, la longitud de la distancia de visibilidad restringida (L_r) es una función compleja de la velocidad de operación de las carreteras y de la geometría de las curvas.

3. CONCLUSIONES

Los modelos expuestos en esta ponencia se deben considerar como aproximados en su naturaleza debido a que en los mismos no se incorporan un gran número de características geométricas y físicas. En este sentido, hasta ahora, los investigadores no han sido capaces de estimar cuantitativamente los beneficios que se producen al mejorar las siguientes características que también afectan a la seguridad de la circulación vial: peralte; curvas de transición; características superficiales del pavimento y los diversos dispositivos de control y regulación del tráfico. A pesar de esta desventaja, la principal virtud del empleo de dichos modelos radica en que para evaluar la eficacia de las actuaciones de mejora de la seguridad de la circulación no son necesarios los estudios “antes y después”. Por último, cabe decir que,

aunque la tarea es ardua, existe la necesidad de investigar con la finalidad de perfeccionar los modelos multivariantes disponibles, de tal manera que se incorpore un mayor número de variables dentro del análisis de la accidentalidad.

4. REFERENCIAS

- GLENNON, J. C., y NEWMAN, T. R. *Safety and Operational Considerations for Design of Rural Highway Curves*. Report FHWA-RD-86/035. FHWA, U. S. Department of Transportation, 1983.
- MAK, K. K. *Effect of Bridge Width on Highway Safety. Relationship Between Safety and Key Highway Features: State of the Art Report 6*. Transportation Research Board, 1987.
- NEWMAN, T.R. y GLENNON, J. C. (1983). *Cost-Effectiveness of Improvements to Stopping Sight Distance Safety Problems*. Transportation Research Record 923. TRB. National Research Council, Washington, D. C.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Special Report 214. *Designing Safer Roads. Practices for Resurfacing, Restoration, and Rehabilitation*. National Research Council, Washington, D. C., 1987.
- ZEEGER, C.V. y DEACON, J. A. *Effect of Lane Width, Shoulder Width, and Shoulder Type on Highway Safety. Relationship Between Safety and Key Highway Features: State of the Art Report 6*. Transportation Research Board, 1987.
- ZEEGER, C.V., HUMMER, J., REINFURT, D., HERF, L., y HUNTER, W. *Safety Effects of Cross-Section Design for Two-Lane Roads*. Volume I-Final Report. Federal Highway Administration, Report FHWA-RD-87/008, 1987.